POLYPUBLIE

Trafic et affectation de fréquences dans un réseau cellulaire de radiomobiles

Philippe Nicolas Chailley

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	1998
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Mémoire de maîtrise/Master's thesis
URL de PolyPublie PolyPublie URL	https://publications.polymtl.ca/6762/
Conditions d'utilisation Terms of use	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence Citation	Chailley, P. N. (1998). Trafic et affectation de fréquences dans un réseau cellulaire de radiomobiles [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/6762/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche Advisors	Jean Conan
Programme Program	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

TRAFIC ET AFFECTATION DE FRÉQUENCES DANS UN RÉSEAU CELLULAIRE DE RADIOMOBILES

PHILIPPE CHAILLEY
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ET DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
DÉCEMBRE 1996

© Philippe Chailley, 1996

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

Our file Notre référence

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.

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 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.

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.

0-612-37435-1

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

TRAFIC ET AFFECTATION DE FRÉQUENCES DANS UN RÉSEAU CELLULAIRE DE RADIOMOBILES

présenté par: CHAILLEY Philippe

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

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

Mme SANSÓ Brunilde, Ph.D, présidente

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

M. SMITH Benjamin, Ph.D, membre

À ma sœur, Florence, et à Alexis†.

"Adieu, dit le renard. Voici mon secret. Il est très simple: on ne voit bien qu'avec le cœur; l'essentiel est invisible pour les yeux."
Antoine de Saint-Exupéry, *Le Petit Prince*

REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à remercier Dr. Jean Conan qui a bien voulu accepter de diriger ce travail de recherche et pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée tout au long de ma maîtrise.

Je tiens ensuite à remercier vivement le Centre de Recherche sur les Transports (CRT) de l'Université de Montréal. Sans son soutien logistique et la patience des usagers de son réseau informatique, il ne m'aurait pas été possible de réaliser l'ensemble des simulations présentées ici.

Je tiens également à remercier ma sœur, Florence, pour son soutien moral et la régularité de son courrier tout au long de mes études à Montréal.

Je remercie par ailleurs mes parents pour leur soutien moral et financier qu'il m'ont apporté tout au long de mes études, et en particulier depuis mon départ de Paris. Malgré la distance, ils ont toujours su être présents et m'apporter encouragements et précieux conseils quand j'en ai eu besoin.

Je tiens à remercier tous mes amis de France qui eux aussi m'ont soutenu par leur courrier depuis mon arrivée à Montréal.

Enfin, j'aimerais remercier tous mes amis du Québec et de l'Ontario, ceux rencontrés à Polytechnique, au Chœur de la Montagne, à la Pastorale de l'Université de Montréal, à Hearst et les autres. Bien qu'ils n'aient pas contribué directement à l'accomplissement de mon travail, ils m'auront permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

RÉSUMÉ

L'étude du trafic et de l'allocation de fréquences dans le domaine de la radiotéléphonie a fait l'objet dans le passé de nombreux travaux de recherche dans le but de mieux comprendre et cerner les problèmes reliés au congestionnement des réseaux téléphoniques cellulaires. Toutefois, la modélisation de tels phénomènes est loin d'être aisée, voire impossible à mener à bien dans certains cas, car de nombreux paramètres entrent en ligne de compte et les modèles théoriques deviennent rapidement trop compliqués à décrire et à résoudre. Il devient alors nécessaire de simuler ces phénomènes, bien que de nouveau la complexité de tels systèmes conduit souvent à introduire de nombreuses simplifications dans le modèle de simulation.

Le but de ce travail a donc été de réaliser un outil qui serait à la base de développements futurs concernant, entre autres, des études spécifiques sur le trafic et l'allocation de fréquences dans le cadre d'un réseau radiomobile 2D.

Dans cette optique, la première partie du travail a consisté en la mise au point d'un simulateur bidimensionnel utilisant un modèle hybride entre la simulation par roulette et la simulation en temps réel. Pour cela, un modèle de mobilité a été développé et mis en œuvre. Puis, les modèles classiques de la téléphonie concernant les processus de naissance et de mort ont été rajoutés. De plus, afin de simuler un réseau de taille infinie, un modèle de réseau fermé sur lui-même a été implanté.

Quelques simulations spécifiques ont alors été réalisées pour étudier l'impact des procédures d'allocation des fréquences sur la capacité du réseau cellulaire. Il est ressorti que l'affectation fixe des fréquences est pénalisante relativement au nombre d'usagers que le système peut desservir. Quelques résultats intéressants ont été obtenus à l'aide de différentes stratégies d'allocations avec réservation de canaux

pour la gestion des handoffs et une adaptation dynamique à l'état du réseau. Ces résultats ne sont dans le présent que rudimentaires mais ils restent très prometteurs. À ce titre, on notera que la conception du simulateur qui est très modulaire permet d'ajouter autant de stratégies d'allocations de fréquences que désiré. Cette modularité permet également de concevoir ce simulateur comme point de départ de nombreuses études sur le trafic et l'allocation de fréquences. Il est en effet possible d'y modifier la plupart des paramètres de trafic et de mobilité et donc d'adapter les conditions de simulation à des données réalistes telles que mesurées sur les systèmes en activité. Conséquemment, nous estimons que ce travail constitue une contribution préliminaire et importante pour de futurs développements.

ABSTRACT

Traffic and channel allocation problems in cellular radio systems have been the subject of numerous previous research studies in order to better understand and solve the inherent problems of overload of cellular radio networks. However, analytical modeling of such systems is extremely difficult since many parameters must be taken into account. Therefore, it is often necessary to simulate these phenomena even though the complexity of such systems leads eventually to simplified model.

The primary objective of this work is to produce a tool that would be the basis of future developments concerning explicit studies on traffic and channel allocation in a bi-dimensionnal cellular network.

The first part of this study was geared to the creation of a bi-dimensionnal simulator. We therefore developed a mobility model and a finite network model, which approximates an infinite one. In addition, we used standard models for call arrivals and call durations. Specific simulations were then performed to study the impact of allocation strategies on the network's capacity. Compared to the fixed channel allocation, other strategies, such as a fixed channel allocation with prioritized handoff procedures or dynamic channel allocations, lead to substantial improvement in network's capacity . The results are still rudimentary in scope but remain promising. The simulator, due to its modular conception which allows the insertions of realistic data, could be considered as a starting point for future research work .

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vi

ABSTRACT viii

TABLE DES MATIÈRES ix

LISTE DES TABLEAUX xv

LISTE DES FIGURES xvi

LISTE DES SYMBOLES xxiv

LISTE DES ABRÉVIATIONS xxvi

LISTE DES ANNEXES xxviii

INTRODUCTION 1

Chapitre 1 Le trafic et l'allocation de fréquence en radiotéléphonie cellulaire 6

1.1 Différences et similitudes entre la téléphonie câblée et la téléphonie cellulaire 6

1.1.1 La téléphonie câblée 6

1.1.2 La téléphonie cellulaire 8

1.2 Quelques définitions de base 10

1.3 La procédure d'allocation de fréquences 12

1.3.1 L'allocation fixe de fréquence 13

1.3.2 L'allocation dynamique de fréquence 13

1.3.3 L'allocation hybride de fréquence 14

1.4 Différentes allocations de fréquences proposées dans la littérature 15

1.4.1 L'allocation 'Maximum Packing' (MP) 15

1.4.2 L'allocation 'Clique Packing' (CP) 17

1.4.3 L'allocation de Markov (MA) 19

1.4.4 Les méthodes dites 'timide' et 'agressive' 20

1.4.5 Autres méthodes 21

1.4.6 Conclusion relative aux diverses méthodes 22

1.5 Le modèle utilisé 23

1.5.1 Processus de naissance 23

1.5.2 Processus de service 24

1.5.3 Position et mouvement des mobiles 25

1.5.3.1 La position des mobiles dans le réseau 25

1.5.3.2 Le mouvement des mobiles 25

1.5.4 Le réseau 30

1.5.4.1 La modélisation d'une cellule 30

1.5.4.2 Facteur et patron de ré-utilisation des fréquences 33

1.5.4.3 Un réseau fermé sur lui-même 35

Chapitre 2 Mise au point du simulateur 38

2.1 Introduction 38

2.2 Simuler le temps 39

2.2.1 Naissance d'un mobile 40

2.2.2 Mort d'un mobile 41

2.2.3 Mise à jour des caractéristiques du mouvement du mobile 41

2.2.4 Mise à jour du réseau 42

2.2.5 Modélisation du handoff 44

2.2.6 Validité de l'utilisation de la pile d'événements 44

2.3 La répartition des mobiles dans le réseau 45

2.4 Le générateur de variables aléatoires 46

2.5 Validation du simulateur 48

2.5.1 Le régime transitoire 49

2.5.2 Le nombre de mobiles actifs dans le réseau et la fermeture du réseau . 52

2.5.3 Vérification de l'uniformité de répartition sur le réseau fermé 56

2.6 Allocation des canaux 57

2.6.1 Réservation de canaux pour le handoff 58

2.6.2 Allocation fixe de fréquences - Patron de sept cellules 59

2.6.3 Allocation dynamique de fréquences 60

2.6.4 Le complexe cellulaire 62

2.6.5 Caracteristiques des mobiles 63

Chapitre 3 Discussion des résultats obtenus **67**

3.1 Introduction **67**

3.2 Notations **68**

3.3 Les diverses probabilités de blocage **68**

3.4 L'affectation fixe de fréquence, sans réservation pour le handoff. **69**

3.4.1 La durée moyenne d'une communication 72

3.4.2 Rapport entre le nombre moyen de communications par cellule et le nombre d'appels initiés par cellule 73

3.4.3 Le nombre moyen de mobiles 75

3.4.4 Le nombre moyen de handoffs 75

3.4.5 Corrélation entre les paramètres précédents 77

3.4.6 La modélisation du handoff 79

3.5 L'affectation fixe de fréquences, avec réservation de canaux pour le handoff 81

3.6 L'affectation dynamique de fréquence, sans réservation de canaux pour le handoff 87

3.7 Comparaison entre l'affectation fixe et les affectations dynamiques 89

Chapitre 4 Avenues de recherche et extensions possibles à partir du simulateur 2D - Conclusion 97

4.1 Un modèle de cellules floues 97

4.2 Mise à jour de l'utilisation des canaux 98

4.3 Le modèle Manhattan 101

4.4 Conclusion 103

BIBLIOGRAPHIE 105

LISTE DES TABLEAUX

1.1 Pré-assignation pour l'allocation de Markov 19

1.2 Exemple d'allocation de Markov 19

1.3 Valeur des paramètres de simulation de la marche aléatoire 27

1.4 Valeurs de k pour n variant de 3 à 6 32

1.5 Surfaces exactes et approchées des différents modèles de cellules 32

2.1 Résultats sur la moyenne et la corrélation entre 10 variables aléatoires uniformes indépendantes 48

2.2 Temps CPU des simulations 52

2.3 Exemple d'allocation fixe de canaux pour un patron de 7 cellules et 21 canaux disponibles 59

3.1 Allocation fixe de fréquences: corrélation entre plusieurs variables statistiques 78

LISTE DES FIGURES

1.1 Exemple de structure d'un réseau câblé 7

1.2 La station de base et sa zone de couverture 8

1.3 Exemple de structure d'un réseau cellulaire 9

1.4 Illustration de la marche aléatoire 28

1.5 Simulation de la marche aléatoire - 5000 événements 28

1.6 Simulation de la marche aléatoire - 40 événements 29

1.7 Simulation de la marche aléatoire - 10 événements 29

1.8 La modélisation d'une cellule 30

1.9 Polygône à n côtés, $n = 7$ 31

1.10 Les trois modèles de cellules les plus utilisés 32

1.11 Le patron de ré-utilisation de Bell 34

1.12 Le patron de ré-utilisation de Bell à l'intérieur du réseau 34

1.13 Réseau fermé 36

2.1 Insertion d'événements dans la pile d'événements lors d'une naissance 40

2.2 Retrait d'événements dans la pile d'événements lors d'une mort 41

2.3 Retrait d'événements dans la pile d'événements lors d'un handoff échoué pendant la mise à jour du mouvement du mobile 42

2.4 Retrait d'événements dans la pile d'événements lors d'un handoff échoué pendant la mise à jour du réseau 43

2.5 Le générateur *deux dimensions* 47

2.6 Nombre de mobiles actifs en fonction du temps, $\rho = 25$, $t \in [0 : 44100]$ 51

2.7 Nombre de mobiles actifs en fonction du temps, $\rho = 25$, $t \in [0 : 3600]$. 51

2.8 Analyse du regime transitoire, $\rho \in [1 : 50]$, $t \in [0 : 3600]$ 51

2.9 Nombre moyen de mobiles en fonction du trafic offert par cellule ρ en Erlangs, dans un réseau fermé 54

2.10 Écart à la théorie, en %, en fonction du trafic offert par cellule ρ en Erlangs, dans un réseau fermé 54

2.11 Nombre de sorties en fonction du trafic offert par cellule ρ en Erlangs, dans un réseau non fermé - Temps utile de simulation = 43200 s 54

2.12 Pourcentage de sorties par rapport au nombre total de communications débutées en fonction du trafic offert par cellule ρ en Erlangs, dans un réseau non fermé - Temps utile de simulation = 43200 s 55

2.13 Nombre moyen de mobiles en fonction du trafic offert par cellule ρ en Erlangs, dans un réseau non fermé 55

2.14 Ecart en % du nombre moyen de mobiles par rapport à un réseau fermé en fonction du trafic offert par cellule ρ en Erlangs, dans un réseau non fermé 55

2.15 Nombre moyen de mobiles dans les cellules 1 à 49 et moyenne sur le réseau 56

2.16 Détermination de la cellule voisine la plus proche du mobile 61

2.17 Allocation dynamique - Stratégie 1 61

2.18 Allocation dynamique - Stratégie 2 61

2.19 Allocation dynamique - Stratégie 3 61

2.20 Réseau fermé de 16 cellules pour un patron de 4 cellules 64

2.21 Patron de 8 cellules pouvant recouvrir le plan 64

2.22 Réseau fermé de 49 cellules pour un patron de 8 cellules 65

2.23 Réseau fermé de 64 cellules pour un patron de 8 cellules 66

3.1 Allocation fixe - Probabilité de blocage en fonction de N_c et ρ^* 70

3.2 Allocation fixe - Probabilité de perte en fonction de N_c et ρ^* 70

3.3 Allocation fixe - Probabilité de non-service en fonction de N_c et ρ^* ... 70

3.4 Allocation fixe - Probabilités de blocage en fonction de N_c - $\rho^* = 50\%$ 71

3.5 Allocation fixe - Probabilités de blocage en fonction de N_c - $\rho^* = 75\%$ 71

3.6 Allocation fixe - Probabilités de blocage en fonction de N_c - $\rho^* = 100\%$ 71

3.7 Allocation fixe - Durée moyenne d'une communication par mobile en fonction de N_c et ρ^* 74

3.8 Allocation fixe - Nombre moyen de handoffs par mobile en fonction de N_c et ρ^* 74

3.9 Allocation fixe - Durée moyenne d'une communication par cellule en fonction de N_c et ρ^* 74

3.10 Allocation fixe - Rapport entre le nombre de communications par cellules et le nombre d'appels initiés par cellule en fonction de N_c et ρ^* 76

3.11 Allocation fixe - Nombre moyen de mobiles en fonction de N_c et ρ^*: écart en % par rapport à la valeur pour $N_c = \infty$..... 76

3.12 Allocation fixe - Rapport du nombre de handoffs par cellule sur le nombre de communications par cellule en fonction de N_c et ρ^* 76

3.13 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff, $N_{ch} = \lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$ - Nombre moyen de mobiles: écart en % par rapport à la valeur pour $N_c = \infty$ 82

3.14 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff, $N_{ch} = \lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$ - Écart en % du nombre moyen de mobiles avec l'affectation fixe sans réservation 82

3.15 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff, $N_{ch} = \lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$, $N_c \geq 25$ - Nombre moyen de mobiles: écart en % par rapport à la valeur pour $N_c = \infty$ 82

3.16 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff, $N_{ch} = \lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$, $N_c \geq 25$ - Écart en % du nombre moyen de mobiles avec l'affectation fixe sans réservation 83

3.17 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Nombre moyen de mobiles sur l'ensemble du réseau - $\rho^* = 75$, $N_{ch} \leq N_c - 1$ .. 83

3.18 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Nombre moyen de mobiles sur l'ensemble du réseau - $\rho^* = 75$, $N_{ch} \leq \lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$ 83

3.19 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Probabilité de blocage - $\rho^* = 75$..... 84

3.20 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Probabilité de perte - $\rho^* = 75$ 84

3.21 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Probabilité de non service - $\rho^* = 75$ 84

3.22 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Probabilité de blocage - $\rho^* = 75$..... 85

3.23 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Probabilité de perte - $\rho^* = 75$ 85

3.24 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Probabilité de non service - $\rho^* = 75$ 85

3.25 Allocation dynamique 1 - Probabilité de non service 88

3.26 Allocation dynamique 2 - Probabilité de non service 88

3.27 Allocation dynamique 3 - Probabilité de non service 88

3.28 Allocation dynamique 3 - Nombre moyen de mobiles en fonction de N_c et ρ^*: écart en % par rapport à la valeur pour $N_c = \infty$ 89

3.29 Fixe vs Dynamique - Probabilité de blocage en fonction de N_c, $\rho^* = 75$ 90

3.30 Fixe vs Dynamique - Probabilité de perte en fonction de N_c, $\rho^* = 75$. 91

3.31 Fixe vs Dynamique - Probabilité de non service en fonction de N_c, $\rho^* = 75$ 91

3.32 Fixe vs Dynamique - Nombre moyen de mobiles actifs sur l'ensemble du réseau en fonction de N_c, $\rho^* = 75$ 92

3.33 Fixe vs Dynamique - Nombre moyen de mobiles actifs sur l'ensemble du réseau en fonction de N_c, $\rho^* = 100$ 92

3.34 Fixe vs Dynamique - Nombre de canaux nécessaires pour avoir $P_{ns} = 1\%$ 93

3.35 Fixe vs Dynamique - Nombre de canaux nécessaires pour avoir $P_b = 2\%$ 93

3.36 Fixe vs Dynamique - Nombre de canaux nécessaires pour avoir $P_i = 2\%$ 94

3.37 Fixe vs Dynamique - Nombre de canaux nécessaires pour avoir $P_{ns} = 2\%$ 94

3.38 Fixe vs Dynamique - Nombre de canaux nécessaires pour avoir $P_{ns} = 5\%$ 95

4.1 Exemple de mise à jour de l'affectation des canaux: $t = t_1^-$ 99

4.2 Exemple de mise à jour de l'affectation des canaux: $t = t_1^+$ 99

4.3 Exemple de mise à jour de l'affectation des canaux: $t = t_2^-$ 99

4.4 Exemple de mise à jour de l'affectation des canaux: $t = t_2^+$ 99

4.5 Allocation dynamique 1 sans vs avec réorganisation de canaux - Probabilité de non service - $\rho^* = 75$ 102

4.6 Allocation dynamique 2 sans vs avec réorganisation de canaux - Probabilité de non service - $\rho^* = 75$ 102

4.7 Allocation dynamique 3 sans vs avec réorganisation de canaux - Probabilité de non service - $\rho^* = 75$ 102

A.1 Densité de probabilité d'une variable aléatoire uniforme U(0,1)..... 110

A.2 Densité de probabilité d'une variable aléatoire uniforme U(23,29) 110

A.3 Densité de probabilité d'une variable aléatoire exponentielle $\beta = 0.006$ 110

A.4 Densité de probabilité d'une variable aléatoire normale $N(350, 2)$ 111

A.5 Densité de probabilité d'une variable aléatoire lognormale $LN(1, .25)$. 113

A.6 Densité de probabilité d'une variable aléatoire de Rayleigh de moyenne 35 113

A.7 Densité de probabilité d'une variable aléatoire alpha $A(0, \pi, 4.2)$ 113

B.1 Structure de l'élément *Canal* 118

B.2 Structure de l'élément *Mobile* 119

B.3 Structure de l'élément *Cellule* 122

B.4 Les relations entre les structures 124

B.5 Ordre de classement des cellules adjacentes dans un tableau 131

C.1 L'architecture du réseau GSM 133

LISTE DES SYMBOLES

D : Distance entre deux cellules de même patron

N : Facteur de réutilisation

N_c : Nombre de canaux disponibles dans une cellule

N_{ch} : Nombre de canaux réservés au handoff

P_b : Probabilité de blocage d'un appel

P_i : Probabilité de perte (d'interruption) d'un appel

P_{ns} : Probabilité de non service

R : Rayon d'une cellule

R_{ca} : Rapport du nombre de communications par cellule sur le nombre d'appels par cellule

R_{sc} : Rapport du nombre de sorties sur le nombre de communications débutées

v : Vitesse d'un mobile

$\overline{v}$: Vitesse moyenne d'un mobile

$\overline{t_h}$: Temps moyen entre deux réactualisations des caractéristiques du mouvement d'un mobile dans le modèle de marche aléatoire

α_β : Paramètre de la loi Alpha dans le modèle de marche aléatoire

β : Angle entre la direction du mobile et la direction principale dans le modèle de marche aléatoire

γ : Distance de la destination dans le modèle de marche aléatoire

λ : Taux moyen d'inter-arrivées

λ_h : Taux moyen d'inter-arrivées entre deux réactualisations des caractéristiques du mouvement d'un mobile dans le modèle de marche aléatoire

μ : Taux moyen de service

ρ : Trafic offert

ρ^* : Charge du réseau

φ : Angle absolu de la destination dans le modèle de marche aléatoire

LISTE DES ABRÉVIATIONS

1D : Unidimensionnel

2D : Bidimensionnel

A-DCA : Allocation dynamique de fréquences 'agressive'

AMPS : Advanced Mobile Phone Service

AMRC : Accès multiple à répartition de codes (CDMA en anglais)

AMRF : Accès multiple à répartition de fréquences (FDMA en anglais)

AMRT : Accès multiple à répartition de temps (TDMA en anglais)

CCS : Centi-Call Second

CP : Clique Packing

DCS-1800 : Digital Cellular System - 1800 MHz

Dyn1 : Allocation Dynamique de type 1

Dyn2 : Allocation Dynamique de type 2

Dyn3 : Allocation Dynamique de type 3

Dynamique : Allocation Dynamique

FCC : Federal Communications Commission

Fixe : Allocation Fixe

GSM : Global System for Mobile communications

IS-54 : Interim Standard 54

IWF : Inter-Working Functions

JDC : Japanese Digital Cellular

MA : Allocation de Markov

MP : Maximum Packing

NMT : Nordic Mobile Telephone

PA : 'Poliment Agressive'

PCS : Personal Communication System

PPA : 'Poliment Agressive Persistante' (Persistant Polite Aggressive)

RNIS : Réseau Numérique à Intégration de Service (ISDN en anglais)

RTC : Réseau Téléphonique Commuté

T-DCA : Allocation dynamique de fréquences 'timide'

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Génération de variables aléatoires à partir de variables aléatoires uniformes 108

Annexe B Le code du simulateur: explication des différents modules 115

Annexe C La téléphonie cellulaire: l'exemple du GSM 132

INTRODUCTION

La radiotéléphonie est une discipline qui date de bientôt un siècle. En effet, c'est en 1897 que G. Marconi réalisa la première expérience de radiotéléphonie en établissant une liaison hertzienne de 30 kilomètres entre l'île de Wight et un bateau. Suivirent quelques réalisations aux États-Unis, appliquées aux services de police, dans les années 20 et les années 30, qui aboutirent à la mise au point par Motorola d'un système radio-portatif fonctionnel mais encombrant en 1938. Les Laboratoires Bell continuent les recherches en exploitant les développements technologiques (semi-conducteurs, circuits intégrés) pendant de longues années, avant d'aboutir, en 1979, à l'édification de la norme AMPS (Advanced Mobile Phone Service). Elle est tout d'abord mise en service sous forme expérimentale par AT&T, via sa filiale IBT (Illinois Bell Telephone). Mais devant le succès de cette entreprise, puisque le nombre d'utilisateurs dépasse rapidement les deux mille cinq cent, elle sera finalement normalisée en 1982 par le FCC (Federal Communications Commission). Suivirent de nombreuses implantations sous l'égide de diverses compagnies d'opérateurs. Par exemple, le service au Canada est actuellement assuré par plusieurs opérateurs: Bell Cellulaire, Cantel et Microcell.

Parallèlement, d'autres normes analogiques dites de 'première génération' se développent, principalement en Europe avec Ericsson (NMT, Nordic Mobile Telephone) et au Japon avec NTT. Pour permettre d'interfacer les différents systèmes, un besoin très net se fait sentir d'uniformiser les normes. C'est ainsi que sont nés les standards numériques de 'deuxième génération', tels que le GSM (Global System for Mobile

communications), commercialisé depuis 1992, d'abord en Europe puis sur l'ensemble de la planète, et IS-54 (Interim Standard) en Amérique du Nord. Actuellement, on commence à développer les standards de troisième génération liés aux systèmes de communications personnelles (PCS, Personal Communication System). On s'oriente essentiellement vers des systèmes à usage plus universel, qui permettraient en particulier d'avoir un seul numéro de téléphone rattaché à un usager, et de le rejoindre où qu'il soit, au travail, à la maison ou en déplacement ([2], [3], [6], [24], [25]).

C'est particulièrement au cours de la dernière décénnie que les radiocommunications mobiles ont connu un essor remarquable. En effet, le nombre d'abonnés ne cesse de croître chaque année, à un point tel que le problème majeur des opérateurs radiomobiles actuels est de parvenir à augmenter la capacité du réseau dans le même rapport.

L'objectif premier d'un opérateur radiocellulaire est, principalement à des fins de profit, de desservir un nombre maximum d'usagers dans des limites de qualité de service raisonnables. Il doit donc tout d'abord fournir un service de qualité sur la liaison téléphonique. Par ailleurs, la demande ne cessant de croître comme indiqué dans [23], les opérateurs doivent dorénavant trouver les moyens de desservir ce nombre croissant d'usagers, en dépit du fait que la capacité, en termes du nombre d'usagers, est limitée essentiellement par le fait que le spectre de fréquences utilisables n'est pas extensible à volonté. Plusieurs méthodes permettent d'augmenter le nombre d'usagers, et ce, malgré un spectre de fréquences limité. Citons entre autres la sectorisation des cellules ainsi que les méthodes d'accès et l'allocation dynamique de fréquences.

La sectorisation de cellule consiste à diviser la cellule en plusieurs secteurs dans le but de diminuer les interférences entre canaux adjacents. Le choix entre les différentes

méthodes d'accès multiple aux canaux (AMRF, AMRT, AMRC) permet, comme par exemple avec le système GSM, l'accès à huit utilisateurs simultanés sur un même canal. L'allocation dynamique de fréquences, quant à elle, utilise des emprunts de fréquences entre les diverses cellules quand cela est possible. Nous développerons plus particulièrement ce point ultérieurement puisqu'il constitue une des applications possibles de notre travail.

Depuis toujours l'augmentation de trafic a été source de problèmes pour la téléphonie en général, et pour la téléphonie cellulaire en particulier. De très nombreuses études ont déjà été réalisées que ce soit sur le trafic en général ou plus particulièrement sur les problèmes de handoff, d'allocation fixe ou dynamique de fréquences ([7] [10] [11] [15] [16] [19] [22] [26]). Le problème de l'affectation dynamique de fréquences a intéressé les chercheurs très tôt, puisque dès 1973, L.G. Anderson traite de ce problème dans [1], c'est-à-dire bien avant que les Bell Labs n'aient terminé, en 1979, les travaux sur la norme de première génération AMPS, et les publie dans [17]. Cependant, le problème d'allocation dynamique de fréquences reste malgré tout un sujet d'actualité, car aucune méthode miracle n'a été mise au point et bien des opérateurs se contentent d'utiliser des méthodes empiriques.

On notera en regard avec l'affectation de fréquences qu'un utilisateur, lorsqu'il est en communication, n'utilise pas qu'un seul canal, car il lui faut simultanément un canal pour la liaison montante 'mobile - station de base', et un canal pour la liaison descendante 'station de base - mobile'. On parle alors de canaux bilatéraux et les deux fréquences utilisées sont dans deux parties du spectre bien espacées afin de minimiser les problèmes dus aux interférences. Il faut également comptabiliser l'utilisation des canaux lors des opérations de maintenance et dont les signaux sont très souvent insérés sur les canaux physiques de communication. Ces signaux de signalisation

sont actifs lors de la communication, mais également lorsque le mobile est au repos, où ils sont alors utilisés par les fonctions de 'paging' (téléavertissement, localisation des mobiles hors communication). Ces aspects n'ont pas été pris en compte dans ce travail car ils auraient été trop compliqués à modéliser en plus des canaux de communication. On trouvera de plus amples informations sur le trafic de 'paging' dans le travail de Lam [13].

Par ailleurs, il est important de noter que de nos jours, le téléphone cellulaire est plus qu'un simple téléphone mobile. D'une part, les usagers veulent avoir les fonctions de base d'un téléphone, telles que le transfert d'appels, le blocage d'appels entrant, etc...; mais ils en demandent beaucoup plus à leurs opérateurs qui doivent développer un grand nombre de fonctions auxiliaires comme les services de fax ou de messages courts. En fait, une volonté très nette s'affiche actuellement pour amener les standards des systèmes cellulaires au niveau du RNIS, ainsi que l'indique [18].

Un des concepts développés par le téléphone cellulaire est l'itinérance, ce qui permet d'utiliser son téléphone cellulaire n'importe où et y compris hors de son réseau d'attache. Comme nous le mentionnons à l'Annexe C, ce concept a été très bien intégré dans la norme GSM. Notons également qu'il existe déjà des compagnies qui travaillent sur les fonctions d'adaptation de protocoles (IWF, InterWorking Functions) pour permettre à un cellulaire de naviguer sur Internet... ([18])

Dans ce contexte général, il paraissait important de développer un outil de simulation de trafic radiomobile qui devrait être le point de départ de nombreuses études ultérieures, dont celles concernant l'allocation de fréquences. Chalimon [5] a déjà réalisé un simulateur radiomobile unidimensionnel, idéal pour modéliser un trafic autoroutier. Le travail présenté ici doit être considéré comme un complément formel à celui de Chalimon. En effet, il nous a mené dans un premier temps à la réalisation

et la mise au point d'un simulateur radiomobile bidimensionnel qui permet une étude plus générale du trafic.

Pour cela, nous avons dû utiliser un modèle de marche aléatoire pour simuler le mouvement des mobiles, développé au premier chapitre, de même qu'un modèle de réseau cellulaire fermé sur lui-même permettant ainsi de simuler un réseau de dimension infinie.

Le deuxième chapitre traite de la mise au point du simulateur et des diverses stratégies d'allocation de fréquences utilisées. Après avoir validé le simulateur, nous avons, dans un second temps, étudié l'impact du nombre de canaux disponibles dans chaque cellule sur le trafic que l'on peut écouler dans cette cellule pour une politique d'allocation fixe des canaux. Comme cette stratégie n'est pas toujours nécessairement efficace pour répondre aux besoins des usagers, nous avons aussi étudié différentes stratégies d'allocation dynamique de fréquences, afin de voir s'il était possible d'améliorer le service fourni aux usagers, conduisant à une augmentation du nombre d'usagers pouvant accéder au réseau simultanément. Les résultats de ces simulations sont présentés au troisième chapitre.

Enfin, nous proposons quelques unes des avenues possibles de recherches ultérieures à partir du simulateur au quatrième chapitre, comme conclusion de ce travail. Les annexes de ce mémoire comprennent trois parties: l'une développe certains concepts du problème de la génération de variables aléatoires; la deuxième est un guide d'utilisation du simulateur, principalement à l'intention de ceux qui poursuivront des recherches avec ce simulateur comme outil de base; enfin, la troisième partie traite de la structure du GSM, dans le but de présenter un exemple concret de ce qu'est actuellement un réseau radiomobile.

Chapitre 1

Le trafic et l'allocation de fréquence en radiotéléphonie cellulaire

Que ce soit dans le cadre de la téléphonie câblée ou cellulaire, le problème du trafic a fait l'objet de très nombreuses études comme nous l'avons déjà mentionné en introduction. La téléphonie câblée et la téléphonie cellulaire se ressemblent sur certains points, comme par exemple les problèmes d'engorgement au niveau des commutateurs, mais diffèrent sur un point majeur, qui est le propre de la téléphonie cellulaire: les usagers du cellulaire sont susceptibles de se déplacer, voire de parcourir une distance assez grande pour que ce ne soit pas toujours la même station de base (commutateur) qui assure la connexion avec le réseau durant toute la communication. Ces mouvements engendrent donc des variations de trafic dans les cellules, qui sont alors dépendantes les unes des autres, ce qui rend l'analyse du système beaucoup plus complexe.

1.1 Différences et similitudes entre la téléphonie câblée et la téléphonie cellulaire

1.1.1 La téléphonie câblée

Le système téléphonique câblé est de structure relativement simple, comparé aux systèmes cellulaires actuels. Les lignes téléphoniques qui s'étirent jusque chez les particuliers sont toutes reliées à des commutateurs d'abonnés, qui eux-même sont reliés

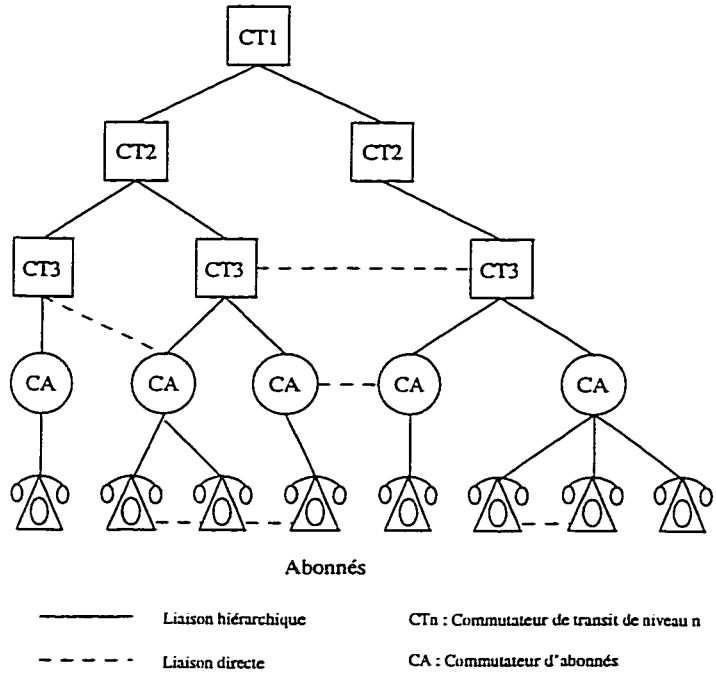


Figure 1.1 Exemple de structure d'un réseau câblé

à des commutateurs de transit, plus importants, et ainsi de suite suivant plusieurs niveaux menant jusqu'à un super-commutateur. Le réseau câblé est d'ailleurs également appelé Réseau Téléphonique Commuté (RTC). L'intérêt d'utiliser un commutateur est double: tout d'abord, financier pour l'opérateur, en concentrant des lignes téléphoniques; et aussi d'un point de vue fonctionnel, en établissant le lien entre les divers abonnés de manière directe ou indirecte en passant par d'autres commutateurs et en assurant aussi une plus grande flexibilité du réseau et surtout un accès plus rapide des abonnés entre eux.

Certains commutateurs peuvent d'ailleurs parfois être reliés par des lignes directes sans obligatoirement passer par un commutateur de niveau hiérarchique supérieur. Il existe également parfois des lignes dédiées reliées à des commutateurs spéciaux, comme par exemple dans le cas des services 1-800 ou 1-888. Le lecteur trouvera un exemple de structure d'un réseau câblé à la figure 1.1.

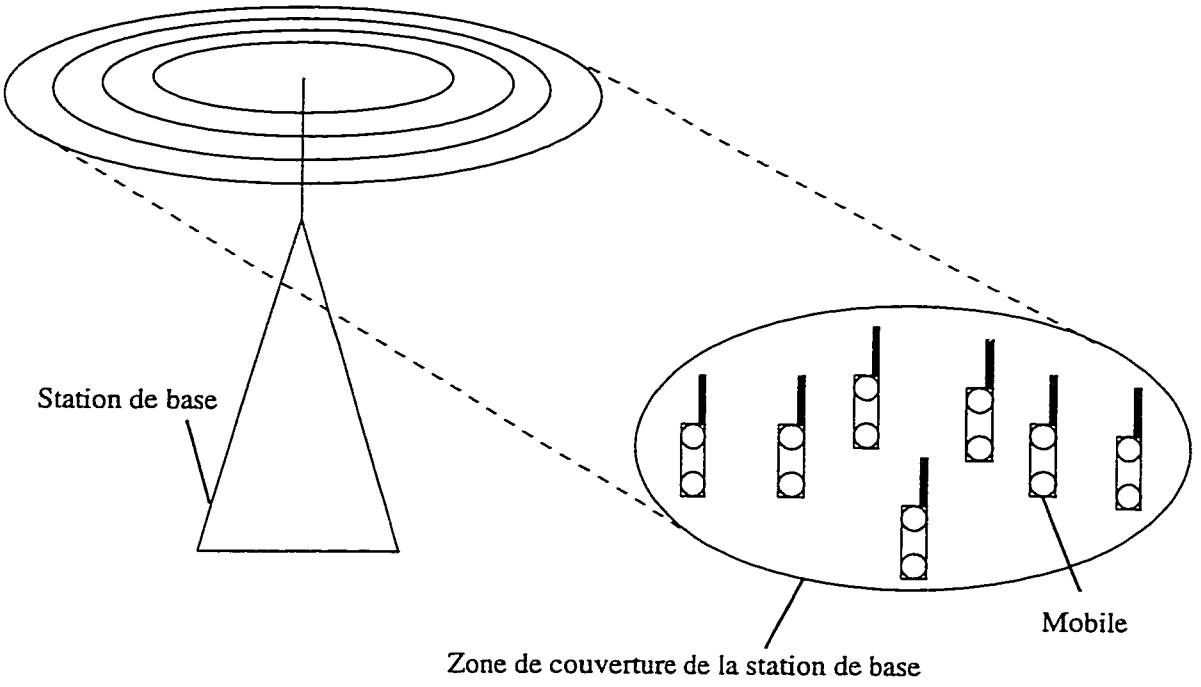


Figure 1.2 La station de base et sa zone de couverture

Pour un développement plus élaboré de tous ces concepts, nous renvoyons le lecteur à [5].

1.1.2 La téléphonie cellulaire

La téléphonie cellulaire, quant à elle, gère des usagers mobiles. Ceci veut dire que, par essence même, les usagers n'ont aucune raison de toujours se trouver dans un même endroit. Il a donc fallu trouver un équipement qui puisse remplir la fonction de commutateur tout en intégrant le concept de mobilité, i.e. la *station de base*, ainsi que montré à la figure 1.2.

C'est la station de base qui gère les appels: elle détecte tout appel entrant ou sortant, localise les mobiles, établit les communications, les aiguille, et enfin rompt

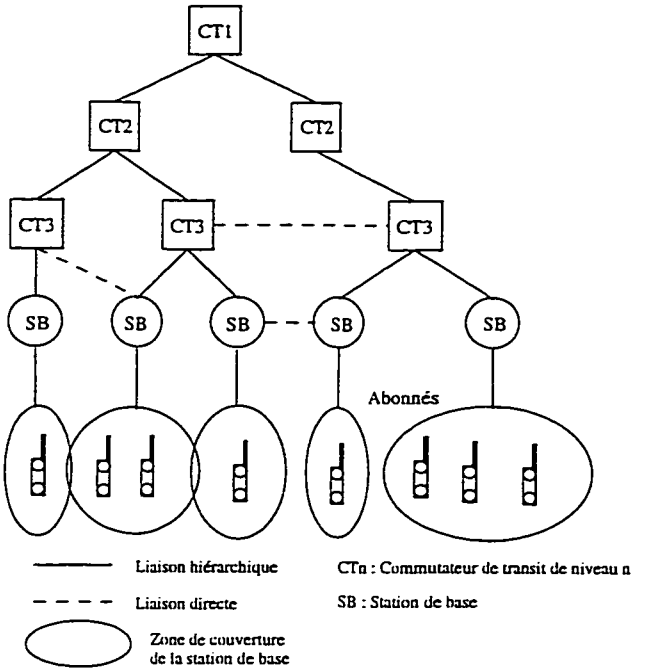


Figure 1.3 Exemple de structure d'un réseau cellulaire

ces mêmes communications. La station de base remplit également la fonction de concentrateur de lignes comme un commutateur du RTC, ainsi qu'il est décrit à la figure 1.3. Ici, les lignes physiques sont remplacées par des "canaux" radiomobiles modulés, qui sont caractérisés par la fréquence porteuse centrale utilisée; c'est pour cela que l'on assimile souvent un canal radiomobile à une fréquence.

Il faut cependant bien faire la différence entre un commutateur du RTC et une station de base. Le commutateur gère des lignes câblées, la station de base des canaux radio-mobiles. Le commutateur est attaché à un certain nombre de lignes bien identifiées, alors que la station de base n'est rattachée à aucun mobile. En effet, chaque mobile est en liaison radio avec une station de base seulement quand il se trouve dans sa zone de contrôle. Donc, aucun mobile n'est attaché de façon rédhibitoire à une station de base particulière, et réciproquement. Ceci implique que le nombre d'abonnés reliés à une station de base ne peut être fixe, contrairement au

cas du commutateur du RTC. Cependant, ainsi que nous allons le voir un peu plus loin, le nombre de canaux disponibles par cellule est le plus souvent fixé.

Le lecteur trouvera à l'Annexe C un exemple concret d'un système de radiocellulaire, illustré par un développement relatif à l'architecture du réseau GSM (Global System for Mobile Communications).

1.2 Quelques définitions de base

Mobile : Usager possédant un téléphone cellulaire.

Cellule : Zone desservie par une station de base.

Canal radiomobile : L'équivalent en cellulaire d'une ligne câblée du RTC. On associe un canal radiomobile à une *paire de fréquences*, une pour la liaison montante (mobile-base) et une pour la liaison descendante (base-mobile); les termes d'*allocation de canal* ou d'*allocation de fréquences* sont donc employés indifféremment.

Station de base : Équipement radio 'commutateur' auquel sont reliés les mobiles en activité dans la cellule correspondante.

Appel entrant : Appel arrivant au mobile.

Appel sortant : Appel initié par le mobile.

Tentative d'appel : Essai d'un abonné vers un autre abonné.

Appel : Tentative d'appel acheminée vers l'abonné désiré.

Communication : Appel auquel l'abonné désiré répond.

Appel complété : Communication terminée par décision de l'usager.

Appel interrompu : Communication terminée prématurément, suite à un handoff échoué ou tout autre phénomène extérieur à l'usager.

Appel bloqué : Tentative d'appel échouée.

Handoff, Relève : Tentative de changement de station de base.

λ : Taux moyen d'inter-arrivées entre deux arrivées de mobiles dans une cellule.

μ : Taux moyen de service. C'est le temps moyen qu'un mobile passe dans le réseau.

Trafic offert : Nombre moyen d'appels qui arrivent pendant le temps moyen de service ($\rho = \lambda/\mu$).

Trafic écoulé : Nombre moyen de lignes (serveurs) occupées simultanément. C'est également le nombre moyen de mobiles actifs simultanément.

Charge : Rapport entre le trafic offert et le nombre de canaux disponibles par cellule ($\rho^* = \lambda/(N_c * \mu)$ où N_c est le nombre de canaux disponibles dans la cellule.

Probabilité de blocage (P_b) : Probabilité qu'un appel soit bloqué.

Probabilité de perte (d'appel) (P_i) : Probabilité qu'une communication soit interrompue.

Probabilité de non service (P_{ns}) : Probabilité qu'une tentative d'appel ne soit pas complétée, i.e. $P_{ns}=P_b+(1-P_b)*P_i$.

1 CCS (Centi-call-second) : unité de trafic définie comme un appel de 100s par heure (ou 100 appels de 1s par heure).

1 Erlang = unité de trafic définie comme un appel de 3600 s par heure (ou 3600 appels de 1 s par heure).
1 Erlang = 36 CCS

1.3 La procédure d'allocation de fréquences

Comme nous l'avons vu précédemment, un mobile n'est attaché a priori à aucune station de base. Cependant, selon sa position dans le réseau, il sera desservi par l'une ou l'autre des stations de base du réseau. La station de base en charge du mobile a pour rôle d'établir la communication et d'en assurer le bon déroulement. Pour établir la communication, la station de base doit affecter une ligne au mobile, c'est-à-dire un canal radio-mobile. Cette procédure est appelée *allocation de fréquence.*

Le principe en est très simple. Lorsqu'un mobile arrive dans une zone contrôlée par une station de base, celle-ci le prend en charge, en attente d'un appel; la communication se fait alors grâce aux canaux de contrôle. Un mobile, lorsqu'il est branché reste donc toujours en contact avec une station de base afin de permettre une localisation plus rapide. Lorsqu'un usager décide d'appeler ou bien lorsqu'il se fait appeler, la station de base cherche s'il existe un canal radiomobile disponible, afin d'établir le plus rapidement possible la communication. De façon générale, il existe trois types d'allocations de fréquence, à savoir fixe, dynamique et hybride.

1.3.1 L'allocation fixe de fréquence

Le premier type d'allocation de fréquences est l'allocation fixe. Selon cette stratégie, un certain nombre de canaux sont alloués de manière définitive à chaque cellule. Il s'ensuit que le nombre maximum d'usagers qu'une cellule peut desservir en même temps est donc fixe et limité au nombre de canaux disponibles dans cette cellule.

C'est ainsi que, lorsqu'une station de base dessert ce nombre maximal d'usagers, aucun autre usager se situant dans sa zone de contrôle ne peut être desservi. Les appels sont soit bloqués, soit mis dans une file d'attente selon la politique choisie par l'opérateur ([15] [16]).

1.3.2 L'allocation dynamique de fréquence

L'allocation dynamique, quant à elle, permet en général de dépasser le nombre maximal d'usagers que l'on peut desservir dans une cellule fixé par le nombre de canaux disponibles dans cette cellule, grâce aux emprunts faits aux cellules voisines.

Tout d'abord, on fixe un certain nombre de canaux par cellule, *exactement comme dans le cas de l'allocation fixe.* Cependant, puisqu'un mobile n'est rattaché à aucune station de base, rien ne l'empêche de se faire servir par une station de base autre que celle qui contrôle la cellule où il se trouve. La seule raison pour laquelle un mobile se fait servir par cette station de base est que le rapport signal sur bruit y est en général de meilleure qualité. Donc, en allocation dynamique, lorsqu'un usager veut établir une communication dans une cellule déjà chargée à pleine capacité, le système va demander aux cellules voisines si celles-ci disposent de canaux libres pour le servir.

Différentes stratégies d'allocation de fréquences existent selon les caractéristiques des cellules que l'on peut considérer pour les demandes de prêt de canal, et la méthode de gestion des fréquences 'prêtées'. Le lecteur trouvera une rapide revue de littérature à ce sujet à la section 1.4. Par ailleurs, les différentes allocations dynamiques qui ont été considérées dans ce travail sont décrites à la section 2.6.3.

1.3.3 L'allocation hybride de fréquence

Cette allocation est un amalgame des deux méthodes d'allocation précédentes. En effet, on réserve certains canaux pour une stratégie d'allocation fixe de sorte qu'ils ne pourront jamais être prêtés à des mobiles se situant dans des cellules avoisinantes. Les autres seront utilisables pour une affectation dynamique, et pourront donc être prêtés à des mobiles se situant dans des cellules avoisinantes. Dans ce cas, lorsqu'un mobile cherche un canal dans la cellule où il séjourne, le système va en premier lieu chercher un canal libre parmi les canaux réservés à l'allocation fixe. Si aucun n'est disponible, la recherche va être effectuée parmi les canaux utilisables pour l'allocation dynamique.

Prenons par exemple une cellule qui gère cinq canaux dont trois sont réservés à l'allocation fixe. Supposons que deux des canaux réservés à l'allocation fixe soient utilisés, ainsi que les deux canaux non réservés à l'allocation fixe. Si un mobile, *qui se trouve dans une cellule voisine*, demande un canal à cette cellule, la demande sera refusée puisque le seul canal restant est réservé à l'allocation fixe. En revanche, si la demande avait été faite par un mobile *séjournant dans la cellule*, elle aurait été acceptée.

Passons maintenant en revue quelques unes des méthodes d'allocation dynamique

décrites dans la littérature.

1.4 Différentes allocations de fréquences proposées dans la littérature

Les problèmes liés à l'allocation de fréquence ont déjà fait l'objet de nombreuses études que ce soit dans le cadre de l'allocation fixe de fréquence ou de l'allocation dynamique, afin de mieux répondre aux variations temporelles de la charge locale de certaines cellules. Dans ce contexte, de nombreuses méthodes ont été envisagées. Cependant bien souvent une implantation réaliste de ces méthodes est quasi impossible pour cause de contraintes technologiques. C'est une des raisons pour lesquelles les opérateurs utilisent en général des méthodes heuristiques très élémentaires pour leur politique d'allocation dynamique de fréquences.

Par ailleurs, notons qu'il est en général très difficile de comparer les différentes méthodes décrites dans la littérature car chaque auteur s'impose en général des conditions différentes sur le modèle de propagation utilisé ou les critères de contrôle des interférences.

1.4.1 L'allocation 'Maximum Packing' (MP)

Cette méthode est décrite dans [22] et [10]. Sa particularité, contrairement aux méthodes déjà existantes, est sa vision globale du réseau. En effet, au lieu de regarder uniquement dans les cellules avoisinantes, la méthode du 'Maximum Packing' cherche s'il existe ou non un réarrangement possible des fréquences sur l'ensemble du réseau.

Cette stratégie d'allocation ne permet pas l'utilisation d'un même canal dans deux cellules adjacentes. Pour tout nouvel appel, on essaye d'abord d'affecter un canal qui n'est pas utilisé dans les cellules voisines. Si cela n'est pas possible, on essaye d'arranger les affectations de fréquences sur l'ensemble du réseau de telle manière qu'à nouveau aucune fréquence ne soit utilisée dans deux cellules adjacentes. Pour cela, on définit un graphe tel que chaque cellule soit un nœud du graphe. Il y a donc une arête entre deux nœuds si et seulement si les deux cellules ne peuvent utiliser le même canal en même temps.

Pour qu'une affectation soit possible, il faut que le degré du graphe d'adjacence soit deux, et qu'il n'y ait pas de cyles. Cela peut entraîner plusieurs réarrangements avant de trouver une solution, ce qui ralentit considérablement le processus.

L'avantage de cette méthode est bien sûr son caractère global qui permet d'aller chercher des canaux qui ne seraient pas disponibles si l'on ne réarrangeait pas l'assignation des fréquences sur tout un ensemble de cellules; c'est un peu sur ce principe qu'est faite une mise à jour des canaux dans le simulateur présenté ici, mais de façon plus locale, ainsi qu'indiqué au paragraphe 4.2.

Son inconvénient résulte lui aussi du caractère global de la méthode. En effet, l'algorithme doit passer au crible l'ensemble du réseau, et est donc très lent. Il est très important de se rappeler ici que pour qu'une méthode d'assignation dynamique de fréquences soit efficace, elle doit, en plus de respecter les critères d'interférences, être assez rapide pour que, lors d'un handoff, la communication ne soit pas coupée.

Il est donc clair que dans le cas d'un réseau un peu grand, cette méthode devient totalement inefficace. Ce point devient d'ailleurs de plus en plus critique

avec l'avènement des réseaux micro-cellulaires où la taille des cellules est considérablement réduite, et donc où le nombre de handoffs augmente. L.J. Cimini, dans [7], note aussi le fait que puisque ce problème est NP-complet, la méthode du Maximum Packing n'est certainement pas viable dans le cadre des réseaux micro-cellulaires.

Rappelons ici ce qu'est un problème NP-complet:

Un problème NP est un problème dont la solution peut être vérifiée par un algorithme polynômial. Un problème NP-complet possède de plus la propriété suivante: si on peut trouver un algorithme polynômial à ce problème, alors tous les problèmes NP-complet peuvent être résolus en un temps polynômial. Cependant, jusqu'à aujourd'hui, aucun problème NP-complet n'a été résolu, dans toute sa généralité, en un temps polynômial.

1.4.2 L'allocation 'Clique Packing' (CP)

Cette méthode, développée dans [22], est plus traditionnelle car elle ne considère que les cellules directement avoisinantes à la cellule où se trouve le mobile demandeur d'un nouveau canal.

Commençons par quelques définitions. Soient $\mathcal{C} = (c_1, c_2, \ldots, c_K)$ l'ensemble des cellules couvrant le réseau et $\mathcal{F} = (f_1, f_2, \ldots, f_N)$ l'ensemble des fréquences disponibles. La contrainte de ré-utilisation de fréquences est définie ici par la condition que deux fréquences ne peuvent être utilisées dans deux cellules adjacentes.

Soit $\boldsymbol{s} = (s_1, s_2, \ldots, s_K)$ le vecteur d'activité du système, où s_i est le nombre d'appels en cours dans la cellule c_i. Un vecteur s est dit admissible, si et seulement si, il existe une allocation de s_i fréquences à c_i, pour tout $i \leq K$, telle que les contraintes

de ré-utilisation soient respectées. Soit $\mathcal{S}$ l'ensemble des vecteurs s admissibles. Soit $\mathbf{e_i}$ le vecteur unitaire qui contient un 1 à la i^{eme} position, et des 0 ailleurs, i.e. il y a un appel dans la cellule i et aucun dans les autres cellules.

Une clique est définie comme étant un ensemble de cellules qui interfèrent les unes avec les autres. Tout comme dans l'allocation MP, on définit un graphe tel que chaque cellule soit un nœud du graphe et il y a une arête entre deux nœuds, si et seulement si, deux cellules ne peuvent utiliser le même canal en même temps.

On définit C comme étant l'ensemble des cliques dans C, l'ensemble des cellules c_i, et $\mathcal{S}_{cp} = \{\boldsymbol{s} : \forall X \in C, \sum_{c_i \in X} s_i \leq N\}$. $\mathcal{S}_{cp}$ est donc l'ensemble des vecteurs d'activité du système $\boldsymbol{s}$ tels que, pour toute clique de C, le nombre d'appels en cours dans cette clique est inférieur ou égal au nombre de canaux disponibles. Alors, il faut remarquer que $\mathcal{S} \subset \mathcal{S}_{cp}$, mais que, en général, $\mathcal{S} \neq \mathcal{S}_{cp}$. En effet, la définition de $\mathcal{S}_{cp}$ indique seulement que le nombre de canaux utilisés dans une clique doit être plus petit ou égal à N, le nombre total de canaux, mais *sans appliquer la contrainte de ré-utilisation.* Un appel entrant dans la cellule j n'est alors accepté que si la condition $\boldsymbol{s} + \boldsymbol{e_j} \in S_{cp}$ est respectée.

L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle ne prend pas en compte la contrainte de ré-utilisation de fréquences pour limiter les interférences, ce qui rend cette méthode inapplicable dans la pratique. Cependant, Raymond [22] fait remarquer que si l'on peut s'arranger pour que la probabilité de se trouver dans un tel cas, i.e. de se trouver dans un état appartenant à $\mathcal{S}_{cp} - \mathcal{S}$, soit faible, alors la méthode du Clique Packing est une bonne approximation de la méthode du Maximum Packing.

Cellule	1	2	3	
Choix 1	1	2	3	→ Allocation fixe
Choix 2	4	5	6	→ Allocation fixe
Choix 3	5	6	4	
Choix 4	6	4	5	
Choix 5	2	3	1	
Choix 6	3	1	2	

Tableau 1.1 Pré-assignation pour l'allocation de Markov

Cellule	1	2	3
Choix 1	X	X	X
Choix 2	X	5	6
Choix 3	X	6	4
Choix 4	6	4	5
Choix 5	2	3	1
Choix 6	3	1	2

Tableau 1.2 Exemple d'allocation de Markov

1.4.3 L'allocation de Markov (MA)

Cette méthode, également présentée dans [22] est beaucoup plus simple que les précédentes. En effet, on affecte tout d'abord à chaque cellule un ordonnancement des N canaux disponibles sur l'ensemble du réseau, sur les mêmes critères que pour une allocation fixe classique. Par exemple, pour 3 cellules et 6 canaux, les fréquences 1 et 4 seront assignées à la cellule 1, les fréquences 2 et 5 à la cellule 2, et enfin les fréquences 3 et 6 à la cellule 3 (cf. tableau 1.1).

Lorsqu'un nouvel appel arrive dans une cellule, on lui assigne le premier canal libre, selon l'ordre de préférence prescrit, mais seulement à la condition que ce canal soit également libre dans toutes les cellules adjacentes. Dans le cas contraire, l'appel est bloqué, et cela même s'il existe un canal libre avec un numéro de préférence plus faible. Prenons le cas de 3 cellules et supposons que 6 canaux soient utilisés par

cellule. Le tableau 1.1 donne un ordre de préférence d'allocation des canaux pour chacune des cellules.

Dans cet exemple, imaginons qu'à un certain moment, on ait l'affectation décrite au tableau 1.2, et qu'un appel survienne dans la cellule 1. Comme le canal 6 n'est utilisé dans aucune cellule adjacente, on peut l'affecter au nouvel appel. En revanche, avec la même allocation, si le nouvel appel était survenu dans la cellule 2, il aurait été bloqué, puisque le canal 5 est déjà utilisé dans la cellule 1. Notons ici qu'il est bloqué même si le canal 6 qui est le suivant sur la liste de préférence de la cellule 2 est libre.

Par ailleurs, dès qu'un appel est terminé dans une cellule, tous les autres appels changent automatiquement de canal pour prendre la fréquence de priorité immédiatement supérieure à celle qu'ils avaient précédemment. Ainsi, les fréquences utilisées dans chaque cellule sont toujours celles qui ont une priorité supérieure aux autres.

1.4.4 Les méthodes dites 'timide' et 'agressive'

Une autre méthode, proche de la méthode MA, est une méthode dite d'assignation dynamique de fréquences 'timide' (T-DCA). Un nouveau canal est utilisé, si et seulement si, il n'est pas utilisé dans une cellule avoisinante, ce qui lui permet de satisfaire la contrainte de ré-utilisation des fréquences. Les canaux sont choisis de façon aléatoire jusqu'à ce qu'il y en ait un qui puisse être utilisé. Si aucun n'est disponible l'appel est alors bloqué. L.J. CIMINI, dans [7], oppose cette méthode à la méthode dite 'agressive' (A-DCA), qui assigne une fréquence à la cellule même si cette fréquence est utilisée dans une cellule adjacente.

Une allocation du type agressif a essentiellement été utilisée avec le simulateur puisque les contraintes d'interférences ne sont pas prises en compte. De façon plus précise, les allocations présentées ici n'utilisent jamais la même fréquence dans deux cellules adjacentes. Cependant, il peut arriver qu'on utilise deux canaux adjacents dans une même cellule, ce qui peut pour certains équipements augmenter substantiellement les interférences.

1.4.5 Autres méthodes

L.J. CIMINI, dans [7] présente également des variantes hybrides aux algorithmes 'timide' et 'agressif'. En effet, il suggère d'utiliser a priori un algorithme 'timide'. Puis, si la recherche d'un canal inutilisé s'avère infructueuse, on recommence une recherche avec cette fois-ci un algorithme encore plus agressif que les précédents en prenant un canal déjà occupé par un utilisateur. Ce dernier applique alors lui-même un algorithme 'timide' afin de trouver un canal de remplacement à celui qu'il vient de se faire voler. S'il n'y parvient pas, alors il reprend son canal initial et l'appel perturbateur est bloqué. Cette stratégie est dénommée 'poliment agressive' (PA).

Une variante de cette méthode est celle qui est appelée 'poliment agressive persistante' (PPA, Persistant Polite Aggressive). Cette dernière essaye tous les canaux déjà utilisés jusqu'à ce que l'un des utilisateurs à qui l'on emprunte le canal puisse trouver un canal de remplacement. Les critères d'allocation sont des critères ici fondés sur la qualité du signal reçu. En cas d'échec pour l'ensemble des canaux testés, l'appel est rejeté.

1.4.6 Conclusion relative aux diverses méthodes

Les résultats des simulations des méthodes présentées précédement et rapportées dans la littérature conduisent à plusieurs conclusions, en se basant sur le critère de qualité de service mesuré par la probabilité de blocage d'un appel.

D'une part, il est prouvé que la méthode du 'Maximum Packing' (MP) est bien meilleure qu'une simple assignation fixe de fréquences, ainsi que bon nombre des méthodes d'allocation dynamique. Malheureusement, elle requiert un contrôle centralisé des fréquences et est donc impossible à implanter dans la pratique. Par ailleurs, la méthode du 'Clique Packing' (CP) est meilleure que la méthode d'allocation de Markov (MA). D'autre part, la méthode agressive dite 'polie' (PA) est moins bonne que la méthode dite 'polie persistante' (PPA), elle-même de qualité moindre que la méthode agressive pure (A-DCA).

Cependant, toutes ces méthodes ont un point de caractéristique commun: lorsque le trafic augmente trop et que le réseau atteint presque sa pleine capacité, les méthodes d'assignation dynamique se révèlent parfois inefficaces, ou moins efficaces que lorsque le réseau est peu chargé. Nous avons d'ailleurs obtenu le même type de comportement pour les différentes stratégies considérées dans ce travail. Ceci est assez logique, puisque, à pleine capacité, tous les canaux sont occupés en permanence ou presque; il devient donc impossible de trouver des canaux libres y compris dans les cellules adjacentes.

De fait, la situation est même plus dramatique dans le cas des micro-cellules (i.e. des cellules dont le rayon est très petit, de l'ordre de quelques centaines de mètres). En effet, K. West a demontré dans [26] que les méthodes agressives d'affectation dynamique conduisent parfois à des valeurs de la probabilité de blocage supérieures

à celles de l'affectation fixe dans le cas des réseaux chargés quasiment à pleine capacité.

Un grand nombre d'autres méthodes sont connues, mais ne sont pas toujours comparables entre elles. Citons cependant une méthode décrite dans [21] qui réserve certains canaux en priorité aux appel provenant de handoffs, donnant ainsi la priorité aux appels déjà existants par rapport aux nouveaux appels. Par ailleurs, des études ont également été faites par Lin dans [15] et [16] démontrant qu'un système rendant prioritaires les appels actifs diminue nettement la probabilité qu'un tel appel soit forcé d'être terminé, sans pour autant augmenter trop la probabilité de blocage des nouveaux appels. Notons que Oh, dans [19], arrive à des résultats similaires, et qu'il en est de même pour les simulations présentées dans ce mémoire.

1.5 Le modèle utilisé

Dans cette section nous développons le modèle général utilisé pour la conception du réseau et du simulateur. On y discute les processus de naissance, de service, de positionnement et de mouvement des mobiles, ainsi que des principes de la modélisation des cellules et du réseau global.

1.5.1 Processus de naissance

Le processus de naissance des appels est un processus de Poisson, de paramètre λ, c'est-à-dire que les inter-arrivées sont distribuées selon une loi exponentielle de paramètre λ. Rappelons quelques propriétés de la distribution poissonienne, qui est une distribution discrète.

$$p(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad , k \in \mathbb{N} \qquad E[k] = \lambda$$
$$\sigma_k^2 = \lambda \qquad E[k^2] = \lambda^2 + \lambda$$

Pour résumer, l'intervalle moyen entre les arrivées est $1/\lambda$ et le taux moyen d'arrivées est λ. Par ailleurs le processus de Poisson est *sans mémoire* car les temps d'inter-arrivées, de distribution exponentielle, sont indépendants les uns des autres.

Démonstration: Soit τ une variable exponentielle. Alors,

$$\begin{aligned} Pr\{\tau > t+s | \tau > s\} &= \frac{Pr\{\tau > t+s, \tau > s\}}{Pr\{\tau > s\}} \\ &= \frac{e^{-\lambda(t+s)}}{e^{-\lambda s}} \\ &= e^{-\lambda t} \\ &= Pr\{\tau > t\} \end{aligned}$$

□

1.5.2 Processus de service

Le processus des services décrit la durée des appels. C'est un phénomène relativement complexe. Cependant, on peut le modéliser par une loi exponentielle de paramètre μ, où $1/\mu$ correspond à la durée moyenne d'un appel qui a été prise égale à $120s$, valeur usuellement admise en téléphonie classique. Rappelons également les propriétés de la distribution exponentielle, qui est une distribution continue.

$$f(x) = \mu e^{-\mu x} \quad , x \in \mathbb{R}^+ \qquad E[x] = \frac{1}{\mu}$$
$$\sigma_x^2 = \frac{1}{\mu^2} \qquad E[x^2] = \frac{2}{\mu^2}$$

D. Chalimon, dans [5], fait référence à une modélisation des appels par une loi log-normale, mais n'ayant pas trouvé d'autres références mentionnant ce fait nous nous sommes limités à la modélisation par une loi exponentielle.

Faire varier λ permet donc de faire varier le trafic offert dans chaque cellule $\rho = \lambda/\mu$. En effet, les simulations présentées dans ce travail, utilisent pour λ des valeurs comprises entre 1/120 et 50/120, et donc le trafic offert ρ varie entre 1 *Erlang* et 50 *Erlangs*. Notons que cela implique que le temps moyen entre appels $1/\lambda$ varie de $120s$ à $2.4s$.

1.5.3 Position et mouvement des mobiles

1.5.3.1 La position des mobiles dans le réseau

Nous avons supposé dans les simulations une répartition uniforme des mobiles dans le réseau. Cependant, ainsi que nous le développerons dans le chapitre 2, il est possible de déséquilibrer le réseau au niveau de sa charge et donc d'augmenter le trafic dans certaines cellules particulières.

1.5.3.2 Le mouvement des mobiles

Le principe de la téléphonie cellulaire suppose que les usagers peuvent se déplacer sur l'ensemble du réseau. Ainsi que le mentionne Lam dans [13], la modélisation de la mobilité a été largement traitée. Lam a utilisé quant à lui un modèle de marche aléatoire qu'il développe dans [13]. Il y étudie l'influence de paramètres tels que la vitesse des mobiles et le temps écoulé entre deux variations du mouvement. C'est

en fonction de cette étude que nous avons choisi nos paramètres. Le modèle de la marche aléatoire est illustré à la figure 1.4 sur le plan théorique et les figures 1.5 à 1.7 illustrent pratiquement son application. Trois figures sont présentées, l'une pour mieux montrer globalement ce que donne la marche aléatoire, les autres pour mieux cerner les déplacements du mobile pour diverses échelles du temps écoulé. Rappelons ici brièvement le principe de la marche aléatoire.

Avant de démarrer son mouvement, l'usager choisit un point de destination, situé à une distance γ, faisant un angle φ par rapport à un axe de référence. La densité de probabilité de φ, $f_\Phi(\varphi)$, est uniforme, ainsi que donnée dans l'équation suivante:

$$f_\Phi(\varphi) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{si } 0 \leq \varphi < 2\pi \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{1.1}$$

Quant au choix de γ, afin de n'être arrêté dans la marche aléatoire que par des raisons liées aux appels téléphoniques (handoff échoué, fin de communication, etc...), nous avons pris $\gamma = \infty$, tel que Lam [13] le suggère.

À tout moment du trajet, la direction principale est définie comme étant la ligne droite joignant la position courante du mobile à sa destination, ainsi qu'indiqué à la figure 1.4. La direction du mobile fait alors un angle β avec la direction principale, dont la densité de probabilité $f_B(\beta)$ suit une loi Alpha avec une déviation moyenne nulle, ainsi que décrite par l'équation suivante:

$$f_B(\beta) = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{\alpha_\beta}{[1+\alpha_\beta^2\beta^2]tan^{-1}(\alpha_\beta\pi)} & \text{si } -\pi \leq \beta < \pi \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{1.2}$$

Quelques propriétés supplémentaires de la loi Alpha sont développées à l'Annexe A. Nous supposons, en accord avec Lam [13], que la déviation angulaire prend ses valeurs dans l'intervalle $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ avec une probabilité de 0.95, ce qui implique que la valeur de α_β est 4.2.

Paramètre	Valeur
$\overline{v}$	35 km/h
σ_d	$0.17 * \overline{v}$
$\overline{t_h}$	60 s
α_β	4.2

Tableau 1.3 Valeur des paramètres de simulation de la marche aléatoire

Par ailleurs, la vitesse du mobile en un point de son trajet est une variable aléatoire de densité de probabilité $f_V(v)$ qui est une gaussienne mais tronquée pour que la vitesse v soit comprise entre 0 km/h et 90 km/h, c'est-à-dire $0 \leq v \leq 25$ m/s. Notons que la moyenne de la vitesse est $\overline{v}$ et la variance est $\sigma_d = 0.17 \times \overline{v}$.

Une fois la direction et la vitesse du mobile déterminées, le mobile garde ces valeurs de paramètres de déplacement durant un temps t_h, variable aléatoire de distribution $f_h(t)$ exponentielle, donnée par:

$$f_h(t) = \begin{cases} \lambda_h e^{-\lambda_h t} & \text{si } t \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{1.3}$$

Après ce temps t_h, de nouvelles valeurs pour l'angle β et la vitesse sont à nouveau choisies aléatoirement. On défini par ailleurs $\overline{t_h} = \frac{1}{\lambda_h}$ comme étant le temps moyen pendant lequel un mobile conserve sa vitesse et sa direction. Le processus se répète tant que la destination finale (ici, $\gamma = \infty$) n'a pas été atteinte. La marche aléatoire cesse quand la communication se termine, accidentellement ou non. Le choix des paramètres de la marche aléatoire est indiqué au tableau 1.3.

Cette méthode permet, comme nous allons le voir au chapitre suivant, une modelisation adéquate du handoff puisque le trafic des cellules s'en trouve corrélé. Il est en effet admis [5] que pour bien modéliser les phénomènes de handoff, il est nécessaire d'utiliser un simulateur où les trafics à l'intérieur des cellules sont dépendants.

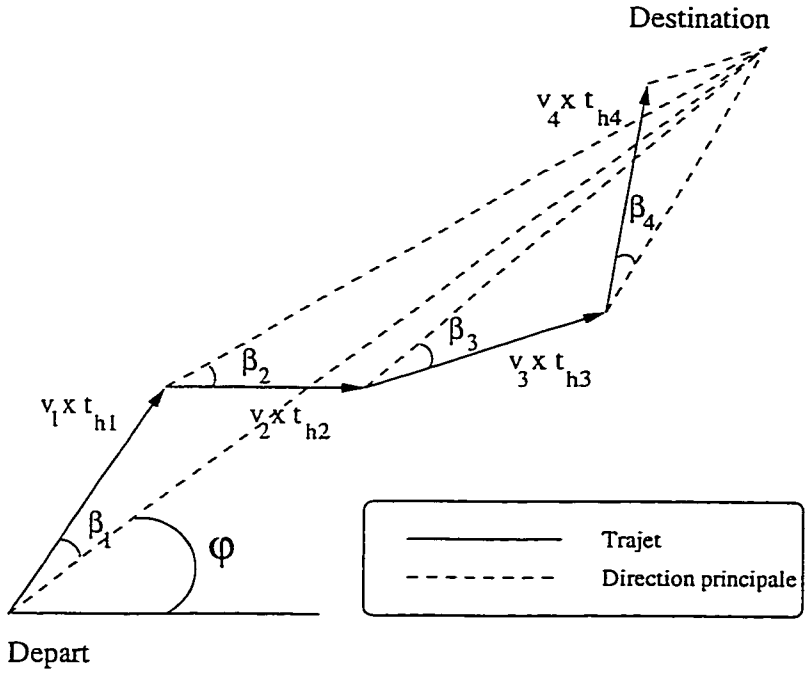


Figure 1.4 Illustration de la marche aléatoire

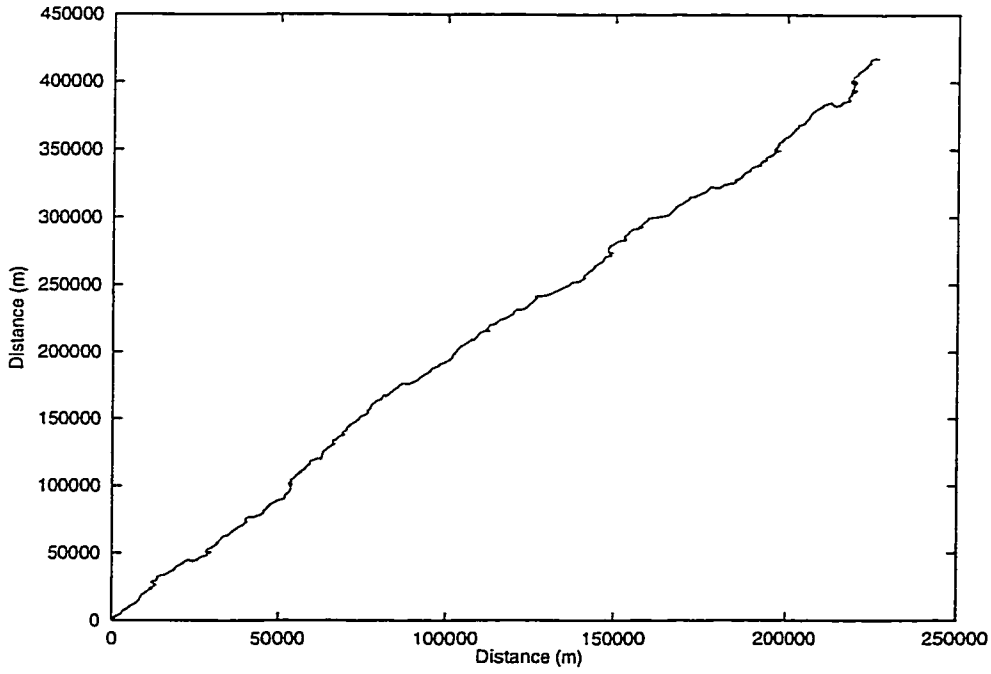


Figure 1.5 Simulation de la marche aléatoire - 5000 événements

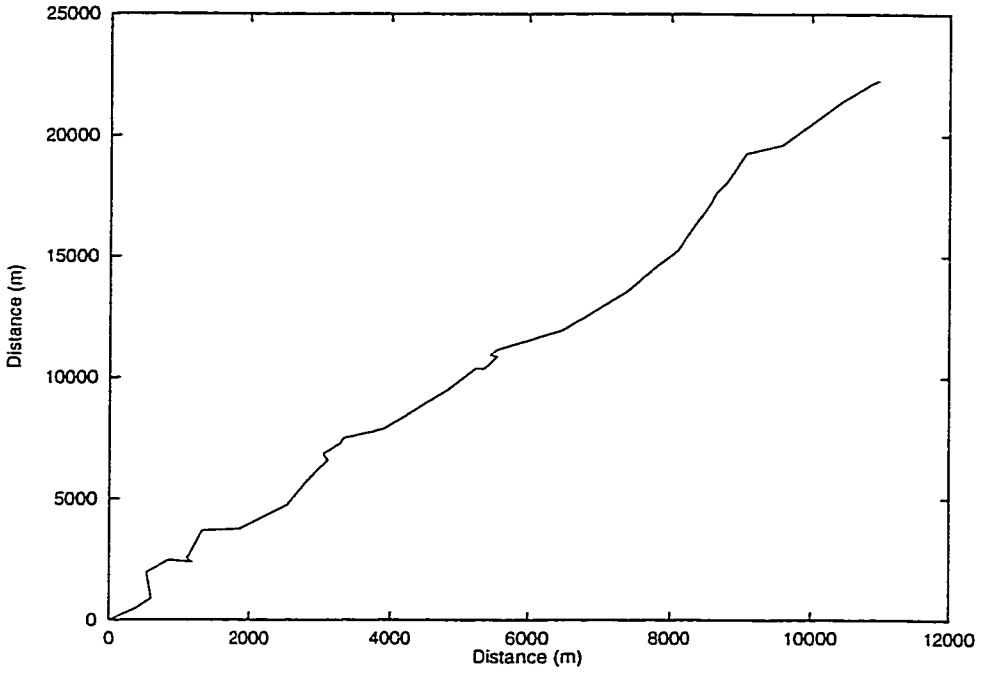


Figure 1.6 Simulation de la marche aléatoire - 40 événements

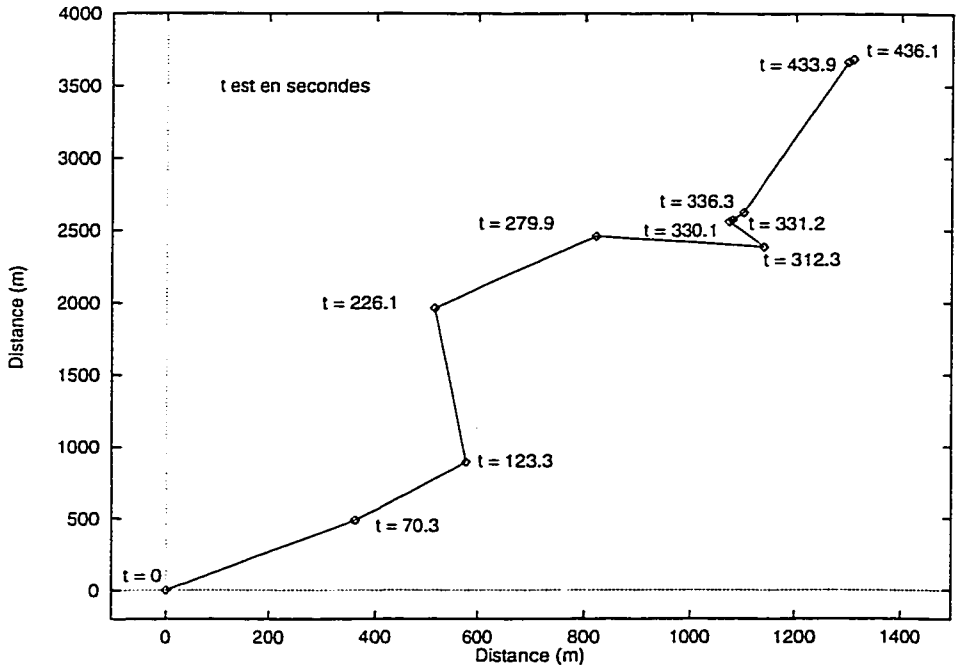


Figure 1.7 Simulation de la marche aléatoire - 10 événements

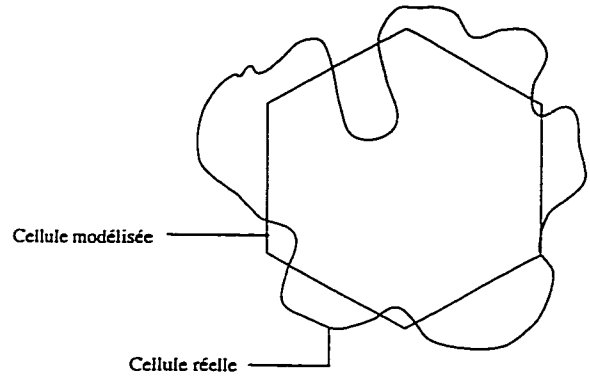


Figure 1.8 La modélisation d'une cellule

1.5.4 Le réseau

1.5.4.1 La modélisation d'une cellule

La zone desservie par une station de base est, idéalement, un cercle, si l'on suppose des antennes omnidirectionnelles. Mais la réalité est toute autre: certains phénomènes de propagation et d'ombrage dus à la topographie des lieux font que la forme d'une cellule n'est pas très précise, ainsi que le montre la figure 1.8. Toutefois, il faut trouver un modèle de cellule qui permette de recouvrir le plan en entier. Ainsi que le mentionnent Cox et Reudink dans [8], il existe seulement trois modèles géométriques de cellule qui permettent de recouvrir le plan en entier sans recoupement: on peut prendre des cellules soit triangulaires, soit carrées, soit hexagonales.

Démonstration: Prenons un polygône à n côtés, ainsi qu'indiqué à la figure 1.9. Alors on a:

$$\alpha = \frac{2 * \pi}{n}$$
$$\frac{\beta}{2} = \frac{\pi - \alpha}{2}$$

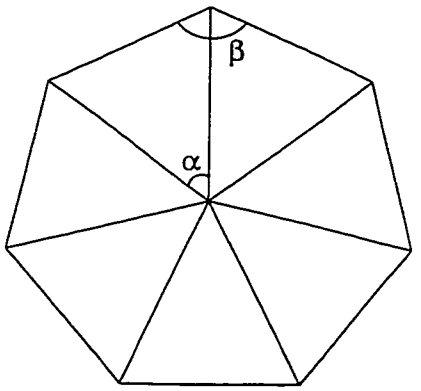


Figure 1.9 Polygône à n côtés, $n = 7$

Soit encore:

$$\beta = \pi - \frac{2 * \pi}{n} \tag{1.4}$$

Or, la condition de recouvrement total du plan est:

$$\exists\, k \in \mathbb{N} \quad tq \quad k * \beta = 2 * \pi \tag{1.5}$$

Il résulte donc des équations précédentes qu'il faut chercher les couples d'entiers naturels (n, k) tels que:

$$k * \pi - \frac{2 * k * \pi}{n} = 2 * \pi \tag{1.6}$$

C'est-à-dire:

$$k = \frac{2 * n}{n - 2} \tag{1.7}$$

L'équation (1.7) n'admet bien sûr pas de solutions pour $n = 1$ et $n = 2$ qui n'ont aucune signification, ni physique puisqu'il n'existe pas de polygônes à 1 ou 2 côtés, ni mathématique, puisqu'alors, on aurait $k = -2$ et $k = \infty$ respectivement.

En revanche, pour n compris entre 3 et 6, on obtient les résultats donnés dans le tableau 1.4. Notons que le fait que le pentagone n'est pas une figure géométrique susceptible de recouvrir un plan entier est un résultat connu.

n	k	Polygône
3	6	Triangle
4	4	Carré
5	3.33	Impossible
6	3	Hexagone

Tableau 1.4 Valeurs de k pour n variant de 3 à 6

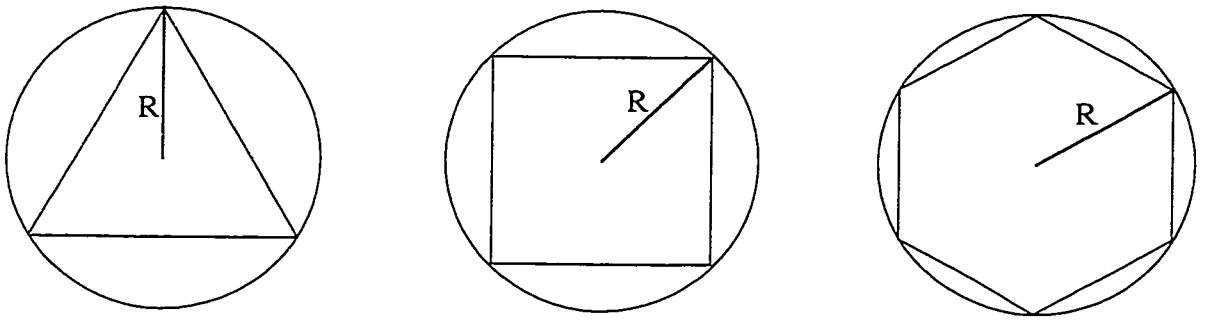


Figure 1.10 Les trois modèles de cellules les plus utilisés

Figure	Valeur exacte	Valeur approchée	$\frac{Surf(Figure)}{Surf(Cercle)}$
Cercle	$\pi * R^2$	$3.14 * R^2$	1
Triangle	$3 * R^2 * \sqrt{3}/4$	$1.30 * R^2$	0.413
Carré	$2 * R^2$	$2 * R^2$	0.637
Hexagone	$3 * R^2 * \sqrt{3}/4$	$2.60 * R^2$	0.827

Tableau 1.5 Surfaces exactes et approchées des différents modèles de cellules

Pour $n \geq 7$, il suffit de remarquer que $lim_{n-\infty} k = 2^+$, et que pour $n = 7$, on a $k = 2.8$. On a donc:

$$\forall n \geq 7\,, \quad 2 < k < 3 \tag{1.8}$$

ce qui est incompatible avec le fait que k soit dans $\mathbb{N}$.

□

Le choix le plus courant est celui des cellules hexagonales, adopté ici. Notons par ailleurs que ce modèle est celui dont la surface de la cellule modélisée est la plus proche du cercle circonscrit (Tableau 1.5). On note R le rayon de la cellule, qui correspond au rayon du cercle circonscrit à l'hexagone. Nous avons pris pour les simulations un rayon de 1 km.

1.5.4.2 Facteur et patron de ré-utilisation des fréquences

Pour optimiser un réseau cellulaire, il est évident que les opérateurs cherchent à optimiser l'utilisation du spectre disponible. C'est pourquoi le facteur de ré-utilisation des fréquences est défini par:

$$N = \frac{D}{R} \tag{1.9}$$

où D est la distance entre deux cellules utilisant les mêmes fréquences et R le rayon d'une cellule.

Le simulateur utilise normalement le patron de ré-utilisation le plus couramment utilisé (figures 1.11 et 1.12); alors, $N = \sqrt{21}$. Nous verrons, à la section 2.6.4, les modalités d'utilisation d'autres patrons dans le cadre du simulateur.

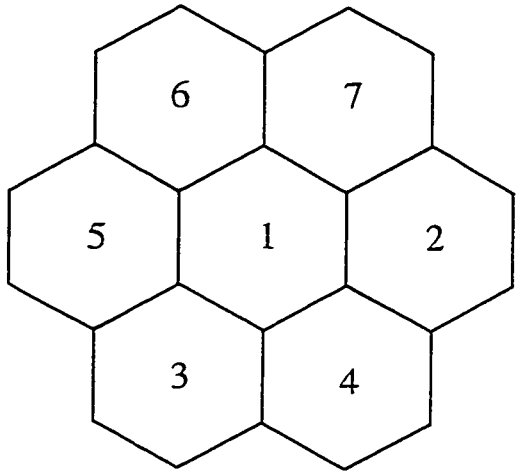


Figure 1.11 Le patron de ré-utilisation de Bell

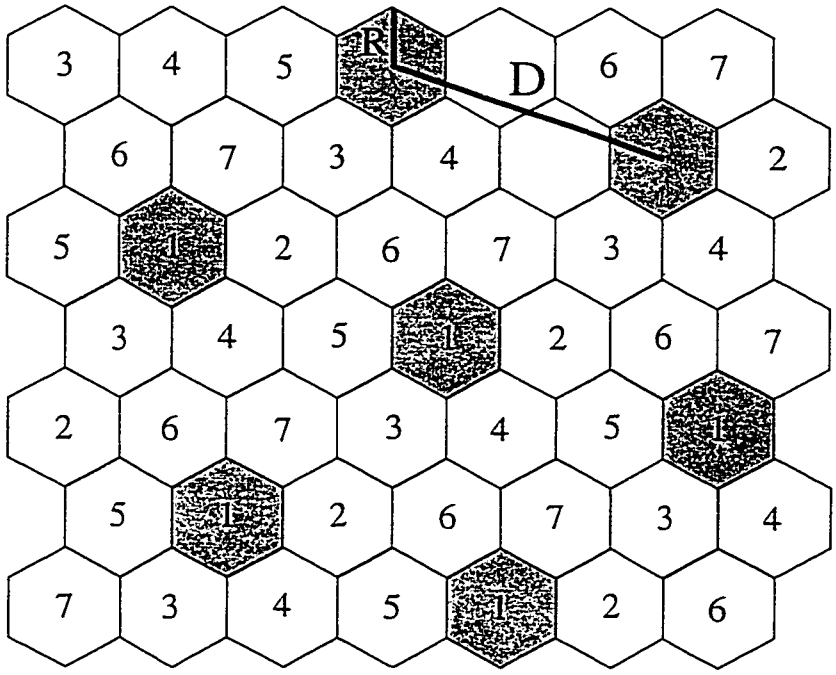


Figure 1.12 Le patron de ré-utilisation de Bell à l'intérieur du réseau

1.5.4.3 Un réseau fermé sur lui-même

Pour simuler un réseau d'envergure tout en restant réaliste, nous avons considéré un réseau de 49 cellules comme il est montré à la figure 1.13. Le problème qui se pose alors est celui d'approximer un réseau très grand en diminuant les effets de bords. En effet, les cellules qui sont au bord sont susceptibles tout autant que les autres d'avoir à considérer des mobiles qui sortent de tous les côtés. Cela entraîne des sorties du plan qui sont artificielles. De plus, ces effets de bord se font sentir non seulement sur les cellules extérieures, mais également, bien que de façon réduite, sur les cellules intérieures.

Dans le cas d'un réseau uniformément chargé, cela importe peu, car il suffit de prendre les données statistiques dans une cellule centrale. En revanche, dans le cas d'un réseau déséquilibré en charge, cela n'est plus possible puisque chaque cellule est différente.

Pour compenser les sorties du plan, il a fallu fermer le réseau sur lui-même, un peu comme un tore, tout en faisant attention par ailleurs de respecter les contraintes dues à la ré-utilisation de fréquences. C'est pour cette raison que lorsqu'un mobile sort du réseau par une cellule du haut (ou du bas) du plan, il réintègre le réseau par une cellule du bas (resp. du haut) qui n'est pas exactement en ligne dans le plan d'origine. La réalisation de cette fermeture a été rendue possible par le biais des cellules 'fictives' du réseau représentées en pointillé à la figure 1.13.

Par exemple, comme indiqué à la figure 1.13, lorsqu'un mobile sort par la droite de la cellule 4, de patron numéro 5, il passe dans une cellule de patron numéro 3. Or une seule cellule de la rangée du haut correspond à ce patron, la cellule 43. D'où le bouclage en forme de tore indiqué.

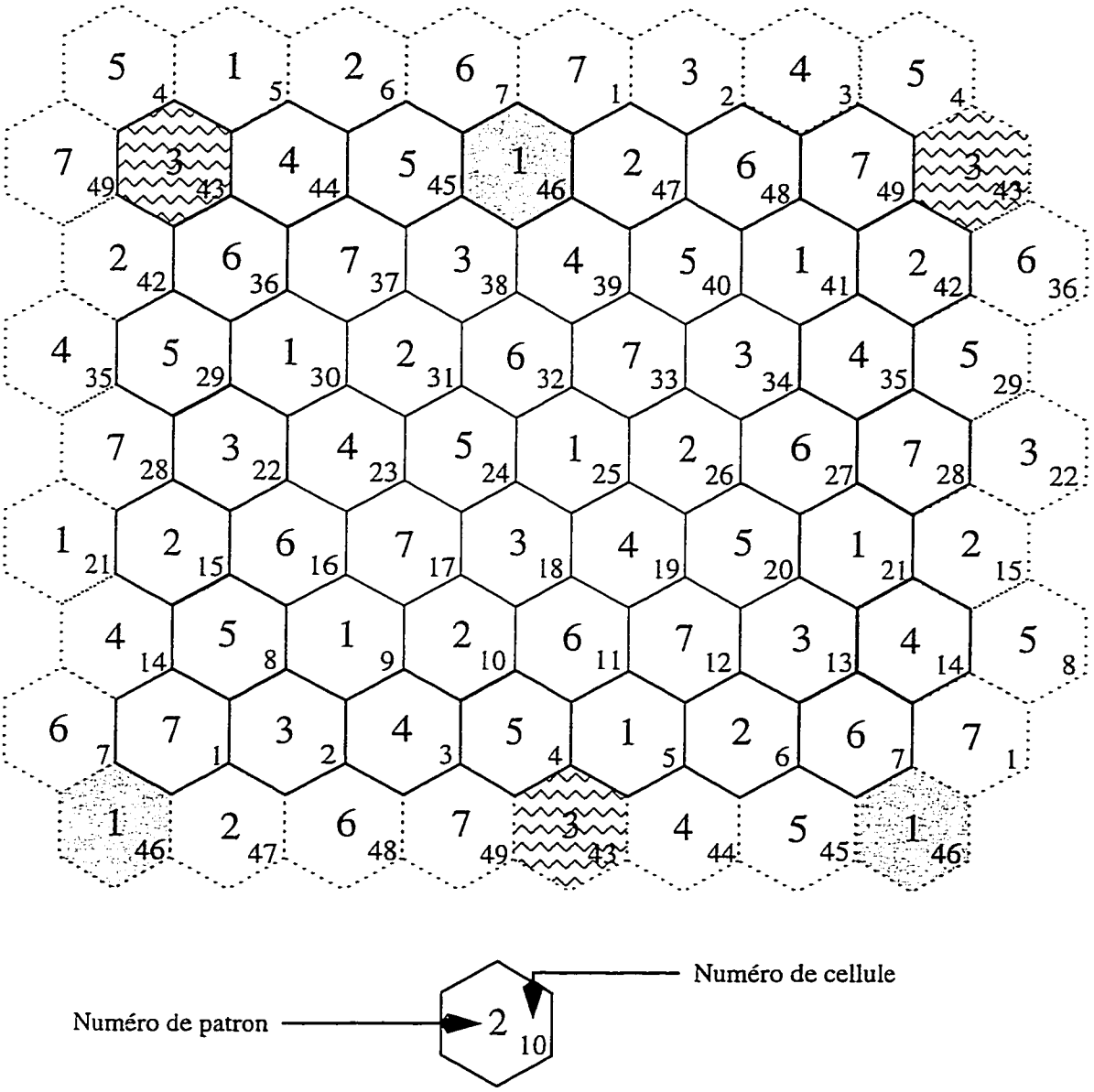


Figure 1.13 Réseau fermé

Nous verrons à la section 2.5.2 que le fait de ne pas boucler le réseau constituait une perturbation importante car environ 12% des appels étaient perdus par sorties du plan. Les modifications de bouclage du réseau sur lui-même permettent donc de modéliser un réseau approximativement infini, à partir d'un réseau fini.

Chapitre 2
Mise au point du simulateur

2.1 Introduction

Il existe plusieurs types de simulations, les deux principales étant la simulation par roulette et la simulation en temps réel.

La simulation par roulette utilisée par Chalimon dans le cas d'une simulation radiomobile 1D [5] observe uniquement les instants auxquels se produisent les événements. Dans ce type de simulation, l'échelle de temps n'est pas considérée. L'inconvénient majeur de ce type de simulation est que l'on ne peut pas modéliser précisément le processus de handoff, ni le mouvement réel des mobiles. On doit s'en tenir à des modèles de processus de naissance et de mort. Cependant, afin de rendre compte le plus parfaitement possible de la réalité, la modélisation du handoff est nécessaire.

Par opposition, la simulation en temps réel découpe le temps de simulation en intervalles de temps de même durée et observe l'ensemble des événements qui se produisent à l'intérieur de ces intervalles et le handoff devient alors modélisable à l'intérieur de ces fenêtres de temps. L'approche que nous avons suivie est en fait hybride entre ces deux types de simulations.

Notons par ailleurs que Pavlidou, dans [20] préfère utiliser un modèle fondé sur des diagrammes d'états pour modéliser le trafic en deux dimensions.

2.2 Simuler le temps

L'approche que nous avons suivie peut être considérée comme hybride en ce sens que nous ne regardons que les instants de naissance et de mort des mobiles, en tirant la date de ces événements comme dans un simulateur par roulette, et que nous considérons par ailleurs l'état du système à des intervalles de temps réguliers entre ces différents instants.

Les événements sont donc placés les uns à la suite des autres, dans une pile, selon l'ordre croissant des temps. La gestion de cette pile qui est classique est implantée sous forme de liste chaînée. N'importe quel élément de la pile, qui représente un événement de simulation à exécuter en temps voulu, peut être inséré ou enlevé. À tout instant, l'élément au sommet de la pile est celui qui est exécuté par le simulateur. Après son exécution, il est retiré de la pile et l'élément qui le suivait dans la pile se retrouve donc au sommet de la pile.

Rappelons les quatre types d'événements que l'on retrouve dans la simulation, empilés et dépilés par le simulateur:

- *naissance*
- *mort*
- *mise à jour des caractéristiques du mouvement du mobile*, ainsi qu'indiqué à la section 1.5.3.2 sur la marche aléatoire
- *mise à jour du réseau*

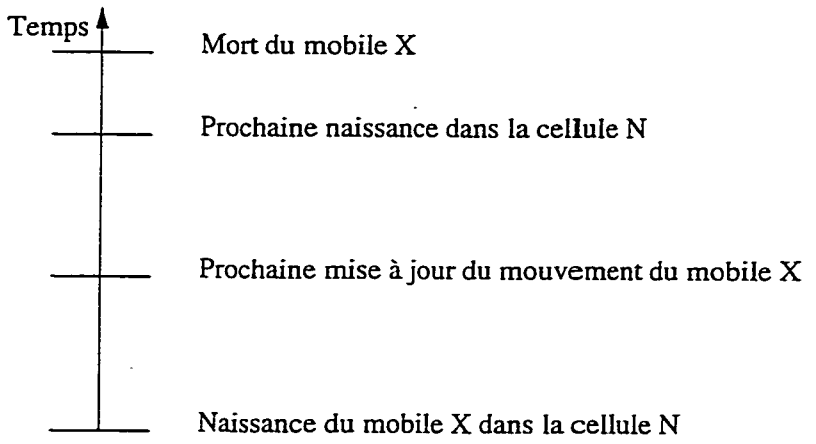


Figure 2.1 Insertion d'événements dans la pile d'événements lors d'une naissance

2.2.1 Naissance d'un mobile

À chaque exécution de l'événement 'naissance' d'un mobile, on vérifie s'il existe un canal libre dans la cellule où l'appel est initié, ainsi que dans les cellules voisines dans le cas d'une allocation dynamique de fréquences. Si oui, les initialisations sont faites, sinon l'appel est bloqué.

Comme les processus de mort et de mise à jour du mouvement du mobile, modélisé par la marche aléatoire, sont des processus connus, il est possible, dès la naissance d'un mobile de lui affecter aussi une date de mort ainsi que la date de la prochaine réactualisation de sa marche aléatoire. Ces deux événements sont alors insérés dans la pile définie précédemment, ainsi qu'indiqué à la figure 2.1.

Par ailleurs, comme le processus des naissances est également connu, à la fin de l'exécution de l'événement 'naissance', le prochain événement 'naissance' qui aura lieu dans la même cellule est tirée aléatoirement, comme dans une simulation par roulette, et cet événement est aussi inséré dans la pile.

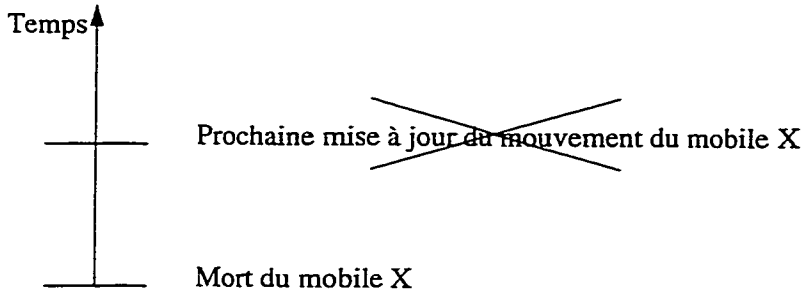


Figure 2.2 Retrait d'événements dans la pile d'événements lors d'une mort

2.2.2 Mort d'un mobile

Comme nous venons de le voir, la mort d'un mobile est préprogrammée. En effet, la durée moyenne d'un appel est connue ainsi que la loi statistique qui régit leur durée, ici exponentielle. Il suffit donc, lorsqu'un appel est terminé, de désactiver le canal alors occupé.

Cependant, au vu de la structure de la pile et de la gestion des événements, il faut détruire le prochain événement 'Mise à jour (des caractéristiques) du mouvement du mobile' qui était également préprogrammé, ainsi qu'indiqué à la figure 2.2.

2.2.3 Mise à jour des caractéristiques du mouvement du mobile

Cet événement est lui aussi programmé à l'avance. La première mise à jour est insérée dans la pile lors de la naissance et les suivantes sont auto-générées par la procédure de mise à jour.

Il se peut toutefois, lors de la mise à jour de la position du mobile, que ce dernier ait changé de cellule. La procédure de handoff traitée à la section 2.2.5, est alors mise en œuvre. Si elle échoue, i.e. l'appel est prématurément terminé, on retire le

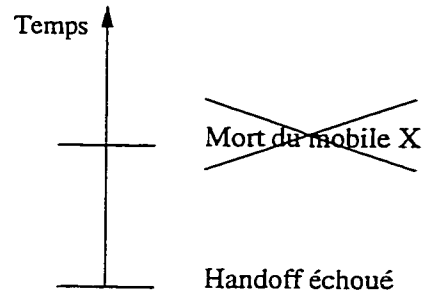


Figure 2.3 Retrait d'événements dans la pile d'événements lors d'un handoff échoué pendant la mise à jour du mouvement du mobile

mobile du réseau, en n'oubliant pas d'enlever de la pile l'événement 'Mort du mobile' puisque celui-ci est mort prématurément, ainsi qu'indiqué à la figure 2.3. Sinon, la prochaine mise à jour de la marche aléatoire est insérée dans la pile.

2.2.4 Mise à jour du réseau

Cet événement est le seul qui soit exécuté à des intervalles fixes du temps. Il permet une réactualisation de la position des mobiles. Pour rendre compte de façon réaliste de leur mouvement, il faut que cette mise à jour soit faite de façon régulière et à intervalles très peu espacés dans le temps. Dans les simulations, l'intervalle de temps a été pris égal à $1s$. Des simulations avec des intervalles de plus courte durée ont donné des résultats similaires. Donc, afin de garantir un temps de simulation raisonnable, nous réactualisons les données du réseau toutes les secondes.

Certes, il était possible de choisir une valeur plus grande pour ce paramètre. En effet, dans le pire des cas, le temps moyen d'inter-arrivées des appels dans chaque cellule est de $2.4s$, soit un taux moyen d'arrivée par cellule λ égal à .416667 mobiles par secondes. Il est donc important de réactualiser le réseau avant l'arrivée d'un nouveau mobile dans une cellule, en particulier dans le cas où tous les canaux seraient pris et

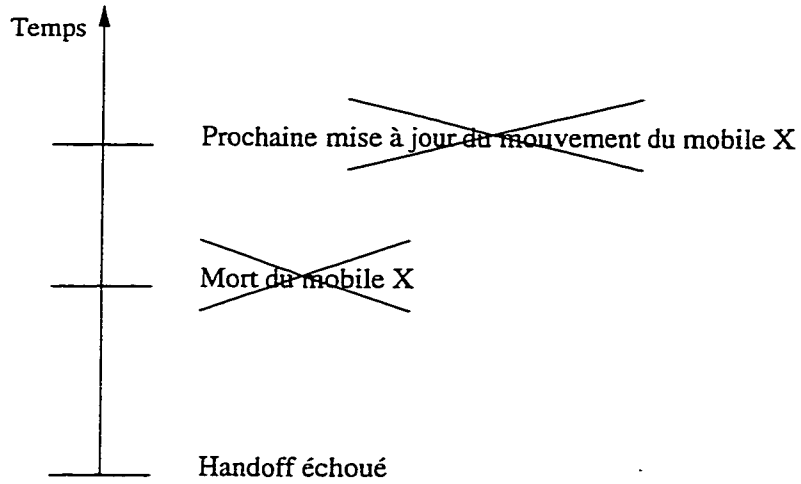


Figure 2.4 Retrait d'événements dans la pile d'événements lors d'un handoff échoué pendant la mise à jour du réseau

où un autre mobile sortirait de la cellule et libèrerait donc un canal. Il est donc vrai que le choix de $1s$ peut être considéré comme très conservateur, mais assure ainsi une bonne simulation, sans trop augmenter le temps que la machine utilise pour cette simulation.

Par ailleurs, tous les mobiles actifs sont concernés par cette procédure. En effet, les mobiles évoluant dans le réseau peuvent changer de cellule, et c'est principalement cette partie du mouvement qui nous intéresse. Si le mobile n'a pas changé de cellule, rien ne se passe.

En revanche, si le mobile a changé de cellule, la procédure de handoff est à nouveau mise en œuvre, et, de même que dans le cas précédent, si le handoff échoue, les événements 'Mort du mobile' et 'Mise à jour des caractéristiques du mouvement du mobile' sont enlevés de la pile, ainsi qu'indiqué à la figure 2.4.

2.2.5 Modélisation du handoff

Ainsi que mentionné précédemment, cette procédure peut-être appelée lors de la mise à jour soit du réseau au complet, soit de la marche aléatoire du mobile. Le simulateur permet, contrairement à la simulation par roulette, une modélisation réelle des phénomènes de handoff. Cette partie de la modélisation est la plus sensible à l'intervalle de temps entre deux réactualisations du réseau. En effet, si l'on attend trop après une mise à jour de la position des mobiles dans le réseau, ces derniers pourraient traverser deux cellules sans que le simulateur ne le remarque. Mais, avec $t = 1s$, il est certain que cela ne peut arriver puisque la vitesse maximale des mobiles est de $25m/s$ et le rayon des cellules est de $1km$.

2.2.6 Validité de l'utilisation de la pile d'événements

Une fois l'initialisation de la date des premières naissances terminée, soit une dans chaque cellule, tous les événements vont être créés et insérés dans la pile les uns à la suite des autres. Ainsi, il est certain que l'événement au sommet de la pile est bien toujours le premier événement qui dans la réalité va avoir lieu après celui qui vient de se terminer. Ceci fait donc gagner un temps précieux pour la simulation puisque 12 heures de temps réel sont simulées dans un temps variant de 1 minute à 4 heures environ selon les paramètres de charge du réseau et la valeur du nombre de canaux disponibles.

Le simulateur peut donc être considéré comme 'temps réel' puisqu'il permet de simuler les phénomènes de mouvement de façon précise et donc les phénomènes de handoff qui en résultent, tout en utilisant la simulation par roulette pour représenter la naissance et la mort des mobiles "actifs".

2.3 La répartition des mobiles dans le réseau

Ainsi qu'indiqué à la section 1.5.3.1, la répartition des mobiles a été choisie uniforme sur l'ensemble du réseau. D'autre part, un processus poissonien de paramètre λ est utilisé pour les naissances des appels; il se présentait alors les deux possibilités suivantes, selon le sens donné à la valeur de λ.

Soit λ est global (i.e. pour l'ensemble du réseau) et à chaque naissance, le mobile est placé uniformément sur l'ensemble du réseau. Cela veut dire que, puisque le réseau possède 49 cellules, chaque cellule a un taux d'arrivées de $\lambda/49$.

Soit λ est propre à chaque cellule (choix qui a été fait ici) et chaque cellule est gérée indépendemment des autres pour ses naissances. Chaque cellule possède donc un taux d'arrivées λ. À chaque naissance dans une cellule, le mobile est positionné dans la cellule selon une répartition uniforme. On traite donc 49 processus de naissance en parallèle. Ceci explique donc que dès la première initialisation, 49 événements sont insérés dans la pile d'événements

.

Cette méthode a été choisie car elle permet, en cas de charge non uniforme de déséquilibrer le réseau: si dans une région, il y a deux fois plus d'arrivées que dans une autre, il suffit de multiplier par 2 le λ de cette cellule. Il ne faut pas perdre de vue que pour de futures études ce simulateur doit pouvoir être utilisé dans un cadre plus général.

2.4 Le générateur de variables aléatoires

Le simulateur nécessite la génération d'un nombre important de variables aléatoires indépendantes. Pour exemple, citons le cas des mobiles. Chaque mobile génère 4 variables aléatoires indépendantes pour sa marche aléatoire. Pour certaines simulations, plus de 250000 mobiles sont générés; cela veut dire que plus d'un million de variables aléatoires *indépendantes* doivent alors être générées. Il fallait donc un générateur robuste.

Tout d'abord, il fallait trouver des semences indépendantes. Le moyen le plus simple consistait à prendre une date interne à l'ordinateur. Celui-ci peut fournir le temps écoulé en secondes depuis le 1er janvier 1970, avec une precision en microsecondes. Le nombre aléatoire retenu est égal à la durée en secondes multipliée par la precision en micro-secondes de cette durée et remultipliée par $19.72612051073 * 10^{-8}$ pour rester dans l'intervalle permis par le type *unsigned long* du langage C. Par exemple, le 1er novembre 1996, à 12h35mn4s,123456μs, il s'est écoulé depuis le 01/01/70 847067704 secondes et 123456μs. Alors le nombre aléatoire tiré est:

$$\lfloor (847067704 \times 123456 \times 19.72612051073 * 10^{-8} \rfloor .$$

Ensuite, pour être sûr que la génération de la variable aléatoire suivante soit bien différente, la machine tourne à vide pendant un temps aléatoire dépendant du tirage précédent. L'inconvénient de cette méthode est que cela prend environ entre une et trois secondes à chaque tirage. Nous imaginons rapidement ce que cela devient avec un million de variables aléatoires à générer... Il a donc fallu trouver une autre méthode.

Un générateur *à deux dimensions* ou *en deux temps*, ainsi qu'indiqué à la figure 2.5, a alors été mis au point.

$$
\begin{array}{rcccccccc}
seed_0 & = & SEED & & & & & & \\
seed_1 & = & x_1^0 & x_1^1 & x_1^2 & \cdots & x_1^n & \cdots \\
seed_2 & = & x_2^0 & x_2^1 & x_2^2 & \cdots & x_2^n & \cdots \\
\vdots & = & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots \\
seed_m & = & x_m^0 & x_m^1 & x_m^2 & \cdots & x_m^n & \cdots \\
\vdots & = & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots
\end{array}
$$

Figure 2.5 Le générateur *deux dimensions*

En réalité, deux générateurs ont été utilisés: un pour les semences, et un pour les variables aléatoires. Ces deux générateurs ont été soumis aux tests nécessaires à leur validité, dont le test nommé TESTRAND mentionné dans [12].

La première étape, à l'initialisation, consiste à tirer une semence que nous appelerons $SEED$ en fonction du temps écoulé depuis 1970, ainsi que décrit plus haut.

Cette semence va être la semence utilisée pour le générateur de semences. Ce dernier est défini par les relations suivantes:

$$seed_0 = SEED \tag{2.1}$$

$$seed_{m+1} = 69069 * seed_m + 1 \quad (mod\ 2^{32}) \tag{2.2}$$

À partir de chacune de ces semences, des variables aléatoires x_m uniformes dans [0,1] sont générées. Chaque variable aléatoire uniforme x_m est générée avec un deuxième générateur, indépendant du premier, et défini par les relations suivantes:

$$x_m^0 = seed_m \tag{2.3}$$

$$x_m^{n+1} = 764261123 * x_m^n \quad (mod\ 2^{31} - 1) \tag{2.4}$$

Des tests de validité sur la corrélation entre ces variables aléatoires x_m ont été réalisés. Le générateur tire 10000 valeurs pour 10 variables aléatoires indépendantes

Moyenne										
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
	0.499	0.498	0.500	0.507	0.501	0.498	0.503	0.504	0.501	0.504
Corrélation en %										
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
x_1	100	0.736	1.743	0.705	0.279	0.267	0.449	0.365	1.761	0.313
x_2	0.736	100	1.812	0.628	2.012	1.223	0.732	0.011	0.450	0.839
x_3	1.743	1.812	100	0.221	0.707	1.314	0.038	0.026	1.369	1.403
x_4	0.705	0.628	0.221	100	1.652	1.336	1.147	1.428	1.398	0.410
x_5	0.279	2.012	0.707	1.651	100	1.652	0.495	0.549	0.138	1.124
x_6	0.261	1.223	1.314	1.336	1.652	100	0.779	1.368	0.094	0.288
x_7	0.449	0.732	0.038	1.147	0.495	0.779	100	0.248	0.201	1.761
x_8	0.365	0.011	0.026	1.428	0.547	1.368	0.248	100	1.353	2.479
x_9	1.761	0.450	1.369	1.398	0.138	0.094	0.201	1.353	100	0.530
x_{10}	0.313	-0.839	1.403	0.410	1.124	0.288	1.761	2.479	0.530	100

Tableau 2.1 Résultats sur la moyenne et la corrélation entre 10 variables aléatoires uniformes indépendantes

selon le modèle décrit précedemment. Le tableau 2.1 rassemble ces résultats: la moyenne de ces variables aléatoires est indiquée, ainsi que la corrélation entre elles.

Ensuite, à partir de ces variables aléatoires uniformes dans [0,1], il est possible de générer toutes les variables aléatoires nécessaires au simulateur, ainsi qu'indiqué à l'Annexe A.

2.5 Validation du simulateur

Avant de pouvoir comparer les différentes affectations de fréquences, qu'elles soient fixes ou dynamiques, il fallait bien entendu valider le simulateur. Pour cela, nous nous sommes placés dans des conditions idéales où il n'y a pas de limitation sur le nombre de canaux disponibles.

Rappelons tout d'abord que pour la validation du simulateur, ρ représente le trafic offert:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \tag{2.5}$$

qui est également la charge en Erlang, puisqu'il est supposé qu'il n'y a pas de limitation quant au nombre de canaux disponibles.

Notons que l'équation 2.5, n'est rien d'autre que l'équation de Little [9] qui dit que le nombre moyen de clients dans un serveur est égal au débit des clients dans le système (λ), multiplié par le temps moyen qu'ils passent dans le système ($1/\mu$).

Par la suite, lors des simulations, la *charge du réseau* est définie par:

$$\rho^{\star} = \frac{\lambda}{N_c * \mu} \tag{2.6}$$

où N_c représente le nombre de canaux disponibles dans chaque cellule.

Il faut bien faire la distinction entre ρ et $\rho^{\star}$. En effet, ρ est le trafic offert en *Erlang*, alors que $\rho^{\star}$ est le rapport entre le trafic offert et le nombre de canaux disponibles dans la cellule et représente donc une charge en *pourcentage* du réseau.

2.5.1 Le régime transitoire

Tout d'abord, définissons deux termes:

- *Temps simulé*: Temps réel du réseau
- *Temps CPU*: Temps de CPU, mesuré par l'horloge interne de la machine, pour exécuter une simulation

Par exemple, la simulation de l'évolution d'un réseau radiomobile pendant une heure de temps simulé peut prendre dix minutes de temps CPU. Cela veut dire que l'observation de tous les événements qui se passeraient dans un réseau réel pendant une heure de temps s'effectue en dix minutes de temps machine.

En premier lieu, comme il est possible de le constater aux figures 2.6 à 2.7, dans le cas où $\rho = 25$, il existe un régime transitoire au début de toutes les simulations. Durant ce régime transitoire, tout relevé statistique fausserait les résultats finaux. Au vu de la figure 2.8, et afin d'assurer un intervalle de sécurité suffisant, les relevés statistiques débutent à partir du temps simulé $t = 900$ secondes (15mn). Par ailleurs la durée des simulations est de 43200 secondes (12 heures), ce qui fait un temps total de simulation de 44100 secondes (12h15mn) en comptant le temps laissé au régime transitoire. On appelera donc *temps utile de simulation* la durée de la simulation après le régime transitoire, égal à $43200s$ pour toutes les simulations présentées dans ce travail. Bien entendu, ces temps sont des temps spécifiques simulés, les temps réels de simulation pouvant varier entre 1 minute et 4 heures environ. Mais cela peut parfois être plus: en effet, comme les processus sont stochastiques, deux simulations ayant exactement les mêmes paramètres de simulation peuvent être exécutées en des temps différents

Cependant, et cela a été vérifié en faisant toute une série de simulations deux fois avec les mêmes paramètres, les résultats relatifs aux valeurs des paramètres statistiques sont les mêmes, ou presque. La différence, quand elle existe, est de l'ordre d'environ quelques centièmes de pourcents, car deux simulations peuvent difficilement être identiques en tout point quand il s'agit de processus stochastiques.

Afin que les lecteurs puissent se faire une idée sur les temps de simulation, des données relatives à ceux-ci sont rassemblés dans le tableau 2.2 .

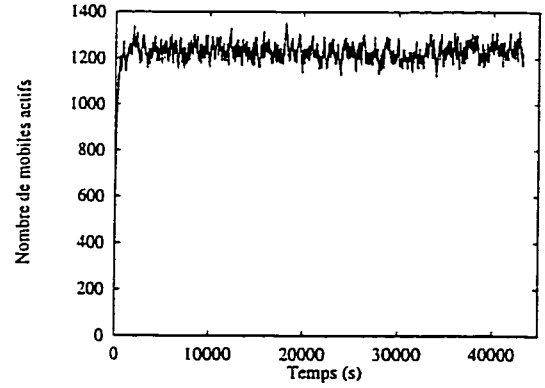


Figure 2.6 Nombre de mobiles actifs en fonction du temps, $\rho = 25$, $t \in [0 : 44100]$

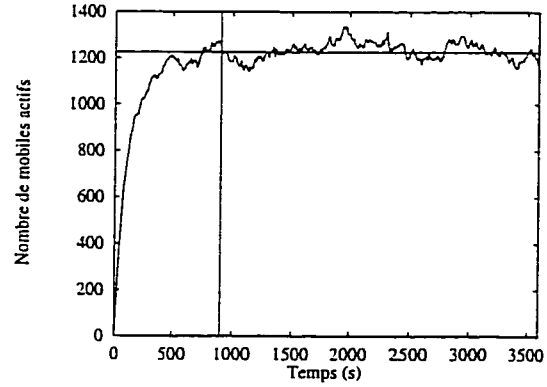


Figure 2.7 Nombre de mobiles actifs en fonction du temps, $\rho = 25$, $t \in [0 : 3600]$

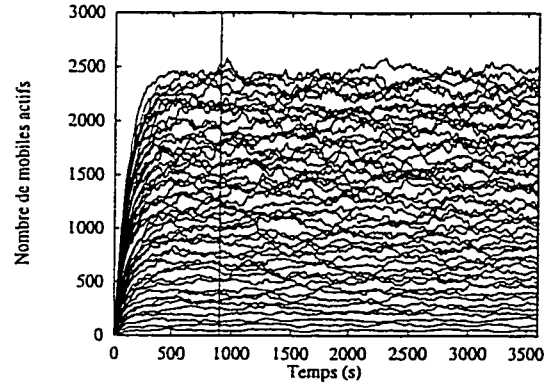


Figure 2.8 Analyse du regime transitoire, $\rho \in [1 : 50]$, $t \in [0 : 3600]$

Type d'assignation	Nombre de simulations	Temps CPU
Fixe	50*37 = 1850	97j 1h 22mn
Dynamique (1 à 3)	50*15*3 = 2250	79j 2h 35mn
Dynamique 3, 2è série	50*15 = 750	30j 7h 1mn
Fixe avec réservation pour le handoff	177*15 = 2655	117j 21h 7mn
Dynamique (1 à 3) avec réorganisation des canaux	50*15*3 = 2250	71j 1h 0mn

Tableau 2.2 Temps CPU des simulations

2.5.2 Le nombre de mobiles actifs dans le réseau et la fermeture du réseau

Ce paragraphe concerne la validation des processus de naissance et mort de mobiles ainsi que du mouvement. On rappelle que l'on s'est affranchi de toute contrainte due à la non disponibilité de canaux puisque les processus de naissance et de mort sont indépendants de la disponibilité des canaux. Une méthode pour rendre compte de cela est par exemple de ne pas faire intervenir les procédures d'allocation de fréquences et de seulement comptabiliser les mobiles qui sont dans les cellules.

Le nombre moyen théorique de mobiles est égal au trafic écoulé, exprimé en Erlangs. C'est donc la somme sur les cellules du trafic écoulé dans chaque cellule, alors égal au trafic offert ρ de cette cellule exprimé en Erlangs. Comme le réseau est uniformément chargé, le nombre moyen théorique de mobiles dans le réseau est égal au nombre de cellules multiplié par le trafic offert d'une cellule. Les figures 2.9 et 2.10 montrent bien la validité du comportement du simulateur sur ce point.

Notons que la différence en pourcentage est plus importante lorsque la valeur du trafic offert est plus faible. En effet, si le traffic offert est de 1 Erlang par cellule, il y a en moyenne 49 mobiles sur l'ensemble du réseau, alors que si le trafic offert est

de 50 Erlangs par cellule, le nombre moyen théorique de mobiles dans le réseau est 2450. Alors, une différence de quelques mobiles se fait plus ressentir dans le cas du trafic offert de l'ordre de quelques Erlangs.

Rappelons ici que le réseau a été bouclé afin de s'affranchir de la perte de communications par simples sorties du plan. Dans le cas d'un réseau linéaire à une dimension, qui est celui de D. Chalimon dans [5], cela importait moins car il n'y avait que deux cellules de sorties sur l'ensemble du réseau qui en comptait 24. Dans notre cas, la situation est plus dramatique puisqu'il y a 24 cellules qui bordent le réseau, sur un total de 49 cellules... Les figures 2.11 à 2.14 illustrent l'effet d'un réseau non fermé sur lui-même, vis à vis du nombre de sorties du plan par rapport au nombre total de communications engagées, et donc sur le nombre moyen de mobiles dans le réseau.

Plusieurs constatations s'imposent. Tout d'abord, le nombre de sorties, pour un temps utile de simulation de $43200s$, augmente linéairement avec le trafic offert ρ, ce qui est assez logique puisque le nombre de mobiles par cellule croît également linéairement avec ρ et que le nombre de cellules bordant le réseau est fixe. De même, le ratio R_{sc} du nombre de sorties sur le nombre total de communications débutées, en pourcentage est à peu près constant, ce qui est logique puisque le nombre de cellules en bordure de réseau ne change pas et que le trafic offert reste uniforme sur l'ensemble du réseau. Notons que:

$$R_{sc} = \frac{\text{Nombre de sorties}}{\text{Nombre de communications débutées}}$$

Ce qui revient à écrire:

$$R_{sc} = \frac{\text{Nombre de sorties}}{\text{Nombre de sorties} + \text{Nombre de communications terminées}}$$

En effet, aucune communication n'est perdue autrement que par sortie du plan, puisqu'il n'y a ici aucune limitation en canaux; aucun appel ne peut donc être ni bloqué ni achevé prématurément par un handoff échoué.

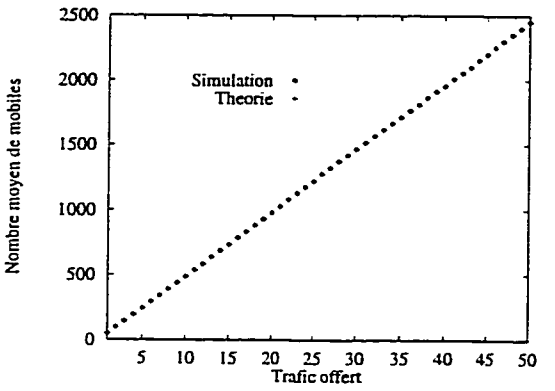


Figure 2.9 Nombre moyen de mobiles en fonction du trafic offert par cellule ρ en Erlangs, dans un réseau fermé

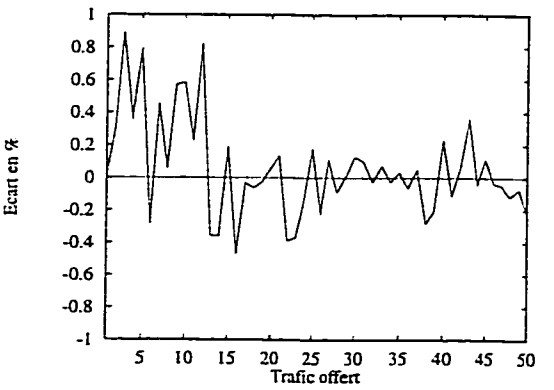


Figure 2.10 Écart à la théorie, en %, en fonction du trafic offert par cellule ρ en Erlangs, dans un réseau fermé

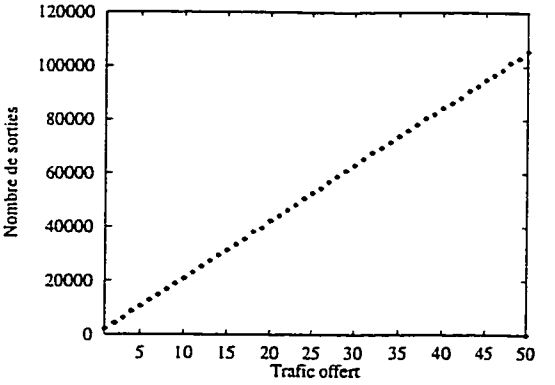


Figure 2.11 Nombre de sorties en fonction du trafic offert par cellule ρ en Erlangs, dans un réseau non fermé - Temps utile de simulation = 43200 s

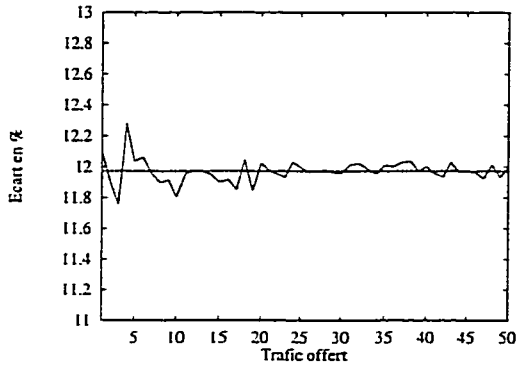


Figure 2.12 Pourcentage de sorties par rapport au nombre total de communications débutées en fonction du trafic offert par cellule ρ en Erlangs, dans un réseau non fermé - Temps utile de simulation = 43200 s

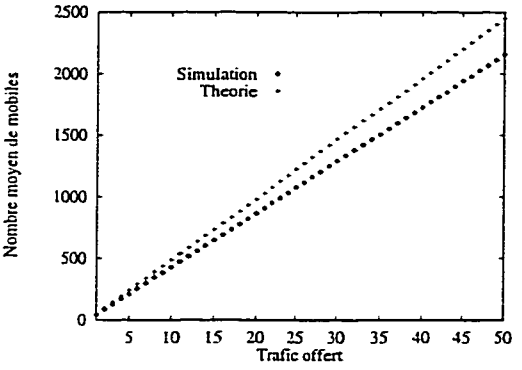


Figure 2.13 Nombre moyen de mobiles en fonction du trafic offert par cellule ρ en Erlangs, dans un réseau non fermé

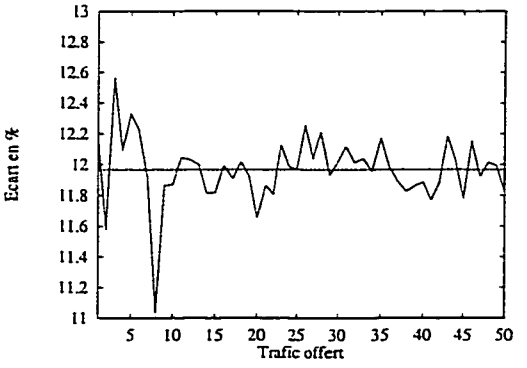


Figure 2.14 Ecart en % du nombre moyen de mobiles par rapport à un réseau fermé en fonction du trafic offert par cellule ρ en Erlangs, dans un réseau non fermé

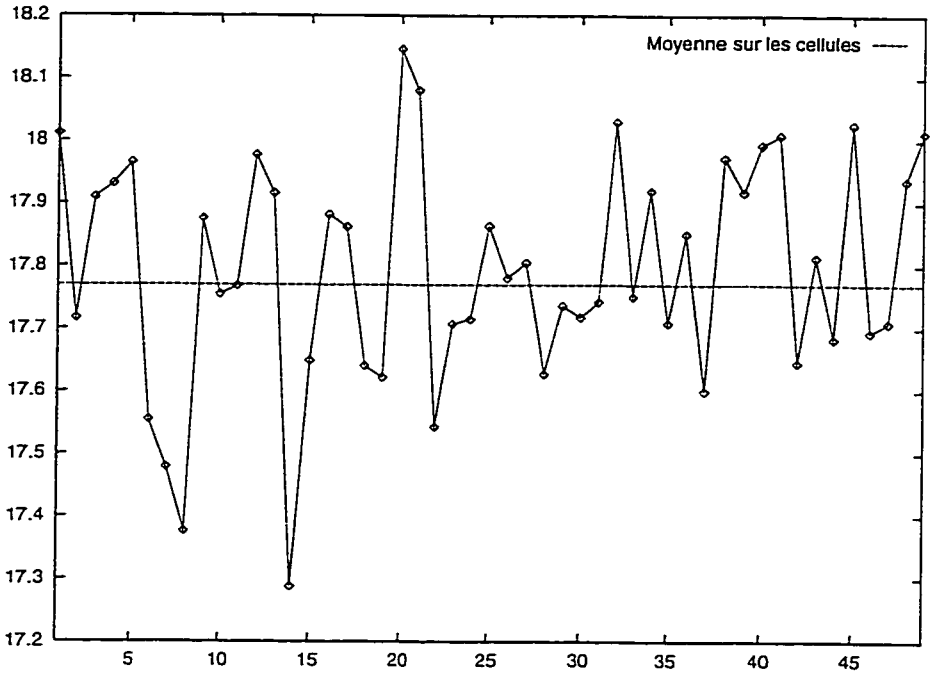


Figure 2.15 Nombre moyen de mobiles dans les cellules 1 à 49 et moyenne sur le réseau

2.5.3 Vérification de l'uniformité de répartition sur le réseau fermé

Il a ensuite fallu vérifier l'uniformité de répartition. La figure 2.15 illustre un exemple concret, pour une affectation fixe, avec une charge $\rho^* = 75\%$ et 25 canaux par cellule. Plusieurs remarques s'imposent à nouveau.

Tout d'abord, comme cela sera constaté à la section 3.4, l'affectation fixe entraîne une capacité plus faible que $25 \times 0.75 = 18.75$ mobiles par cellule en moyenne, puisqu'elle est de 17.78. Cependant, l'uniformité de répartition des mobiles sur l'ensemble des cellules est vérifiée comme l'indique la figure 2.15. L'écart en pourcentage varie entre -2.25% et +1.4%, ce qui est malgré tout raisonnable. Comme par ailleurs la répartition est uniforme dans la cellule, la répartition est valablement aussi uniforme sur l'ensemble du réseau.

De même, le nombre de communications dans chaque cellule est uniforme sur l'ensemble des cellules, mais ne correspond cependant pas à la moyenne des communications du réseau. En effet, vu le nombre de handoff, qui est de .75 en moyenne par mobile dans cette simulation, une communication a lieu dans plusieurs cellules, donc le nombre total des communications par cellule est plus grand que le nombre de communications réelles. Ces deux points seront à nouveau abordés dans le chapitre suivant aux sections 3.4.1 et 3.4.2.

2.6 Allocation des canaux

Quatre stratégies d'allocation des canaux ont été mises en œuvre sur ce simulateur: une stratégie d'allocation fixe et trois stratégies d'allocation dynamique. Par ailleurs, avec chacune de ces stratégies d'allocation, il est possible de réserver ou non des canaux pour le handoff, ce qui représente en réalité une possibilité de huit stratégies d'allocation de fréquences.

Plus spécifiquement, les stratégies suivantes, qui seront développées par la suite, ont été considérées:

- allocation *fixe sans réservation* de canaux pour le handoff
- allocation *fixe avec réservation* de canaux pour le handoff
- allocation *dynamique sans réservation* de canaux pour le handoff

Remarquons que les allocations dynamiques avec réservation de canaux pour le handoff n'ont pas été traitées en détails, car les premiers résultats obtenus étaient similaires à ceux de l'allocation fixe. Il est cependant évident que les résultats seront

bien sûr meilleurs que ceux des allocations dynamiques sans réservation de canaux pour le handoff.

Avant de détailler les quatre types d'allocation (fixe et dynamiques), il apparaît important d'expliquer le principe de la réservation de canaux pour le handoff.

2.6.1 Réservation de canaux pour le handoff

Le but d'un opérateur radiomobile est de desservir un maximum de clients, et donc ce service doit être efficace. Le critère utilisé est la probabilité qu'un usager ne puisse être servi, ce qui peut arriver de deux façons: soit à l'initiation d'un appel lorsqu'il n'y a plus de canaux de disponibles et que l'appel est alors bloqué; soit en cours de communication et lors d'un processus de handoff qui échoue et termine prématurément l'appel. Il est évident que l'opérateur doit tenter de privilégier les appels déjà en cours par rapport aux appels entrant afin de donner une qualité de service qui soit perçue comme meilleure.

Pour cela, il peut réserver certains canaux pour le handoff. Il doit ensuite faire un compromis afin de ne pas accroître de manière drastique la probabilité de blocage d'un appel en privilégiant trop les appels déjà en cours. En effet, ceci aurait pour conséquence de réduire le nombre total d'usagers que l'on pourrait servir, ainsi que cela est expliqué à la section 3.5.

Cette politique de réservation a donc été appliquée aux différentes allocations de fréquences choisies .

Numéro de ellule	1	2	3	4	5	6	7
Numéro de canal	1	2	3	4	5	6	7
	8	9	10	11	12	13	14
	15	16	17	18	19	20	21

Tableau 2.3 Exemple d'allocation fixe de canaux pour un patron de 7 cellules et 21 canaux disponibles

2.6.2 Allocation fixe de fréquences - Patron de sept cellules

Cette affectation classique correspond à celle utilisée par Bell Laboratories dès 1979 avec la norme AMPS [17]. On se fixe un patron répétitif de 7 cellules où les cellules sont numérotées de 1 à 7, ainsi qu'indiqué à la figure 1.11. Ensuite, le spectre de fréquences est découpé en sept parties comme suit: les fréquences sont tout d'abord numérotées de 1 à N et tous les canaux numérotés j sont affectés à la cellule i du patron si:

$$j \equiv i \pmod 7. \tag{2.7}$$

Après avoir réparti ces canaux parmi les sept cellules, la même affectation est répétée sur l'ensemble du réseau puisque le patron de sept cellules se répète lui aussi comme l'indiquent la figure 1.13 et le tableau 2.3.

Notons que dans certains cas, d'autres patrons peuvent être utilisés. Par exemple, un patron de 4 cellules peut être utilisé en zone urbaine dense et un patron de 9 cellules en campagne.

Rappelons qu'ici le terme *canal* désigne toujours un canal bilatéral qui comprend un canal radio pour la liaison montante *mobile-base* et un autre pour la liaison descendante *base-mobile* (duplex fréquentiel).

2.6.3 Allocation dynamique de fréquences

Le principe de l'allocation dynamique est de permettre à un plus grand nombre d'usagers d'accéder en même temps au réseau. Trois stratégies d'allocation dynamique ont été testées avec le simulateur. La différence essentielle entre celles-ci se situe essentiellement au niveau de l'ensemble des cellules où l'on cherche à emprunter des canaux.

La première stratégie comme indiqué à la figure 2.17 consiste à chercher dans la cellule la plus proche du mobile s'il existe ou non un canal radiomobile libre. Pour savoir quelle est la cellule la plus proche, il suffit de diviser la cellule où se trouve le mobile en six et de regarder dans quel secteur le mobile est localisé. Alors, la cellule la plus proche est la cellule adjacente à la cellule du mobile via ce secteur, comme l'indique la figure 2.16.

Dans la deuxième stratégie, la recherche se fait dans les trois cellules les plus proches de l'usager, dans l'ordre indiqué à la figure 2.18. Enfin, la troisième stratégie consiste à chercher dans l'anneau complet des six cellules voisines de celle où se trouve le mobile, toujours selon l'ordre indiqué à la figure 2.19.

Rappelons qu'ici les 'frontières' délimitant le handoff sont physiques et non pas 'floues' et fonction du rapport signal-à-bruit instantané. Notons également que pour chacune de ces différentes stratégies, les canaux réservés au handoff ne sont jamais considérés pour l'allocation dynamique.

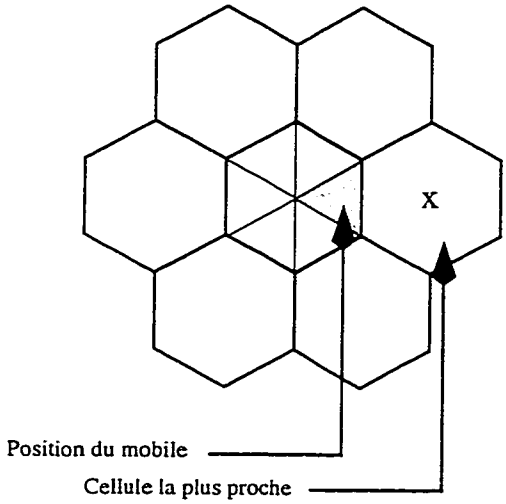


Figure 2.16 Détermination de la cellule voisine la plus proche du mobile

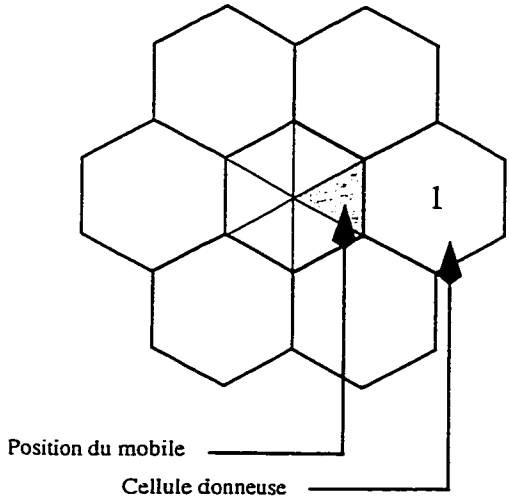


Figure 2.17 Allocation dynamique - Stratégie 1

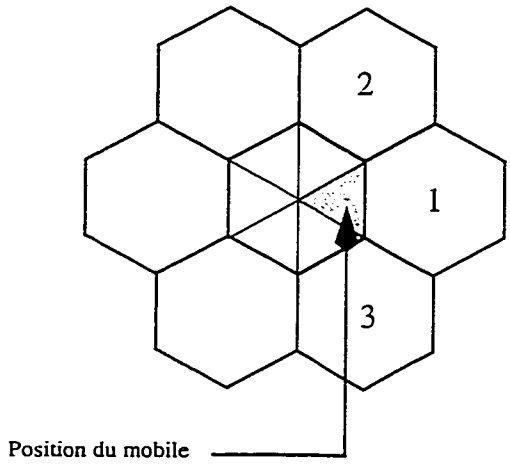


Figure 2.18 Allocation dynamique - Stratégie 2

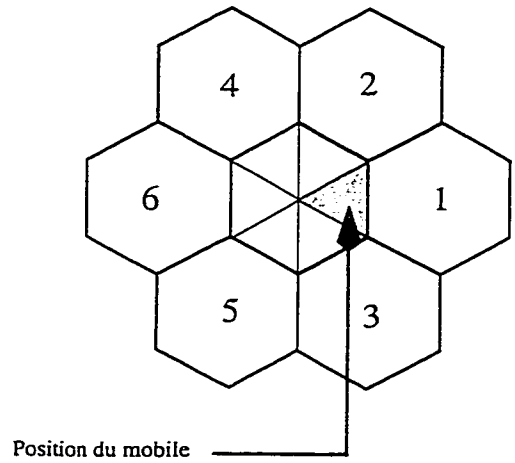


Figure 2.19 Allocation dynamique - Stratégie 3

2.6.4 Le complexe cellulaire

Nous avons déjà décrit le complexe cellulaire dans le paragraphe 1.5.4.3. Il y a été vu que lorsque le réseau est fermé sur lui-même cela permet de simuler un réseau infini. Finalement, si le réseau semble infini, le nombre de cellules modélisées importe moins, tant que l'on garde uniforme le trafic offert ρ. En revanche, si ρ n'est pas uniforme, un plus grand nombre de cellules permet une plus grande diversité pour le déséquilibre du réseau. Nous pouvons aussi ajuster les dimensions du réseau selon le patron de ré-utilisation choisi. En effet, pour un patron de ré-utilisation comportant 7 cellules, il fallait faire des ajustements sur notre réseau de 49 cellules (7×7) et faire une fermeture 'torique' pour que tout mobile sortant du complexe cellulaire de base réentre dans ce même complexe par une cellule ayant le bon numéro de patron.

Si un patron de ré-utilisation ne comportant seulement que 4 cellules était utilisé, il serait possible de ne prendre que 16 cellules pour modéliser le réseau, comme indiqué à la figure 2.20. Dans ce cas précis, il serait même possible de réduire le réseau aux 4 cellules concernées, comme les 4 cellules grisées à la figure 2.20, puisque ces 4 cellules sont suffisantes pour fermer le réseau sur lui-même.

Par ailleurs avec un patron de 8 cellules, comme celui décrit à la figure 2.21, il faudrait utiliser le réseau décrit à la figure 2.23. Ces modifications peuvent se faire simplement sur le simulateur puisque les modules de création de réseau (i.e. les contours physiques des cellules), d'allocation de patron de ré-utilisation et d'allocation fixe initiale des canaux aux cellules, sont indépendants. La seule condition à respecter en général est bien sûr que le patron de ré-utilisation puissent couvrir le plan en entier. Par exemple, pour le cas d'un patron de 8 cellules, il est possible d'utiliser le patron spécifique de la figure 2.21, mais d'autres patrons pourraient ne pas convenir.

Il faut également remarquer que la taille totale du réseau dépend de la taille du patron de ré-utilisation. Par exemple, la figure 2.22 décrit un réseau 7×7 qui ne peut pas être bouclé pour un patron de 8 cellules tel que celui de la figure 2.21. En effet, les cellules de raccordement sont identiques horizontalement et verticalement. C'est pour cela qu'il faut rajouter une ligne et une colonne au réseau pour pouvoir le boucler. Dans le cas de ce patron de 8 cellules, il faut donc un réseau 8×8, comme indiqué à la figure 2.23.

Un réseau 4×4 aurait également convenu pour ce patron de 8 cellules; en effet, on peut remarquer l'équivalence des cellules 1 et 5, ainsi que les cellules 1 et 33, 4 et 36, 25 et 29. Ceci pourrait être intéressant dans le cas d'un réseau uniformément chargé, puisque les simulations auraient été moins lourdes avec 16 cellules au lieu de 64. En revanche, dans le cas d'un réseau déséquilibré, la marge de manœuvre aurait été moins grande puisqu'il est possible d'agir seulement sur 16 cellules au lieu de 64.

2.6.5 Caracteristiques des mobiles

Ainsi qu'expliqué dans le chapitre précédent, les caractéristiques des mobiles ont été fixées en fonction des études de Lam [13]. Il faut cependant remarquer que les résultats spécifiques sont non seulement fonction de la vitesse des mobiles, mais également de la taille des cellules.

En effet, réduire la taille des cellules revient à augmenter de façon relative la vitesse des mobiles, et réciproquement. Le choix de cellules de rayon $R = 1km$ (micro-cellules) et de mobiles ayant une vitesse moyenne de $\overline{v} = 35km/h$ a été éclairé par de nombreuses études précédentes sur la mobilité des usagers d'un réseau cellulaire, dont celle de Lam [13] et Chalimon [5].

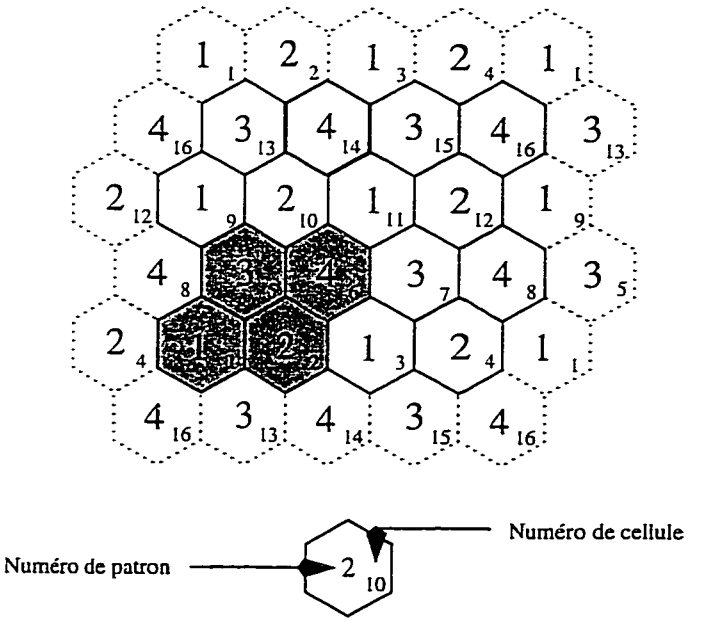


Figure 2.20 Réseau fermé de 16 cellules pour un patron de 4 cellules

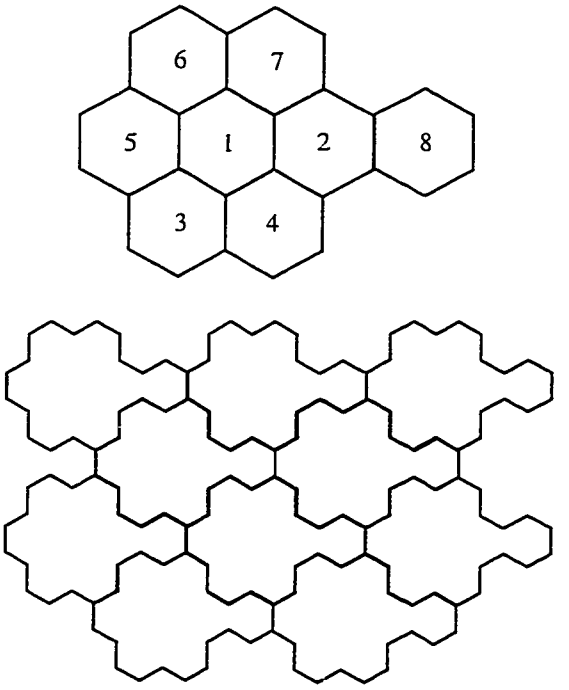


Figure 2.21 Patron de 8 cellules pouvant recouvrir le plan

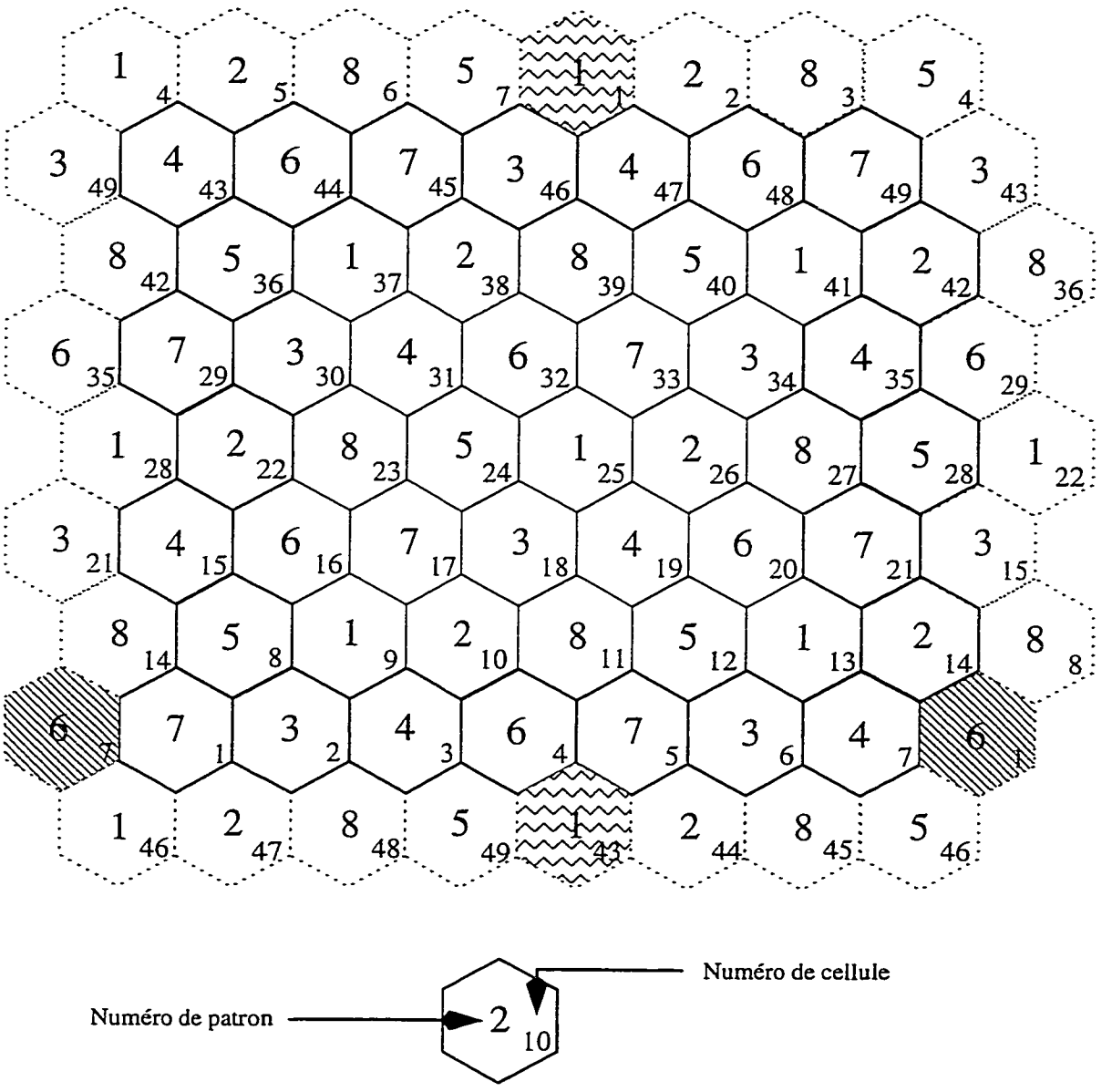


Figure 2.22 Réseau fermé de 49 cellules pour un patron de 8 cellules

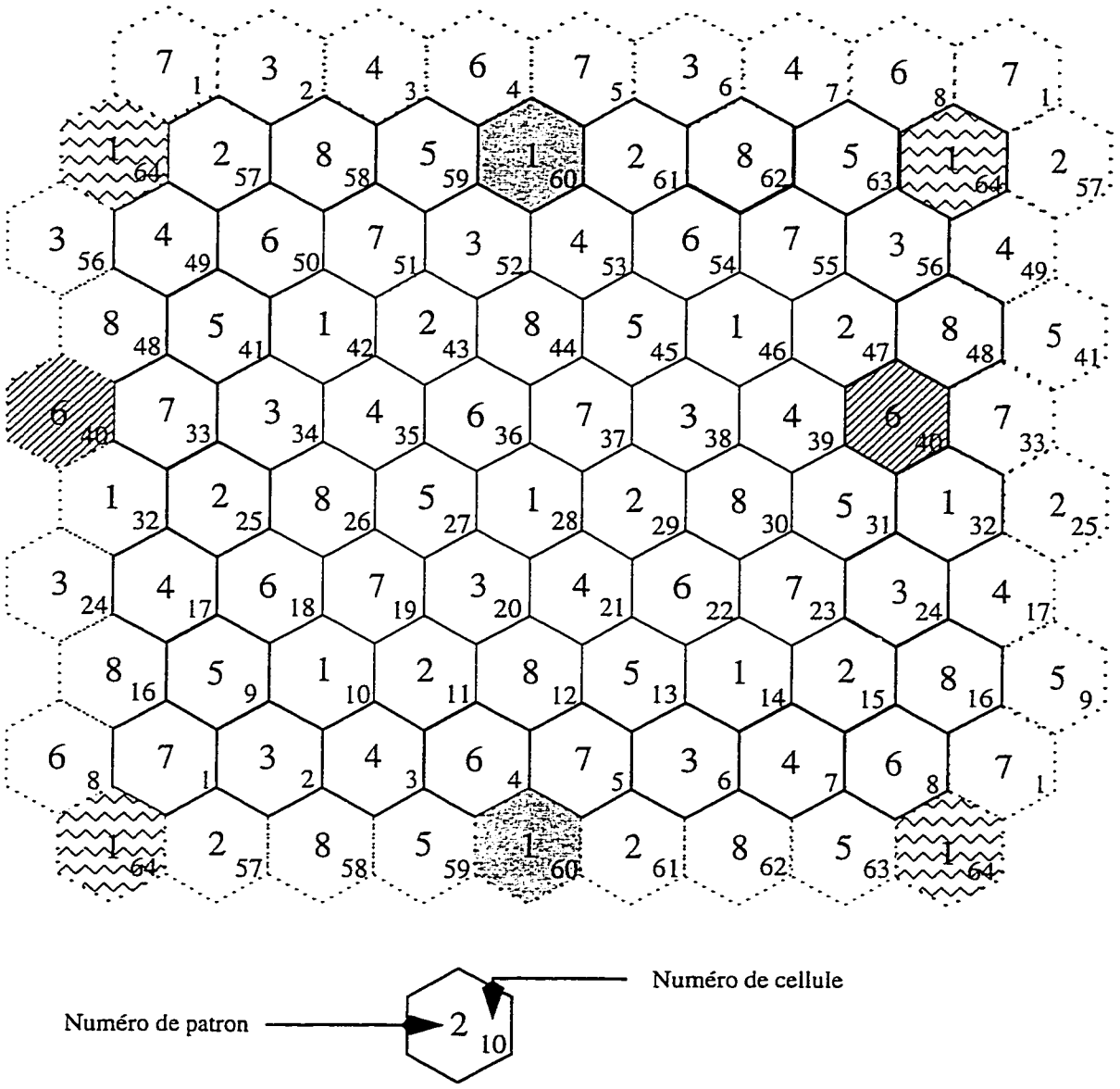


Figure 2.23 Réseau fermé de 64 cellules pour un patron de 8 cellules

Chapitre 3
Discussion des résultats obtenus

3.1 Introduction

Nous avons considéré au chapitre précédent différents points se rapportant à la mise au point du simulateur. Subséquemment, un grand nombre de simulations sous diverses conditions ont été effectuées et nous ont fourni des résultats que nous présentons dans ce chapitre.

Nous étudierons donc tout d'abord les probabilités de blocage, de perte et de non-service relatives à chaque procédure d'affectation de fréquences. Ensuite, une étude de l'impact de ces procédures sur le trafic écoulé dans le réseau et la durée moyenne des communications sera présentée. Rappelons ici que le trafic écoulé représente le nombre moyen de canaux radiomobiles occupés simultanément, i.e. le nombre moyen de mobiles actifs simultanément. Par ailleurs, nous regarderons diverses statistiques liées à la durée d'une communication à l'intérieur d'une cellule, i.e. le temps que passe un mobile dans une cellule. Enfin, nous essayerons également de relier entre eux les paramètres tels que le nombre moyen de handoffs par mobile, le nombre de communications par cellule ainsi que le nombre d'appels initiés dans chaque cellule.

Par ailleurs, une étude rapide de l'impact des diverses allocations dynamiques sur les probabilités de blocage, le trafic écoulé ainsi que le nombre de canaux nécessaires par cellule sera présentée.

3.2 Notations

Dans ce chapitre, nous utiliserons quelques notations complémentaires utiles dans l'interprétation des résultats graphiques.

Nc	$=$	N_c	$=$	nombre de canaux disponibles par cellule
Nch	$=$	N_{ch}	$=$	nombre de canaux réservés au handoff par cellule
rau	$=$	ρ	$=$	trafic offert en Erlang (par cellule)
rau*	$=$	ρ^*	$=$	charge du réseau en pourcentage $(= \rho/N_c)$

3.3 Les diverses probabilités de blocage

Rappelons tout d'abord quelles sont les définitions de ces différentes probabilités de blocage. La probabilité de blocage P_b a été définie à la section 1.2 comme étant la probabilité qu'une tentative d'appel échoue. Par ailleurs, la probabilité de perte P_i est la probabilité qu'un appel initialisé ne puisse être achevé, à la suite d'un handoff échoué. Cet événement pourrait également arriver par la simple perte de la liaison radio entre le mobile et la base. Cependant ce phénomène n'a pas été modélisé car il est plus rare. Enfin, la probabilité de non-service P_{ns} est la probabilité qu'un usager ne puisse être servi correctement, c'est-à-dire, soit que l'appel est bloqué au début, soit qu'un handoff échoue. Alors, on a bien:

$$P_{ns} = P_b + (1 - P_b)\, P_i \tag{3.1}$$

Notons que l'expression *des probabilités de blocage* comprend l'ensemble des trois probabilités P_b, P_d et P_{ns} énumérées précédemment.

Suivant les priorités que l'opérateur se donne, la qualité de service sera donnée par l'une des trois probabilités, ou éventuellement le couplage de deux. Par exemple,

s'il veut privilégier l'arrivée des nouveaux appels, la probabilité de blocage sera le facteur clé du choix du nombre de canaux pour obtenir une probabilité suffisante. En revanche, s'il désire donner la priorité aux communications déjà établies, ce qui est plus conforme à la réalité, il utilisera la probabilité de perte comme référence.

3.4 L'affectation fixe de fréquence, sans réservation pour le handoff

Les figures 3.1 à 3.3 représentent, en trois dimensions[1], les diverses probabilités de blocage en fonction du nombre de canaux disponibles N_c et de la charge ρ^* du réseau. Rappelons ici que $\rho^* = \frac{\lambda}{N_c \times \mu}$. À la simple lecture de ces trois graphiques il est aisé de constater que les différentes probabilités de blocage diminuent lorsque le nombre de canaux disponibles croît ou bien lorsque la charge ρ^* décroît. Ces deux résultats sont bien sûr tout à fait prévisibles puisque si le rapport entre le nombre moyen de mobiles potentiellement actifs et le nombre de canaux diminue, alors ces mobiles ont plus de chances de voir leur tentative d'appel aboutir.

Les figures 3.4 à 3.6 représentent des coupes à ρ^* fixé des figures 3.1 à 3.3. Sur ces trois coupes sont indiquées les diverses probabilités de blocage; par ailleurs, la ligne horizontale représente une probabilité de 2%. Il est donc aisé de constater que pour une charge ρ^* égale à 100%, il n'est pas possible, avec une affectation fixe de fréquence, de répondre aux besoins d'un opérateur qui voudrait une probabilité de non service de 2% avec moins de 50 canaux.

[1] Pourquoi avoir utilisé des figures en trois dimensions? Il a semblé plus parlant de montrer directement sur une seule figure la double influence de N_c et de ρ^*, plutôt que de montrer séparément un grand nombre de courbes se ressemblant toutes plus ou moins. Nous ferons de même à chaque fois que la présentation en trois dimensions sera plus adéquate pour visualiser les résultats.

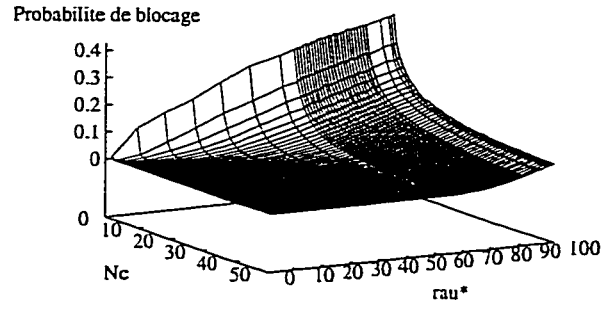


Figure 3.1 Allocation fixe - Probabilité de blocage en fonction de N_c et ρ^*

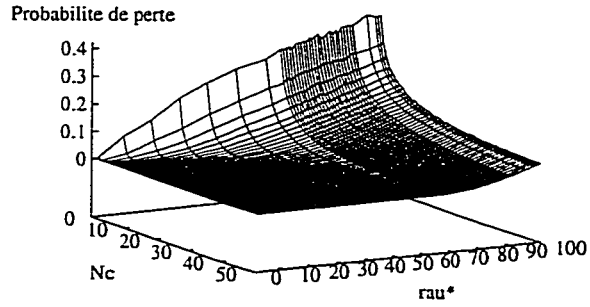


Figure 3.2 Allocation fixe - Probabilité de perte en fonction de N_c et ρ^*

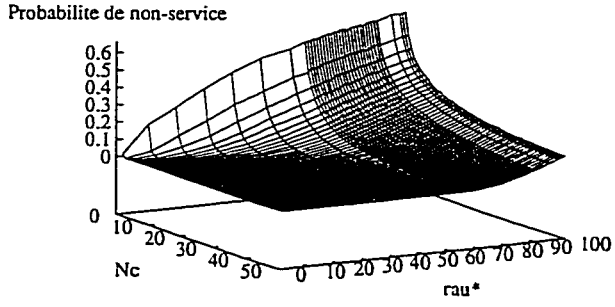


Figure 3.3 Allocation fixe - Probabilité de non-service en fonction de N_c et ρ^*

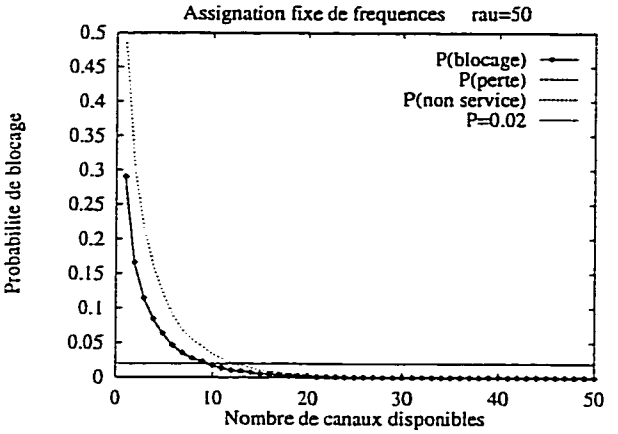


Figure 3.4 Allocation fixe - Probabilités de blocage en fonction de N_c - $\rho^* = 50\%$

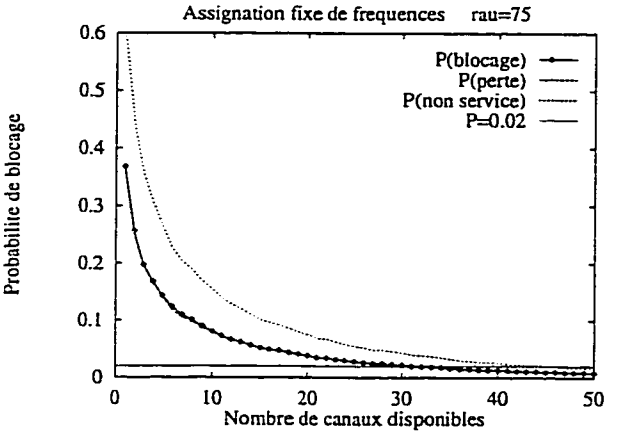


Figure 3.5 Allocation fixe - Probabilités de blocage en fonction de N_c - $\rho^* = 75\%$

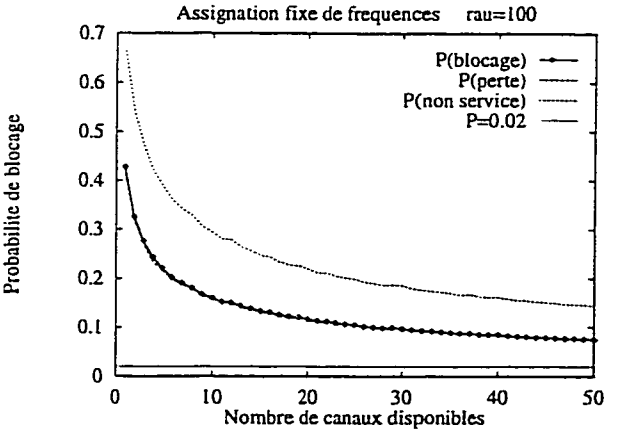


Figure 3.6 Allocation fixe - Probabilités de blocage en fonction de N_c - $\rho^* = 100\%$

Par ailleurs, le nombre de canaux nécessaires pour obtenir une certaine probabilité de blocage, de perte ou de non service augmente avec ρ^*. Nous reviendrons sur ce point à la section 3.7 et aux figures 3.34 à 3.38.

De plus, les probabilités de blocage et de perte semblent avoir le même comportement en fonction de N_c et ρ^*. Ceci serait un argument de plus pour confirmer l'hypothèse couramment faite sur la modélisation du handoff [5] par un processus de naissance de Poisson, comme des nouveaux appels, mais avec une autre valeur pour la moyenne des inter-arrivées, bien que le simulateur présenté modélise le handoff de façon directe, par le mouvement des mobiles.

Regardons maintenant quelques autres statistiques découlant de ces simulations.

3.4.1 La durée moyenne d'une communication

La figure 3.7 montre que la durée moyenne d'une communication est relativement constante en fonction des paramètres. Toutefois, la valeur diminue dans deux cas: soit lorsque la charge augmente trop, soit lorsque le nombre de canaux diminue. Ce résultat était prévisible, puisque dans ces deux cas, la probabilité de perte augmente considérablement, comme l'indique la figure 3.2. C'est ainsi qu'un nombre plus élevé de mobiles ne peuvent terminer les communications engagées ce qui entraîne la diminution de la durée moyenne d'une communication. La valeur moyenne sur l'ensemble des simulations est de $114.39s$.

La durée moyenne d'une communication représente aussi la durée moyenne du temps que les usagers passent en activité dans le réseau, soit encore la durée d'une communication *par mobile*. Cependant, si on se réfère à la figure 3.8, le nombre moyen de

handoffs par mobile est relativement élevé, puisque chaque mobile subit en moyenne 0.72 handoff par communication.

Il s'ensuit qu'un nombre non négligeable de mobiles ne terminent pas les communications dans la cellule où ils les ont initiées. Cette remarque nous amène à introduire un nouveau paramètre statistique, i.e. la durée moyenne d'une communication *par cellule* qui peut être aussi interprétée comme la durée moyenne du temps que les mobiles actifs passent dans une cellule. Les résultats sont présentés à la figure 3.9.

En comparant les figures 3.8 et 3.9, on s'aperçoit que les valeurs des paramètres fléchissent avec ρ^* croissant ou un nombre décroissant de canaux disponibles, et ce encore à cause du nombre croissant de handoffs échoués.

La durée moyenne d'une communication par cellule est de l'ordre de 67 secondes, ce qui est à peu près la moitié de la durée moyenne d'une communication par mobile. Cela confirme le fait qu'un nombre non négligeable d'appels ne se terminent pas dans la cellule où ils avaient commencés et rejoint la constatation faite avec le nombre moyen de handoffs par mobile.

3.4.2 Rapport entre le nombre moyen de communications par cellule et le nombre d'appels initiés par cellule

On définit ici une *communication par cellule* comme étant le fait qu'un mobile utilise les ressources de la station de base. Par exemple, un mobile qui subit un handoff, et donc traverse deux cellules, aura effectué deux *communications par cellule*, une dans chaque cellule traversée. Chacune de ces cellule se verra donc ajouter une *communication par cellule* supplémentaire après le passage du mobile.

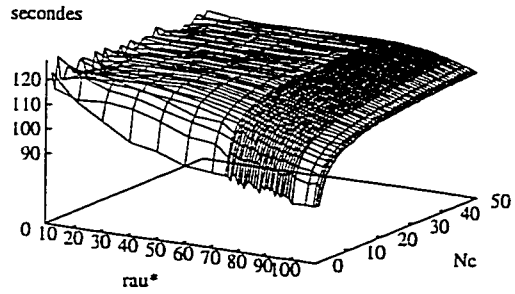


Figure 3.7 Allocation fixe - Durée moyenne d'une communication par mobile en fonction de N_c et ρ^*

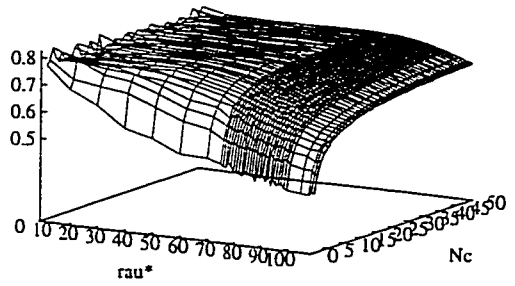


Figure 3.8 Allocation fixe - Nombre moyen de handoffs par mobile en fonction de N_c et ρ^*

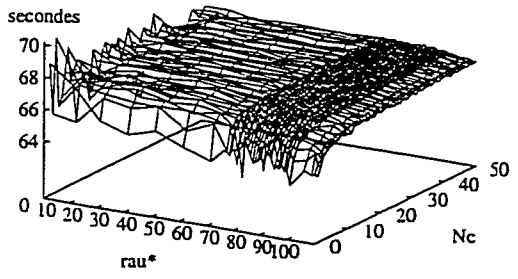


Figure 3.9 Allocation fixe - Durée moyenne d'une communication par cellule en fonction de N_c et ρ^*

Il semble alors intéressant de chercher le rapport entre le nombre de communications par cellule et le nombre d'appels initiés dans cette cellule, défini par:

$$R_{ca} = \frac{\text{Nombre total de communications par cellule}}{\text{Nombre d'appels initiés par cellule}}$$
$$= \frac{\text{Nombre total de communications par cellule}}{\text{Nombre de tentatives d'appels par cellule} - \text{Nombre d'appels bloqués par cellule}}$$

La figure 3.10 indique l'évolution de ce rapport en fonction de ρ^* et du nombre de canaux disponibles. Ce rapport est de l'ordre de 1.71, ainsi que précisé au tableau 3.1, et comme de raison, il diminue, toujours pour les mêmes raisons, avec ρ^* croissant et un nombre de canaux décroissant.

3.4.3 Le nombre moyen de mobiles

Ainsi que le montre la figure 3.11, les résultats précédents sont corroborés par ceux qui concernent le nombre moyen de mobiles dans le réseau. En effet, plus la charge ρ^* augmente, plus le nombre de mobiles s'écarte de la valeur maximale théorique, correspondant à un nombre infini de canaux, et qui a été simulée lors de la validation initiale du simulateur. De même, cet écart en pourcentage par rapport à la théorie croît lorsque le nombre de canaux diminue. À nouveau, ce résultat n'est pas surprenant et découle du simple bon sens.

3.4.4 Le nombre moyen de handoffs

Ainsi que constaté à la figure 3.12, près de la moitié des communications vont aboutir ou sont issues d'un handoff. Une fois de plus, cela montre l'importance des handoffs dans un réseau cellulaire et donc la nécessité d'utiliser un modèle qui tienne compte de la dépendance des cellules entre elles.

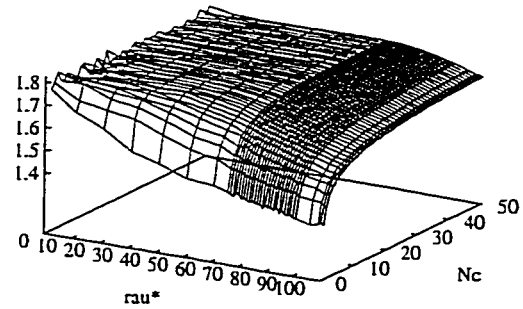


Figure 3.10 Allocation fixe - Rapport entre le nombre de communications par cellules et le nombre d'appels initiés par cellule en fonction de N_c et ρ^*

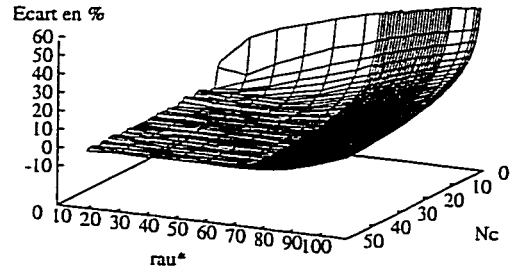


Figure 3.11 Allocation fixe - Nombre moyen de mobiles en fonction de N_c et ρ^*: écart en % par rapport à la valeur pour $N_c = \infty$

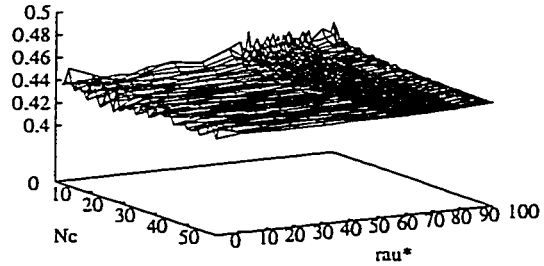


Figure 3.12 Allocation fixe - Rapport du nombre de handoffs par cellule sur le nombre de communications par cellule en fonction de N_c et ρ^*

3.4.5 Corrélation entre les paramètres précédents

Intuitivement, il est raisonnable de penser que le rapport entre le nombre de communications par cellule et le nombre d'appels initiés par cellule est corrélé avec la durée moyenne d'une communication par cellule, ainsi que le nombre de handoffs par mobile. C'est pourquoi un test de corrélation a été mis en œuvre afin d'infirmer ou de confirmer cette hypothèse. Il devient alors aisé de constater la très forte corrélation entre ces paramètres.

Au tableau 3.1, trois séries de valeurs ont été étudiées: celles pour les simulations pour lesquelles ρ^* variait de 1 à 100, celles pour lesquelles $\rho^* \geq 50$, ce qui supprime 5 simulations pour $\rho^* = (1, 10, 20, 30, 40)$, et enfin celles pour lesquelles $\rho^* = 75$.

On constate que, si l'on retire les simulations pour lesquelles le trafic est faible, et donc pour lesquelles la moindre petite variation du nombre de mobiles dans l'absolu devient plus grande dans le relatif, alors, la corrélation entre ces variables est plus forte, ce qui confirme une fois de plus le lien étroit entre le nombre de handoffs par mobiles et le temps que passe un mobile dans une cellule.

Enfin, à ρ^* fixé, ici $\rho^* = 75$, la corrélation entre les variables est indéniable. Cela prouve donc bien que la durée moyenne d'une communication par cellule est reliée au nombre moyen de handoffs par mobile. Notons cependant que ces deux paramètres sont également liés à la taille des cellules et la vitesse moyenne des mobiles. En effet, si les cellules étaient plus grandes ou si la vitesse moyenne des mobiles était plus faible, les mobiles mettraient en moyenne plus de temps à traverser une cellule. Ils subiraient donc moins de handoffs, et conséquemment la durée moyenne d'une communication par cellule serait plus grande.

$\rho^* = 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 65, 66, \ldots, 89, 90, 95, 98, 99, 100$

	V_1	V_2	V_3
Moyenne			
	1.71456158	67.12151658	0.72077841
Corrélation en %			
V_1	1.00000000	0.91835704	0.99979837
V_2	0.91835704	1.00000000	0.92079676
V_3	0.99979837	0.92079676	1.00000000

$\rho^* = 50, 60, 65, 66, \ldots, 89, 90, 95, 98, 99, 100$

	V_1	V_2	V_3
Moyenne			
	1.70930834	67.09473477	0.71620516
Corrélation en %			
V_1	1.00000000	0.96012280	0.99981033
V_2	0.96012280	1.00000000	0.96202052
V_3	0.99981033	0.96202052	1.00000000

$\rho^* = 75$

	V_1	V_2	V_3
Moyenne			
	1.71959344	67.15784856	0.72538900
Corrélation en %			
V_1	1.00000000	0.97714371	0.99996509
V_2	0.97714371	1.00000000	0.97781084
V_3	0.99996509	0.97781084	1.00000000

où: $V_1 = \dfrac{\text{Nombre de communications par cellule}}{\text{Nombre d'appels par cellule}}$

V_2 = Durée moyenne d'une communication par cellule (s)

V_3 = Nombre moyen de handoffs par mobile

Tableau 3.1 Allocation fixe de fréquences: corrélation entre plusieurs variables statistiques

De même, le rapport R_{ca} du nombre de communications par cellule sur le nombre d'appels par cellule est étroitement lié aux paramètres précédents: si un mobile subit moins de handoffs, il reste plus longtemps dans la même cellule. En particulier, les mobiles ne subissant aucun handoff restent dans la même cellule durant toute leur communication. Plus le nombre de mobiles ne subissant aucun handoff sera grand, plus le rapport R_{ca} tendra vers 1 et plus la durée moyenne d'une communication par cellule tendra vers la durée d'une communication par mobile.

3.4.6 La modélisation du handoff

Il est suggéré [5] que le handoff pouvait être modélisé par un processus de Poisson. Avec cette modélisation, les résultats présentés précédemment sont un indice pour la valeur à prendre pour le taux moyen d'inter-arrivées liées au handoff. Cette valeur serait donc étroitement liée à la taille des cellules et la vitesse des mobiles. Avec les valeurs des paramètres qui ont été utilisées, la durée moyenne d'une communication est de l'ordre de $67s$ et chaque mobile subit environ 0.72 handoff en moyenne. Cela veut également dire qu'environ trois mobiles sur quatre subissent un handoff en moyenne.

Faisons une première approximation, en disant qu'un mobile subit au plus un handoff. En effet, la probabilité d'en subir plus d'un est assez faible: les cellules ont un rayon de $1km$, les mobiles ont une vitesse maximale de $25m/s$, et la durée moyenne d'une communication est d'environ $120s$, donc un mobile parcourt en moyenne $3000m$ pendant une communication, ce qui est moins que deux diamètres de cellule. Avec cette hypothèse, notons x la durée moyenne en secondes d'une communication commencée dans une cellule. La durée de la fin de cette communication dans la cellule voisine est donc en moyenne de $(120 - x)$ secondes. Comptabilisons les appels

dans une cellule. Il y a donc en moyenne 1 appel qui dure 120 secondes, 3 appels qui durent x secondes et 3 appels qui durent $(120-x)$ secondes. Détaillons le calcul de ces 3 derniers appels: il y a en moyenne 3 appels sur 4 qui sortent de la cellule, uniformément répartis sur 6 cellules voisines, soit 0.5 mobile par cellule voisine. De même, 0.5 mobile par cellule voisine entrent donc dans une cellule. Comme il y a 6 cellules adjacentes à une cellule, cela fait en moyenne 3 mobiles qui entrent dans une cellule.

Donc, la durée moyenne d'une communication par cellule est:

$$\frac{120+3\times x+3\times(120-x)}{1+3+3} = \frac{4\times 120}{7} \tag{3.2}$$

$$= 68.57 \tag{3.3}$$

Or, cette valeur est presque celle fournie par nos simulations. La différence peut venir d'une part du fait que dans les simulations, la durée moyenne d'une communication n'est pas exactement 120 secondes, mais un peu moins, dû à l'affectation fixe de frèquences. Pour cette allocation, la valeur moyenne de la durée d'une communication par mobile est d'environ 114.39 secondes, ce qui donne alors 65.37 secondes en moyenne pour la durée d'une communication par cellule. Une autre cause de différence pourrait provenir de l'approximation sur le nombre maximal de handoffs que subit un mobile. Cependant, la relation entre les paramètres existe bien. Notons que si les calculs sont refaits avec les valeurs plus précises, i.e. 0.72 mobiles qui subissent un handoff et 0.28 qui n'en subissent pas, alors, cela donne:

$$\frac{0.28\times 114.39+0.72\times x+0.72\times(114.39-x)}{0.28+0.72+0.72} = \frac{1\times 120}{1.72} \tag{3.4}$$

$$= 66.51 \tag{3.5}$$

Ceci conduit donc à suggérer que le handoff peut être modélisé par un processus de Poisson, mais dont le temps de service est plus court que celui d'une communication *normale.*

Voyons maintenant, toujours avec une affectation fixe, l'influence d'une stratégie qui réserve un certain nombre de canaux pour le handoff.

3.5 L'affectation fixe de fréquences, avec réservation de canaux pour le handoff

Le trafic radiomobile peut être décomposé en deux parties: d'une part les mobiles qui initient une communication dans une cellule, et d'autre part les mobiles actifs qui changent de cellule et donc subissent un handoff. Très souvent, un opérateur radiomobile va donner la priorité à ces derniers sur les premiers dans l'allocation d'un canal. C'est pourquoi il est intéressant de réserver un certain nombre de canaux radiomobiles pour les affecter uniquement à des mobiles subissant un handoff. Les résultats présentés ici vont montrer cependant qu'il y a un compromis à faire si l'on veut appliquer cette stratégie, et que réserver un trop grand nombre de canaux pour le handoff peut alors être nuisible au trafic écoulé, c'est-à-dire au nombre moyen de mobiles actifs dans le réseau.

Dans ce cas, il est plus difficile d'illustrer les résultats par des graphiques 3D comme précédemment, car il n'y a plus deux, mais trois paramètres qui entrent en jeu, en considérant le nombre de canaux réservés au handoff. Il est donc nécessaire de détailler les résultats selon un des trois paramètres que nous avons choisi comme la charge ρ^*. Quelques courbes d'évolution illustreront donc les résultats, en fonction du nombre de canaux disponibles et du nombre de canaux réservés au handoff pour une valeur de ρ^* fixée. Comme en général les valeurs de ρ^* pour les cas pratiques sont aux alentours de 70%-80%, ces cas ont été traités un peu plus en profondeur. Nous considérons les autres cas de manière plus succinte.

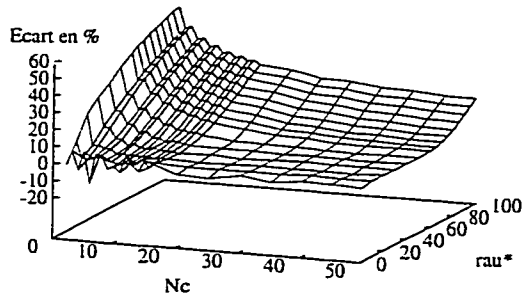


Figure 3.13 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff, $N_{ch} = \lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$ - Nombre moyen de mobiles: écart en % par rapport à la valeur pour $N_c = \infty$

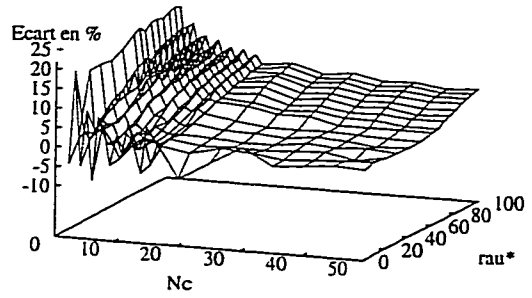


Figure 3.14 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff, $N_{ch} = \lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$ - Écart en % du nombre moyen de mobiles avec l'affectation fixe sans réservation

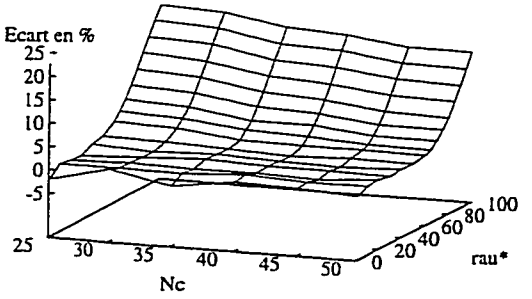


Figure 3.15 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff, $N_{ch} = \lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$, $N_c \geq 25$ - Nombre moyen de mobiles: écart en % par rapport à la valeur pour $N_c = \infty$

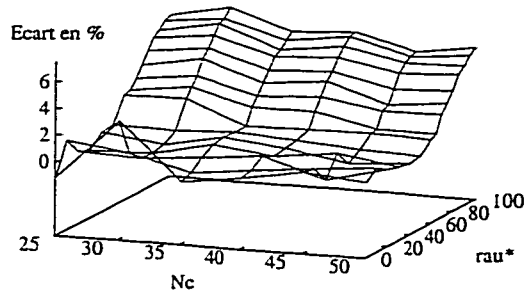


Figure 3.16 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff, $N_{ch} = \lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$, $N_c \geq 25$ - Écart en % du nombre moyen de mobiles avec l'affectation fixe sans réservation

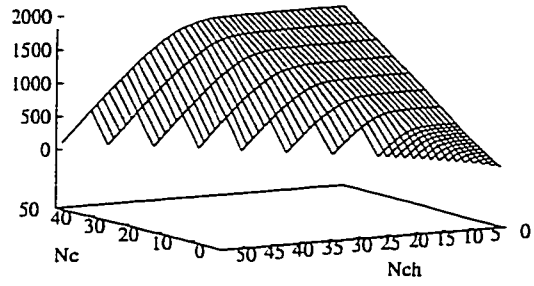


Figure 3.17 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Nombre moyen de mobiles sur l'ensemble du réseau - $\rho^* = 75$, $N_{ch} \leq N_c - 1$

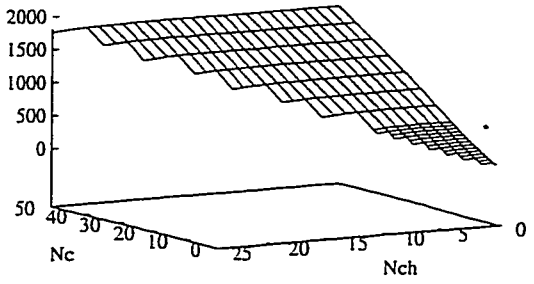


Figure 3.18 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Nombre moyen de mobiles sur l'ensemble du réseau - $\rho^* = 75$, $N_{ch} \leq \lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$

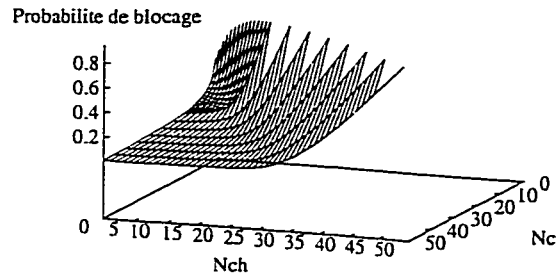


Figure 3.19 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Probabilité de blocage - $\rho^* = 75$

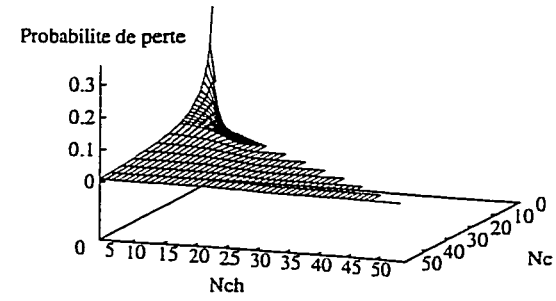


Figure 3.20 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Probabilité de perte - $\rho^* = 75$

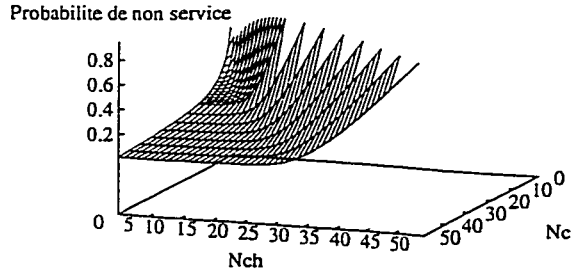


Figure 3.21 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Probabilité de non service - $\rho^* = 75$

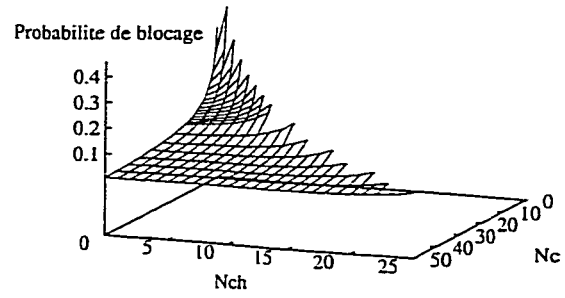


Figure 3.22 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Probabilité de blocage - $\rho^* = 75$

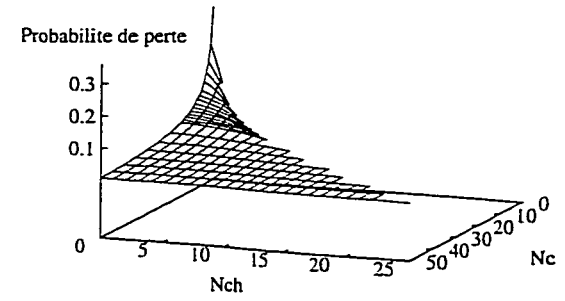


Figure 3.23 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Probabilité de perte - $\rho^* = 75$

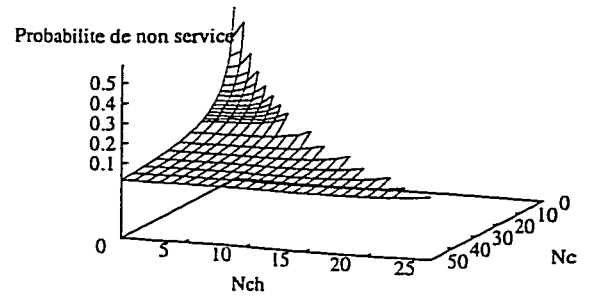


Figure 3.24 Allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff - Probabilité de non service - $\rho^* = 75$

Par ailleurs, notons que la forme en dents de scie de certaines courbes présentées est due à la discrétisation des paramètres utilisés. En effet, les valeurs choisies pour N_c ont été les suivantes: 1 à 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 et 50. Par ailleurs, les valeurs de N_{ch} ont été prises entre 0 et $N_c - 1$ pour les courbes 3.17 à 3.21 et entre 0 et $\lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$ pour les courbes 3.18 à 3.24. Notons bien sûr que pour $N_{ch} = 0$, les résultats de l'affectation fixe sans réservation de canaux pour le handoff ont été directement repris.

Ainsi que l'indiquent les figures 3.17 à 3.21, lorsque le nombre de canaux réservés au handoff devient supérieur à la moitié du nombre de canaux disponibles les probabilités de blocage augmentent rapidement, alors que le nombre moyen de mobiles par cellule décroît de façon drastique lui aussi. C'est pour cette raison que, en général, des simulations n'ont été réalisées que pour des valeurs du nombre de canaux réservés au handoff inférieures ou égales à la moitié du nombre de canaux disponibles ($N_{ch} \leq N_c/2$). Par mesure de sécurité, les fichiers de résultats ont été examinés en détail, sous leur forme brute, pour constater que rendu à la moitié des canaux réservés, le nombre moyen de mobiles devenait très inférieur à la valeur espérée (i.e. le réseau se bloque).

À titre indicatif, la figure 3.13 présente l'écart en pourcentage entre le nombre moyen de mobiles actifs théorique maximal (i.e. pour $N_c = \infty$), et le nombre moyen de mobiles actifs dans une affectation fixe avec réservation de canaux pour le handoff pour $N_{ch} = \lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$ (i.e. quand le nombre de canaux réservés aux handoffs est égal à la moitié du nombre de canaux disponibles). L'écart avec l'affectation fixe sans réservation de canaux pour le handoff est présenté à la figure 3.14. Nous voyons aux figures 3.15 et 3.16, pour lesquelles N_c est supérieur ou égal à 25, que cet écart en pourcentage est malgré tout raisonnable lorsque l'on se situe dans une situation de

trafic où il y a un minimum de canaux pour subvenir aux besoins des usagers. Notons que si N_{ch} est plus grand que $N_c/2$, ce pourcentage augmente très vite comme le laisse supposer la figure 3.17.

Sur la figure 3.17, nous pouvons également voir que le nombre moyen de mobiles est en constante décroissance avec une augmentation du nombre de canaux réservés au handoff. Cela est logique puisque l'on privilégie les appels en cours par rapport aux nouveaux. La même tendance se retrouve dans les figures 3.19 et 3.20 puisque la probabilité de blocage augmente, alors que la probabilité de perte diminue. Par ailleurs, il est évident que la probabilité de perte tend rapidement vers 0 avec un nombre croissant de canaux réservés au handoff, puisqu'il n'y a presque plus de mobiles en circulation dans le réseau et que ceux-ci n'ont donc aucune difficulté à trouver des canaux réservés au handoff lorsque cela est nécessaire. Les figures 3.18 à 3.24 montrent les mêmes résultats, mais avec $N_{ch} = \lfloor \frac{N_c}{2} \rfloor$, et donc l'échelle utilisée pour ces graphiques est plus appropriée que précédemment. On constate, entre autres, que le nombre moyen de mobiles, bien que diminuant, ne décroît pas de manière drastique.

3.6 L'affectation dynamique de fréquence, sans réservation de canaux pour le handoff

Les résultats obtenus à partir de simulations utilisant les trois allocations dynamiques particulières présentées à la section 2.6 sont rassemblés aux figures 3.25 à 3.27 avant d'être comparés avec ceux de l'affectation fixe. Seules les probabilités de non service sont représentées car l'allure des courbes, semblables à celles de l'affectation fixe, est identique pour les deux autres probabilités de blocage.

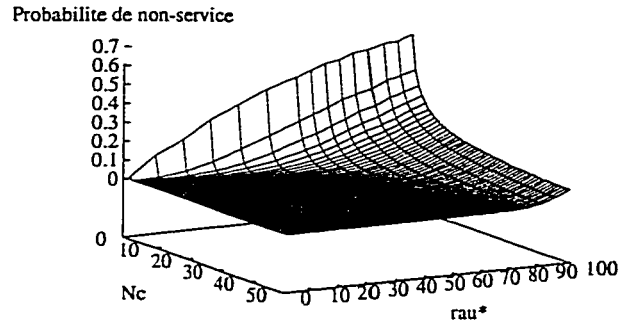


Figure 3.25 Allocation dynamique 1 - Probabilité de non service

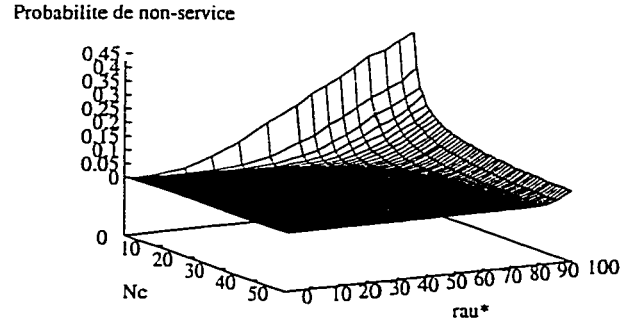


Figure 3.26 Allocation dynamique 2 - Probabilité de non service

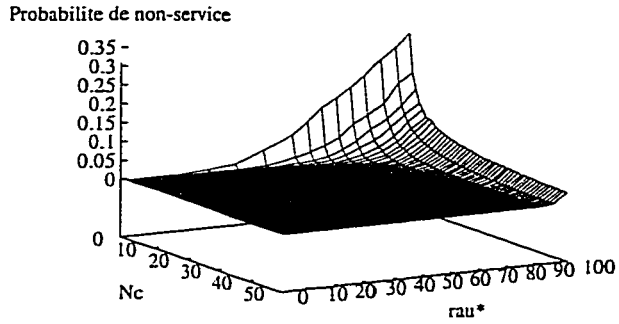


Figure 3.27 Allocation dynamique 3 - Probabilité de non service

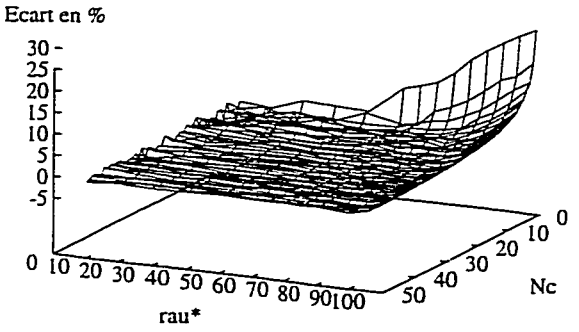


Figure 3.28 Allocation dynamique 3 - Nombre moyen de mobiles en fonction de N_c et ρ^*: écart en % par rapport à la valeur pour $N_c = \infty$

3.7 Comparaison entre l'affectation fixe et les affectations dynamiques

Ici encore, ne pouvant faire une comparaison en trois dimensions, seuls les résultats pour $\rho^* = 75$, qui représente le cas moyen, ainsi que quelques résultats pour $\rho^* = 100$ qui représente un cas extrême, sont présentés.

Les résultats présentés aux figures 3.29 à 3.31 montrent que l'utilisation des affectations dynamiques conduit à des améliorations non négligeables par rapport à l'affectation fixe. Cela est logique puisque l'on permet aux mobiles d'aller chercher des fréquences dans les cellules voisines lorsque leur propre cellule d'appartenance ne peut plus satisfaire leur demande. Par ailleurs, il est évident que l'affectation dynamique 2 est meilleure que l'affectation dynamique 1 puisque l'on va chercher dans deux cellules supplémentaires si l'on ne trouve pas dans la première, qui est la seule utilisée avec l'allocation 1. Enfin, l'allocation dynamique 3 est elle-même meilleure que l'allocation dynamique 2. Cependant, ce résultat n'était pas évident

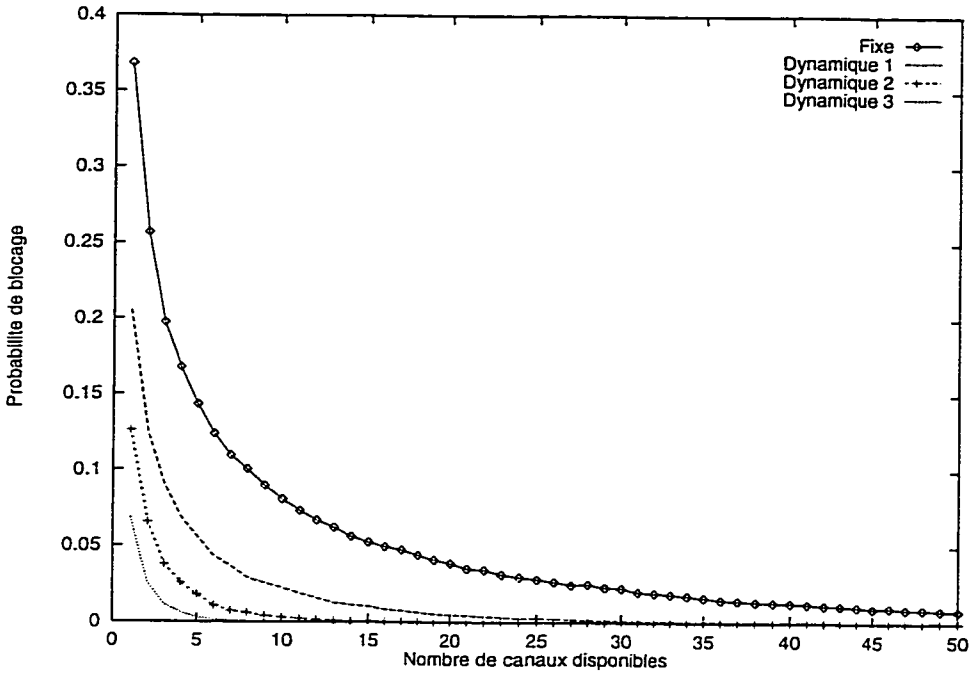


Figure 3.29 Fixe vs Dynamique - Probabilité de blocage en fonction de N_c, $\rho^\star = 75$

au premier abord. En effet, rien ne prouvait qu'après avoir recherché un canal libre dans trois cellules sur six, cela n'était pas suffisant.

Les figures 3.32 et 3.33 considèrent le nombre moyen de mobiles actifs des affectations dynamiques et de l'affectation fixe. On constate que les allocations dynamiques se rapprochent plus de la valeur théorique que l'allocation fixe et l'écart est d'autant plus marqué que $\rho^\star$ est élevé.

Ces courbes montrent donc que lorsque le réseau est très chargé, toute amélioration dans l'allocation de fréquence, aussi infime soit elle, est malgré tout utile. Notons ici que si l'amélioration apportée par les allocations dynamiques relativement à la probabilité de blocage est moins nette à forte charge du réseau, elle est en revanche plus marquée relativement au nombre moyen de mobiles dans le réseau.

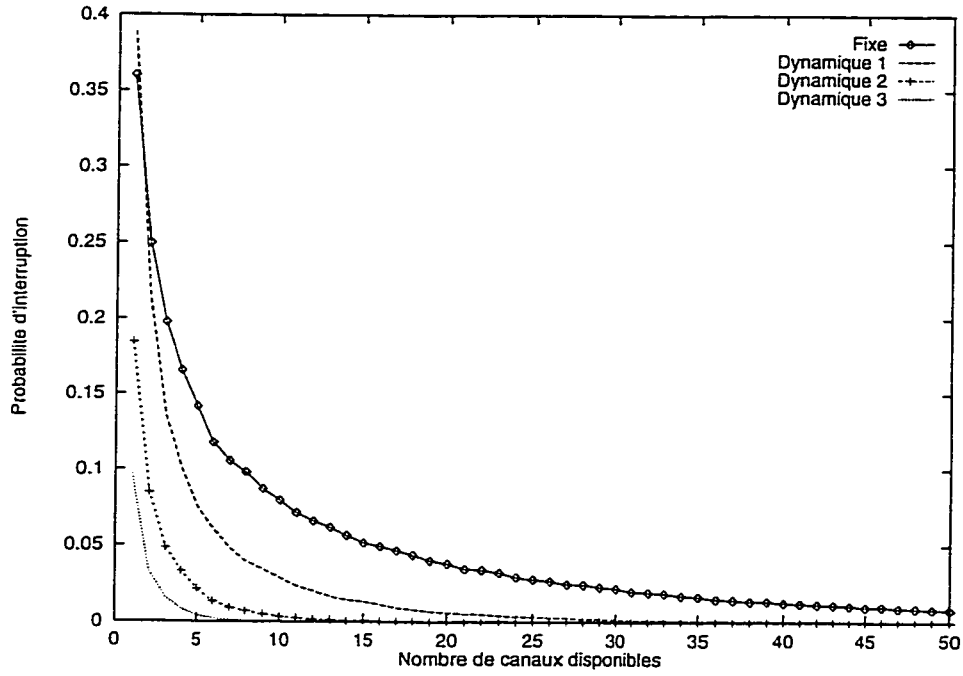


Figure 3.30 Fixe vs Dynamique - Probabilité de perte en fonction de N_c, $\rho^* = 75$

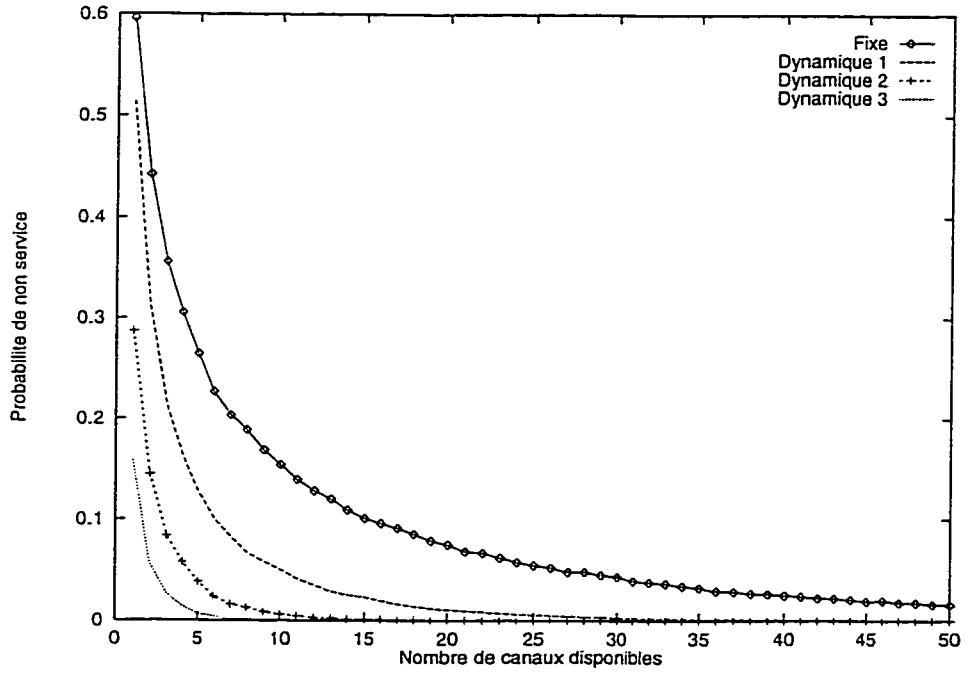


Figure 3.31 Fixe vs Dynamique - Probabilité de non service en fonction de N_c, $\rho^* = 75$

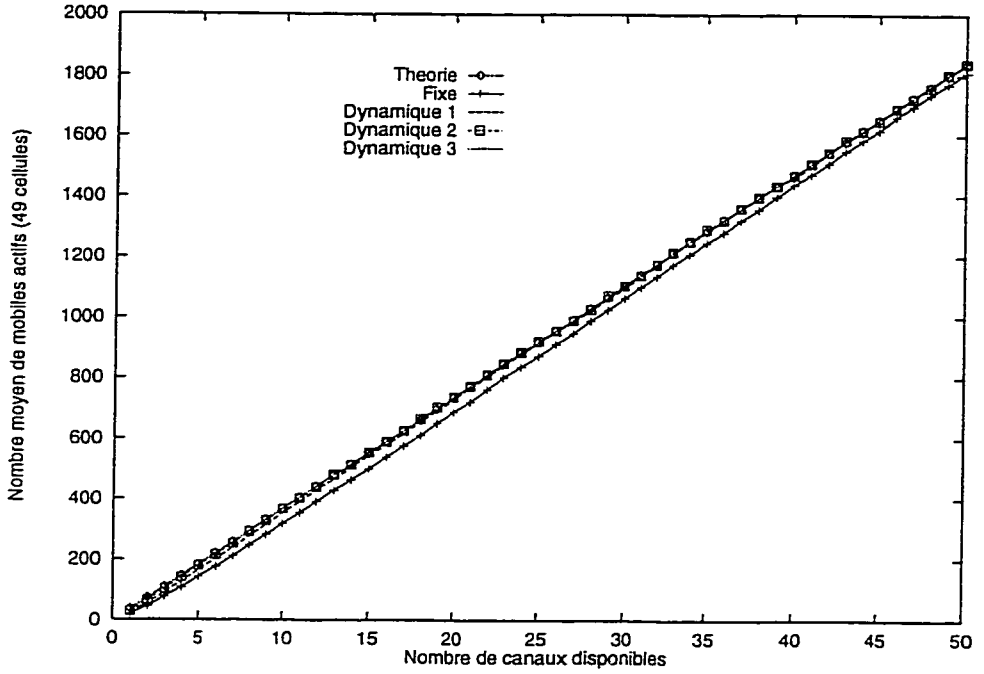


Figure 3.32 Fixe vs Dynamique - Nombre moyen de mobiles actifs sur l'ensemble du réseau en fonction de N_c, $\rho^* = 75$

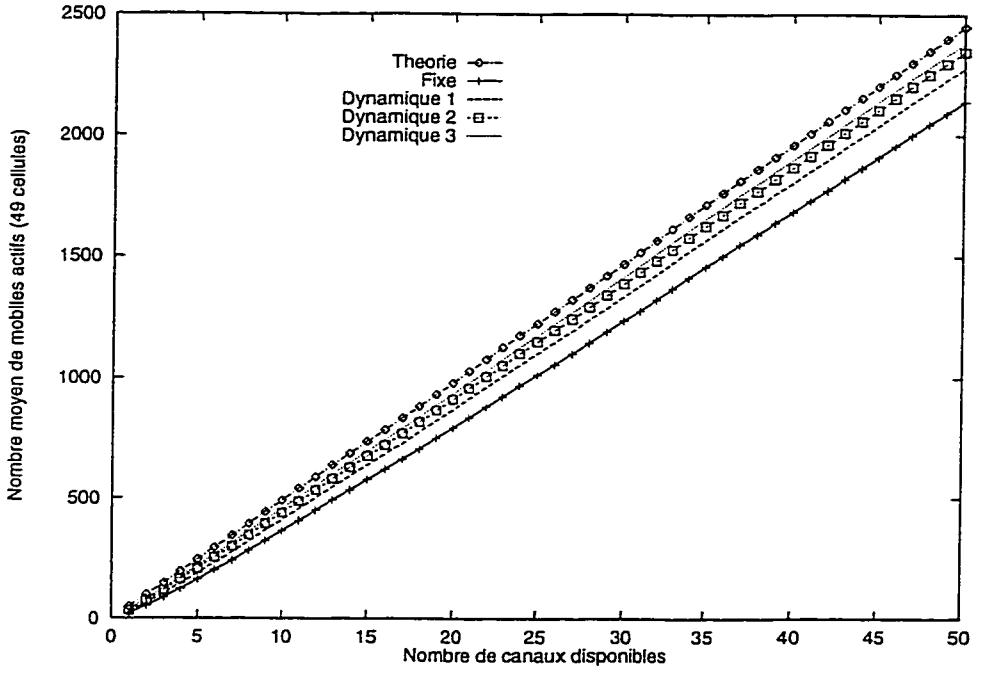


Figure 3.33 Fixe vs Dynamique - Nombre moyen de mobiles actifs sur l'ensemble du réseau en fonction de N_c, $\rho^* = 100$

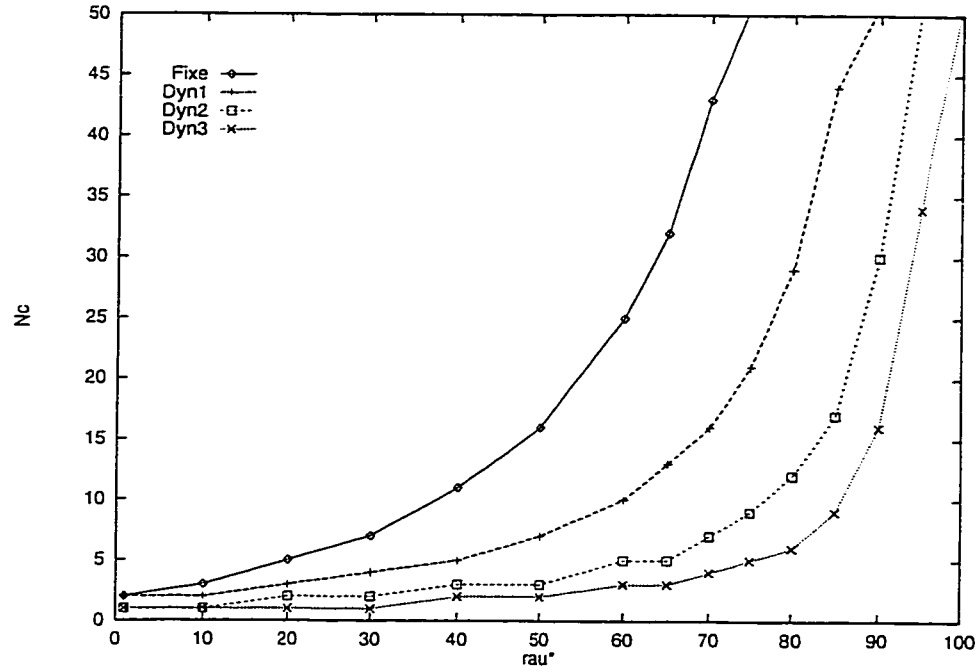


Figure 3.34 Fixe vs Dynamique - Nombre de canaux nécessaires pour avoir $P_{n.s} = 1\%$

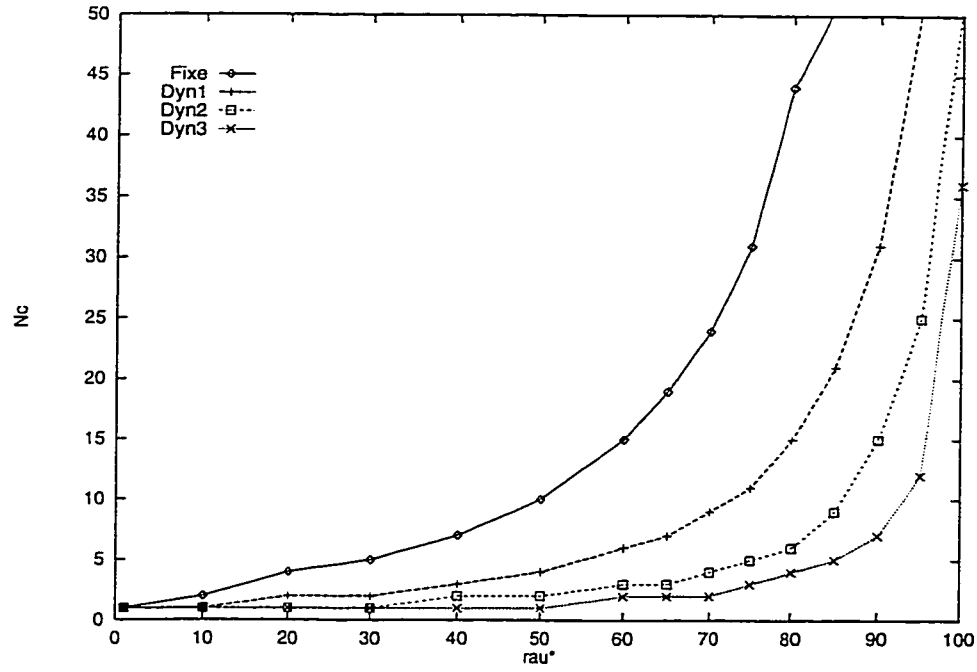


Figure 3.35 Fixe vs Dynamique - Nombre de canaux nécessaires pour avoir $P_b = 2\%$

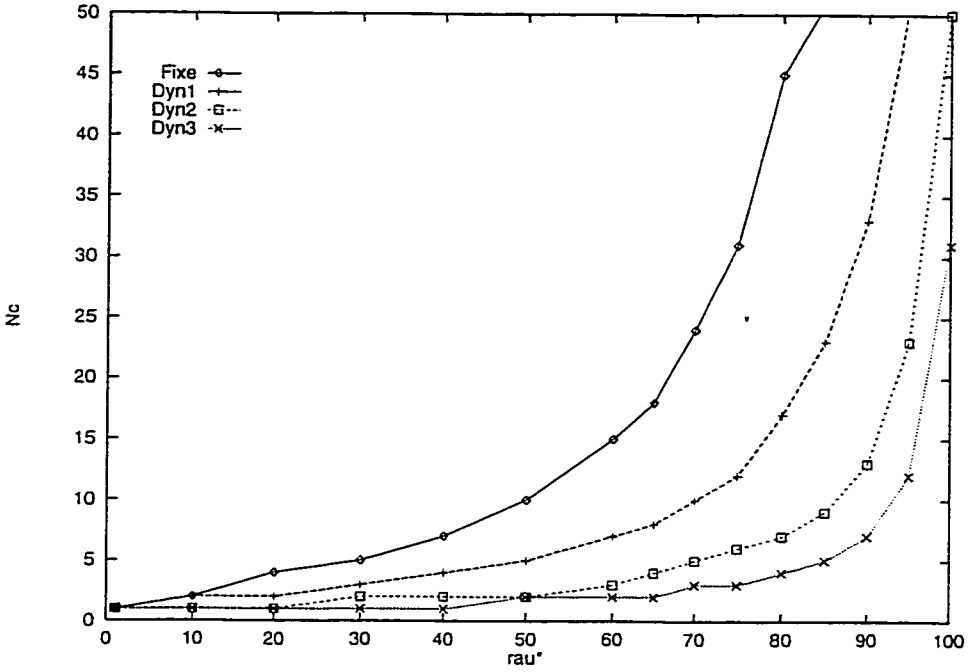


Figure 3.36 Fixe vs Dynamique - Nombre de canaux nécessaires pour avoir $P_i = 2\%$

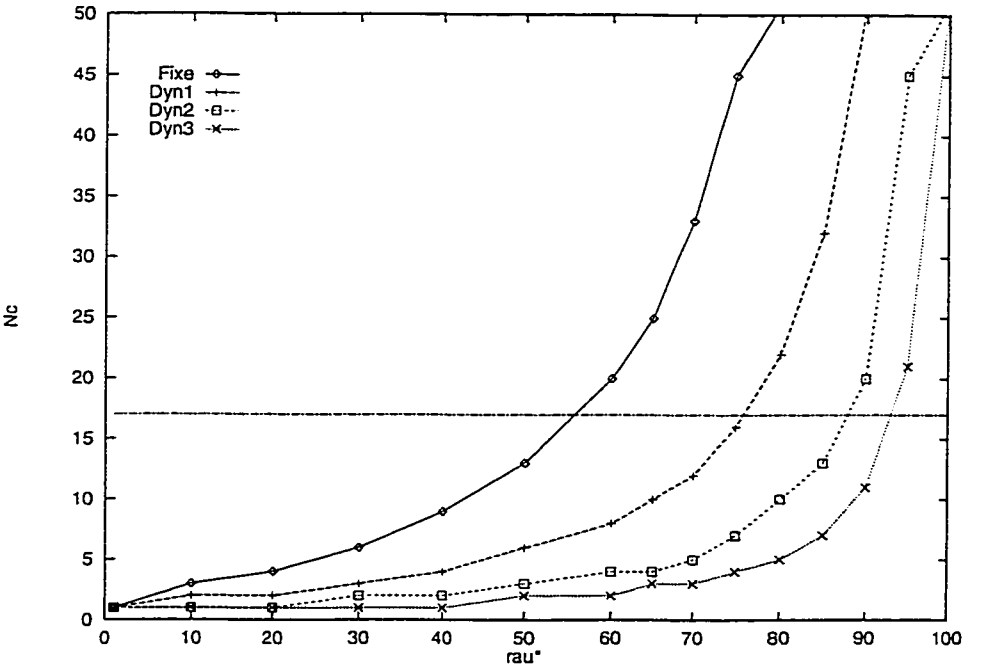


Figure 3.37 Fixe vs Dynamique - Nombre de canaux nécessaires pour avoir $P_{ns} = 2\%$

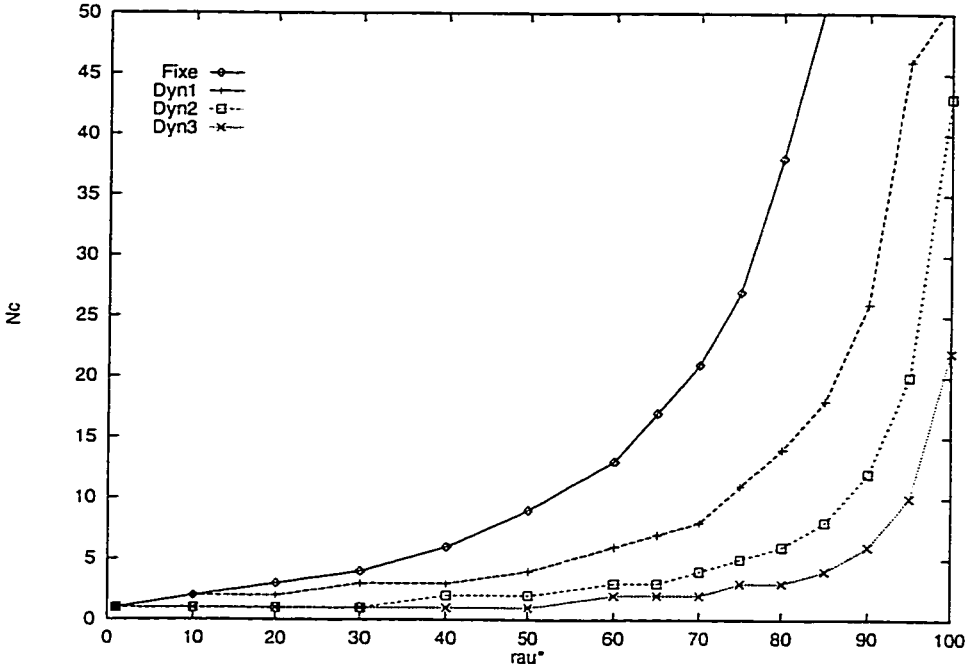


Figure 3.38 Fixe vs Dynamique - Nombre de canaux nécessaires pour avoir $P_{ns} = 5\%$

Les courbes 3.34 à 3.38 représentent pour les diverses stratégies le nombre de canaux requis pour atteindre une probabilité de blocage fixée apriori. Notons que si ce nombre est plus grand que 50, il n'apparaît pas sur nos figures. On peut interpréter ces courbes d'une autre manière puisqu'elles indiquent pour un nombre N_c de canaux disponibles fixé, quelle valeur de trafic peut être écoulée dans chaque cellule avec chacune des stratégies. Il suffit pour faire cette interprétation de lire les courbes 3.34 à 3.38 en traçant une droite horizontale, ainsi que montré à la figure 3.37, et de regarder sur cette droite quelle allocation de fréquences permet d'obtenir un ρ^* maximal.

Dans le cadre des normes de service actuelles, la valeur généralement retenue par les opérateurs est une probabilité de non-service de 2%. À titre illustratif, nous avons considéré aussi les valeurs cibles de 1% et 5%. L'apport de capacité lié à l'utilisation des stratégies d'allocation dynamique est indéniable. On y note, par

exemple, l'incapacité de l'allocation fixe à très forte charge ($\rho^* = 100\%$) à répondre aux besoins même avec 50 canaux dans le cas où $P_{ns} = 5\%$. Or, il faut être réaliste, ce nombre est très élevé et tous les systèmes n'ont pas accès à un nombre si grand de canaux dû aux contraintes du spectre. Dans le cas du GSM, il n'y a qu'environ 125 canaux disponibles par patron de 7 cellules, soit environ 17 à 18 canaux par cellule. En revanche, le DCS-1800, version micro-cellulaire du GSM, admet 375 canaux, soit environ 53 à 54 canaux par cellule. Il faut toutefois remarquer que les normes GSM et DCS-1800 utilisent l'accès multiple à répartition dans le temps (AMRT), qui permet d'utiliser jusqu'à 8 canaux de voix différents sur un seul canal physique.

Notons que pour la norme AMPS, 17 à 19 canaux de voix sont disponibles par cellule [4]. Sur cet exemple précis, on peut lire à la figure 3.37, que pour une probabilité de non service de 2%, une allocation fixe permet une charge ρ^* maximale de 56%, l'allocation dynamique de type 1 présentée dans ce travail fait grimper cette valeur à 76%, et les allocations dynamiques de type 2 et 3 autorisent une charge de 88% et 93%, respectivement.

Comme cela a déjà été mentionné, ce travail est la base de nombreux travaux concernant le trafic et l'allocation de fréquences. Ainsi, le chapitre suivant présente brièvement les apports qui pourraient être faits au simulateur, ainsi que différentes possibilités d'utilisation de celui-ci.

Chapitre 4

Avenues de recherche et extensions possibles à partir du simulateur 2D - Conclusion

Nous présentons brièvement dans ce chapitre quelques extensions possibles du simulateur ainsi que les modifications qui pourraient lui être apportées dans le cadre d'études subséquentes. En effet, de nombreux paramètres entrent en jeu dans un simulateur radio-mobile et il n'a pas été possible de tous les étudier dans le cadre de notre travail.

Dans cette optique, nous considérons plus particulièrement les points suivants:

- un modèle fondé sur des *cellules floues* [5]
- la possibilité d'envisager des procédures d'allocation dynamique avec *réorganisation des canaux*
- le *modèle Manhattan*

4.1 Un modèle de cellules floues

Le simulateur utilisé détermine les stations de base qui desservent les mobiles uniquement en fonction de la position du mobile dans le plan (i.e. les cellules sont délimitées par des frontières géographiques).

Cependant, un des critères qui aurait pu également être utilisé est un critère plus physique basé sur le rapport signal-à-bruit. En supposant les lois des variables aléatoires qui régissent ces phénomènes connues, il faut alors comparer les signaux tests reçus par le mobile venant de deux stations de base différentes pour déterminer laquelle le dessert. Un tel système devient plus complexe car le simulateur doit comporter un modèle de propagation.

Une étude un peu plus détaillée des divers phénomènes entrant en ligne de compte peut être trouvée dans [5], où est présenté un modèle de cellules floues dans un simulateur par roulette à une dimension.

4.2 Mise à jour de l'utilisation des canaux

Une telle procédure n'est intéressante que dans le cas de l'allocation dynamique puisqu'elle traite du réarrangement des canaux après que ceux-ci aient été empruntés aux cellules avoisinantes. Quelques résultats préliminaires ont été obtenus à partir de simulations avec ou sans cette option. Nous illustrons le principe en prenant par exemple le cas de deux cellules A et B ayant 10 canaux disponibles chacune, aucun n'étant réservé pour le handoff.

À l'instant t_1, la cellule A sert 10 usagers et la cellule B seulement 9. Les états des cellules aux instants t_1^- et t_1^+ sont données aux figures 4.1 et 4.2. Supposons qu'un mobile X initie un appel à cet instant dans le cellule A. Il ne peut y trouver de canaux disponibles, mais la cellule B, voisine, le peut. Il y a alors 11 usagers dans la cellule A, 10 étant servis par A et le mobile X par B qui sert par ailleurs 9 autres usagers.

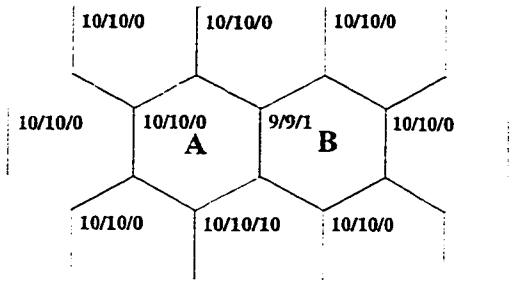


Figure 4.1 Exemple de mise à jour de l'affectation des canaux: $t = t_1^-$

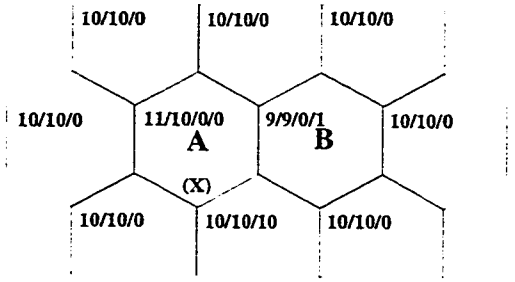


Figure 4.2 Exemple de mise à jour de l'affectation des canaux: $t = t_1^+$

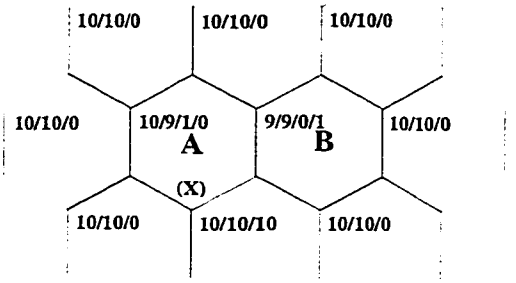


Figure 4.3 Exemple de mise à jour de l'affectation des canaux: $t = t_2^-$

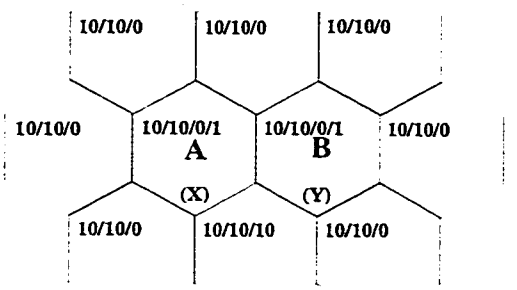


Figure 4.4 Exemple de mise à jour de l'affectation des canaux: $t = t_2^+$

$i/j/k(/l)$

i	=	Mobiles présents dans la cellule
j	=	Canaux utilisés dans la cellule
k	=	Canaux disponibles
l	=	Canaux prêtés

Supposons qu'à l'instant t_2 la cellule A ne serve plus que 10 usagers physiquement présents dans cette cellule, le mobile X étant toujours dans cette cellule, mais servi par B. Les situations des cellules aux instants t_2^- et t_2^+ sont données aux figures 4.3 et 4.4. Supposons alors qu'un appel soit initié à cet instant par un mobile Y dans la cellule B. Celle-ci ne peut répondre aux besoins de l'usager puisque ses 10 canaux sont occupés. Supposons alors qu'aucune cellule voisine de B ne puisse satisfaire Y, sauf A qui a un canal de libre. On se retrouve alors dans la situation où X est dans la cellule A, mais servi par la cellule B et Y est dans B, mais servi par A. En revanche, si X récupère la canal libre dans A, Y pourra alors être directement servi par B en récupérant le canal occupé par X.

Un autre avantage de cette méthode est une possible amélioration de la qualité du signal, puisqu'on cherche à ramener toutes les communications d'une cellule sous le contrôle de sa base. Celle-ci se trouvant bien évidemment plus près du mobile que celle de la cellule voisine, l'atténuation du signal est a priori bien moins grande.

Plusieurs simulations ont été réalisées avec ce type d'allocation dynamique. Cependant les résultats sont décevants puisque nous avons constaté une hausse des probabilités de blocage par rapport à une affectation sans réorganisation de canaux. Plusieurs de ces résultats sont présentés aux figures 4.5 à 4.7. La raison principale de l'échec est la dissymétrie introduite par l'algorithme trop simpliste. En effet, il faudrait implanter un algorithme global au niveau du réseau, alors que nous n'avons utilisé qu'un algorithme local à balayage séquentiel.

Nous expliquons ici brièvement les caractéristiques de l'algorithme de réorganisation des canaux simple qui a été testé. On balaye toutes les cellules du réseau dans l'ordre 1 à 49. Dans chaque cellule, les canaux non réservés au handoff sont étudiés un par un. Pour tout canal utilisé par un mobile, on compare le numéro de la cellule

physique de ce mobile, i.e. sa position dans le complexe cellulaire, avec le numéro de la cellule qui gère le canal étudié. Si les numéros sont différents et *s'il existe un canal libre dans la cellule physique du mobile*, alors un changement de canal est opéré.

Le problème lié au balayage unique des cellules est que, par exemple, si lors de l'étude de la cellule numéro i nous libérons des canaux dans la cellule numéro $j < i$, il ne nous est pas possible de revenir à la cellule numéro j pour voir si ce nouvel arrangement permet une meilleure réorganisation. Donc, comme l'optimisation n'est pas globale, mais locale et fonction de l'ordre choisi pour les cellules, nous créons une dissymétrie entre les cellules. Ceci explique les résultats plus que décevants obtenus aux figures 4.5 à 4.7.

Nous pouvons remarquer ici que l'on se rapproche de la méthode du Maximum Packing développée à la section 1.4.1. Cependant, il apparaît intéressant de poursuivre dans cette voie. L'idéal serait d'implanter un algorithme du type Maximum Packing, ce qui est certes impossible en pratique. Nous suggérons de considérer la possibilité d'un compromis entre le Maximum Packing et la méthode de balayage en effectuant plusieurs balayages dans un ordre plus ou moins aléatoire.

4.3 Le modèle Manhattan

Le simulateur que nous avons réalisé utilise un modèle de cellules hexagonales. Cependant, un modèle de cellules carrées aurait pu aussi être envisagé. En effet, ce modèle, de type *Manhattan*, est plus réaliste dans une ville nord-américaine, où les rues sont toutes perpendiculaires les unes aux autres que dans les villes européennes, comme Paris, où les rues sont plus sinueuses, et rarement orthogonales entre elles.

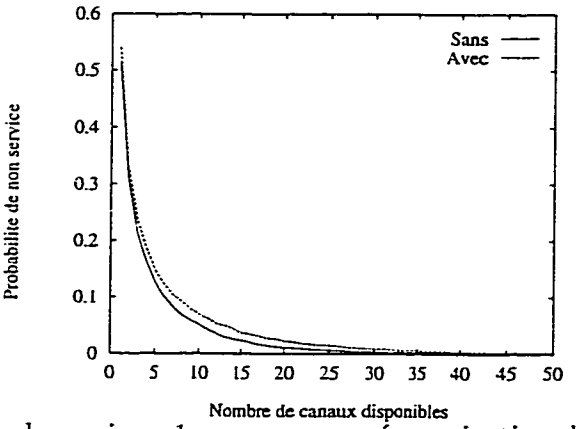


Figure 4.5 Allocation dynamique 1 sans vs avec réorganisation de canaux - Probabilité de non service - $\rho^* = 75$

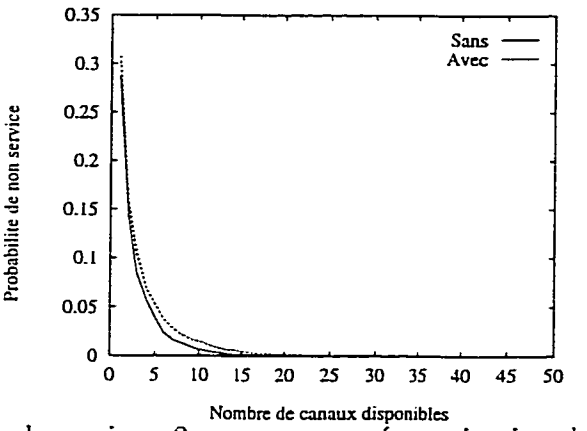


Figure 4.6 Allocation dynamique 2 sans vs avec réorganisation de canaux - Probabilité de non service - $\rho^* = 75$

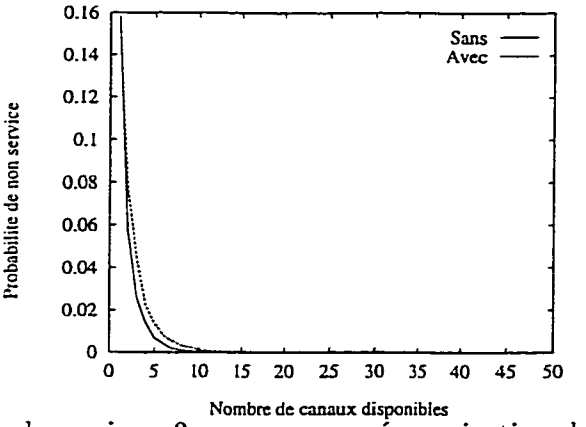


Figure 4.7 Allocation dynamique 3 sans vs avec réorganisation de canaux - Probabilité de non service - $\rho^* = 75$

Dans ce type de réseau, on pourrait développer un modèle de marche aléatoire adéquat qui serait influencé simplement aux carrefours où la décision aléatoire pertinente se ramènerait à déterminer si le mobile tourne à droite ou à gauche ou bien continue tout droit.

4.4 Conclusion

La téléphonie cellulaire s'avère être le futur immédiat en ce qui concerne les communications entre les individus et l'explosion du marché ces dernières années en est la preuve concrète [23]. C'est ainsi que les différents opérateurs vont devoir non seulement répondre aux besoins des usagers, en terme de services offerts, mais également à la demande en terme de trafic, qui ne cesse de croître. Il est donc impératif pour les opérateurs de se donner les moyens de répondre à ces attentes.

L'objectif de ce travail de maîtrise a été essentiellement la mise au point d'outils pertinents pour l'étude de l'impact des différents paramètres entrant en jeu dans le fonctionnement d'un réseau radiomobile. En premier lieu, un simulateur radiomobile a donc été réalisé. Le premier modèle de réseau utilisé comprenait 49 cellules sans considérer les effets de bord dus aux cellules frontières. Pour mieux approximer un grand réseau, un deuxième modèle a été envisagé, celui d'un réseau fermé sur lui-même à la manière d'un tore. Ce modèle nous a donné des résultats conformes à la théorie d'un réseau infini (i.e. sans effets de bord) et a donc été retenu comme modèle de base pour la suite. Quelques simulations spécifiques ont alors été réalisées pour étudier l'impact des procédures d'allocation des fréquences sur la capacité du réseau cellulaire. Il est ressorti que l'affectation fixe des fréquences est pénalisante relativement au nombre d'usagers que le système peut desservir. Quelques résultats intéressants

ont été obtenus à l'aide de différentes stratégies d'allocations avec réservation de canaux pour la gestion des handoffs et d'une adaptation dynamique à l'état du réseau. Ces résultats ne sont dans le présent que rudimentaires mais ils restent très prometteurs. À ce titre, on notera que la conception du simulateur qui est très modulaire permet d'ajouter autant de stratégies d'allocations de fréquences que désiré. Cette modularité permet également de concevoir ce simulateur comme point de départ de nombreuses études sur le trafic et l'allocation de fréquences. Il est en effet possible d'y modifier la plupart des paramètres de trafic et de mobilité et donc d'adapter les conditions de simulation à des données réalistes telles que mesurées sur les systèmes en activité. Conséquemment, nous estimons que ce travail constitue une contribution préliminaire et importante pour de futurs développements.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] ANDERSON L.G.(1973), "A Simulation Study of Some Dynamic Channel Assignment Algorithms in a High Capacity Mobile Telecommunications System", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-22, no. 4, pp. 210-217

[2] ANDERMO P-G. et EWERBRING L-M.(1995), "A CDMA-Based Radio Access Design for UMTS", IEEE Personal Communications, Fév 1995, pp. 48-53

[3] CALLENDAR M.H.(1994), "Future Public Land Mobile Telecommunication Systems" IEEE Personal Communications, Fourth Quarter 1994, pp. 18-2

[4] CONAN J.(1993), "Introduction à la téléphonie cellulaire", Notes de cours, École Polytechnique de Montréal

[5] CHALIMON B.(1995), "Analyse et modélisation du handoff dans un réseau téléphonique cellulaire", Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal

[6] CHIA S.(1992), "The Universal Mobile Telecommunication System", IEEE Communications Magazine, Déc. 1992, pp. 54-62

[7] CIMINI L.J. et al.(1994), "Call Blocking Performance of Distributed Algorithms of Dynamic Channel Allocation in Microcells", IEEE Transactions on Communications, vol. 42, no. 8, pp. 2600-2607

[8] COX D.C. et REUDINK D.O.(1974), "Layout and control of high-capacity systems", Microwave Mobile Coomunications, Chapître 7, W.C. Jakes, et J. Wiley, pp. 544-633

[9] HEBUTERNE G.(1985), Écoulement du trafic dans les autocommutateurs, Masson et CNET-ENST

[10] JORDAN S. et KHAN A.(1994), "A performance Bound on Dynamic Channel Allocation in Cellular Systems: Equal Load", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 43, no. 2, pp. 333-344

[11] KAHWA t.J. et GEORGANAS N.D.(1978), "A Hybrid Channel Assignment Scheme in Large-Scale, Cellular-Structured Mobile Communication Systems", IEEE Transactions on Communications, vol. COM-26, no. 4, pp. 432-438

[12] KARIAN Z.A. et DUDEWICZ E.J.(1990), Modern Statistical, Systems, and GPSS Simulation: The First Course, Computer Science Press

[13] LAM K.(1993), "Location Updating and Paging Strategies in a Cellular System", Mémoire de Maîtrise, University of British Columbia

[14] LAW A.M. et KELTON W.D.(1991), Simulation Modeling and Analysis, Second Edition, Ed. McGraw-Hill

[15] LIN Y-B. et al.(1994), "Queuing Priority Channel Assignment Strategies for PCS Hand-Off and Initial Access", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 43, no. 3, pp. 704-712

[16] LIN Y-B. et al.(1994), "PCS Channel Assignment Strategies for Hand-Off and Initial Access", IEEE Personal Communications, Third Quarter 1994, pp. 47-56

[17] MAC DONALD V.H.(1979), "AMPS, The cellular concept", Bell System Technology Journal, vol. 58, no. 1, pp15-41

[18] MOULY M. et PAUTET M.B.(1992), The GSM System for Mobile Communications, Publié par les auteurs (49, rue Louise-Bruneau, 91120 Palaiseau, France), ISBN 2-9507190-0-7

[19] OH S-H. et THCA D-W.(1994), "Prioritized Channel Assignment in a Cellular Radio Network, IEEE Transactions on Communications, vol. 40, no. 7, pp. 1259-1269

[20] PAVLIDOU F.-N.(1994), "Two-Dimensional Traffic Models for Cellular Mobile Systems", IEEE Transactions on Communications, vol. 42, no. 2/3/4, pp. 1505-1511

[21] RAPPAPORT S.S. et HONG D.(1986), "Traffic model and performances analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-35, no. 3, pp. 77-92

[22] RAYMOND P.A.(1991), "Performances Analysis of Cellular Networks", IEEE Transactions on Communications, vol. 39, no. 12, pp. 1787-1793

[23] SALGUES B.(1995), Les télécoms mobiles, HERMES

[24] STEELE R.(1994), "The Evolution of Personal Communications" IEEE Personal Communications, Second Quarter 1994, pp. 6-11

[25] URIE A. et al.(1995), "An Advanced TDMA Mobile Access System for UMTS" IEEE Personal Communications, Fév 1995, pp. 38-47

[26] WEST K.A. et STÚBER G.L.(1994), "An Aggressive Dynamic Channel Assignment Strategy for a Microcellular Environment", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 43, no. 4, pp. 1027-1038

Annexe A

Génération de variables aléatoires à partir de variables aléatoires uniformes

Nous allons ici donner la méthode pour générer une variable aléatoire quelconque à partir d'une variable aléatoire uniforme dans [0,1]. Cependant, pour plus d'informations et de précisions sur d'autres types de variables aléatoires que celles traitées ici, nous suggérons au lecteur de se référer à [14].

A.1 Généralités

Soit X une variable aléatoire et $F(x) = ProbX \leq x$ la fonction de répartition cumulative associée. Pour générer X, il suffit de générer une variable aléatoire U uniforme dans [0,1] et de retourner $x = F^{-1}(u), u \in [0,1]$. Chaque test présenté ci-après a été réalisé avec 10000 échantillons.

A.2 Génération d'une variable aléatoire uniforme U(a,b)

La fonction de répartition cumulative d'une variable aléatoire uniforme dans [a,b] est donnée par

$$u = F(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a < x < b \\ 1 & \text{si } b < x \end{cases} \qquad \text{(A.1)}$$

Il en découle donc immédiatement que

$$x = F^{-1}(u) = a + (b - a)u \tag{A.2}$$

A.3 Génération d'une variable aléatoire exponentielle

La fonction de répartition cumulative d'une variable aléatoire exponentielle de paramètre β est donnée par

$$u = F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-x/\beta} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{A.3}$$

Il en découle donc immédiatement que

$$x = F^{-1}(u) = -\beta ln(1 - u) \tag{A.4}$$

Or, si U est uniforme dans [0,1], alors il est évident que 1-U l'est aussi. Donc, on utilise parfois également la transformation suivante:

$$x = -\beta ln(u) \tag{A.5}$$

A.4 Génération d'une variable aléatoire normale

La densité de probabilité d'une variable aléatoire normale de moyenne μ et de variance σ^2 est donnée par

$$u = f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \tag{A.6}$$

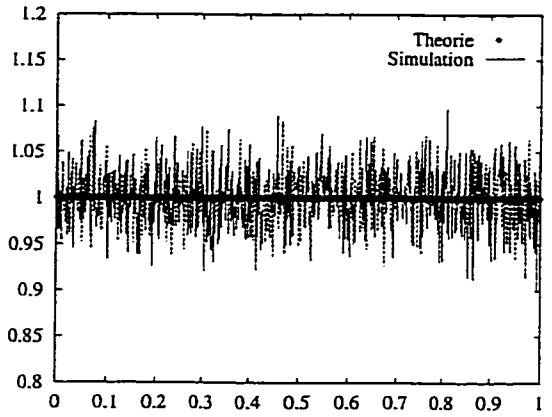


Figure A.1 Densité de probabilité d'une variable aléatoire uniforme U(0,1)

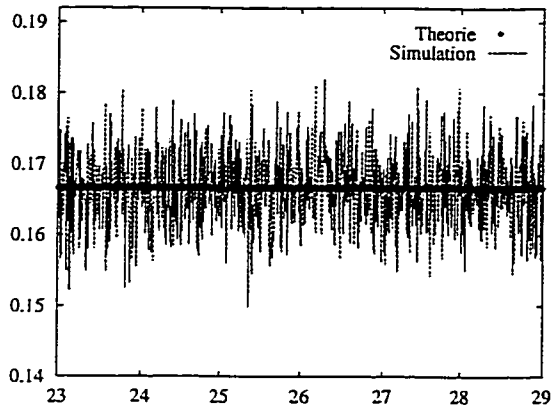


Figure A.2 Densité de probabilité d'une variable aléatoire uniforme U(23,29)

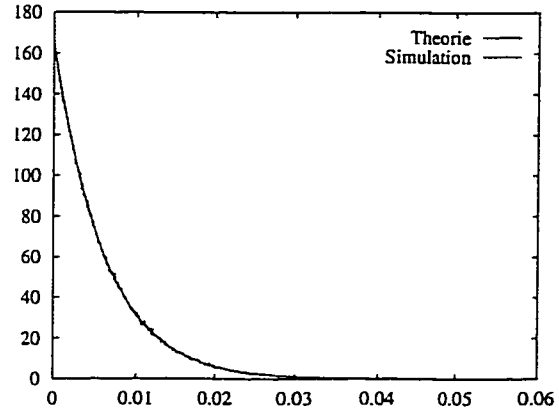


Figure A.3 Densité de probabilité d'une variable aléatoire exponentielle $\beta = 0.006$

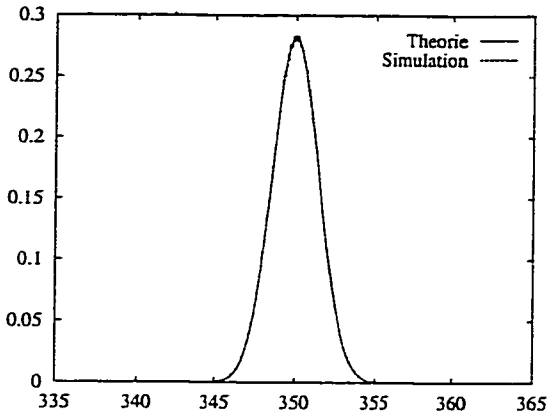


Figure A.4 Densité de probabilité d'une variable aléatoire normale $N(350, 2)$

Trouver F^{-1} n'est ici pas immédiat. La méthode préconisée dans ce cas est la suivante: il faut générer deux variables aléatoires uniformes dans [0,1], U_1 et U_2, puis générer une variable aléatoire normale $X_{0,1} = N(0, 1)$ où

$$X_{0,1} = \sqrt{-2ln(U_1)}\, cos(2\pi U_2) \quad . \tag{A.7}$$

Finalement, pour obtenir une variable aléatoire normale $N(\mu, \sigma^2)$, il suffit alors d'appliquer une dernière transformation qui s'exprime ainsi:

$$X_{\mu,\sigma^2} = \mu + \sigma^2 X_{0,1} \tag{A.8}$$

A.5 Génération d'une variable aléatoire lognormale

La densité de probabilité d'une variable aléatoire lognormale est donnée par

$$u = f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(ln(x)-\mu)^2/2\sigma^2} & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{A.9}$$

Ici encore, trouver F^{-1} n'est pas immédiat. On doit donc procéder différement. Notons cependant tout de suite que la moyenne d'une variable lognormale $LN(\mu, \sigma^2)$

n'est pas μ mais $e^{\mu+\sigma^2/2}$ et sa variance n'est pas σ^2 mais $e^{2\mu+\sigma^2}(e^{\sigma^2}-1)$.

Générer une variable aléatoire lognormale $X = LN(\mu, \sigma^2)$ est aisé à partir d'une variable aléatoire normale $Y = N(\mu, \sigma^2)$, puisqu'il suffit de retourner $X = e^Y$. Donc, à partir de deux variables aléatoires uniformes dans [0,1], U_1 et U_2, il suffit de faire la transformation:

$$X = e^{\mu+\sigma^2\sqrt{-2ln(U_1)}\,cos(2\pi U_2)} \tag{A.10}$$

A.6 Génération d'une variable aléatoire de Rayleigh

La densité de probabilité d'une variable aléatoire de Rayleigh est donnée par

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2}e^{-x^2/2\sigma^2} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{A.11}$$

Sa distribution est donc donnée par:

$$u = F(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 - e^{-x^2/2\sigma^2}) & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{A.12}$$

Sachant que, en notant μ la moyenne de cette variable aléatoire, on a:

$$\sigma = \mu\sqrt{\frac{2}{\pi}} \tag{A.13}$$

Alors, la transformation à faire est la suivante:

$$x = F^{-1}(u) = \sigma\sqrt{-2 * ln(1-u)} \tag{A.14}$$

Notons que, ici encore, on peut utiliser indifféremment $ln(1-u)$ ou $ln(u)$.

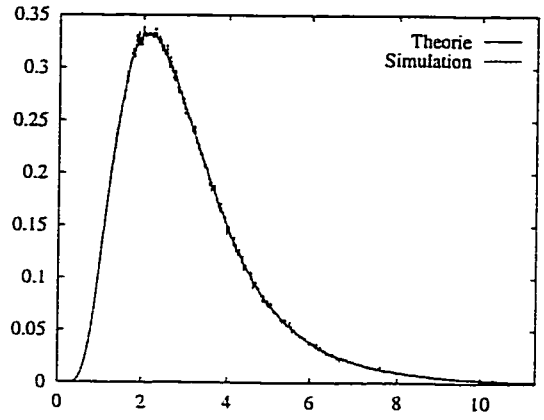


Figure A.5 Densité de probabilité d'une variable aléatoire lognormale $LN(1, .25)$

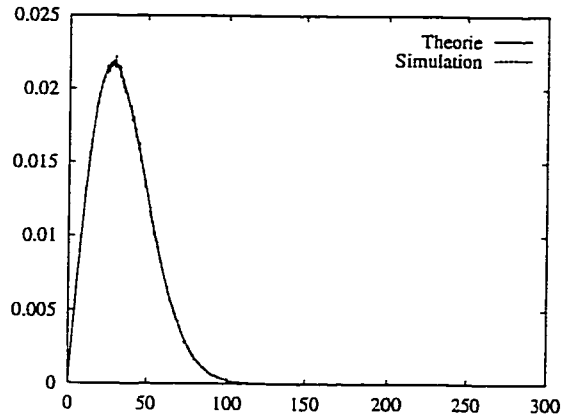


Figure A.6 Densité de probabilité d'une variable aléatoire de Rayleigh de moyenne 35

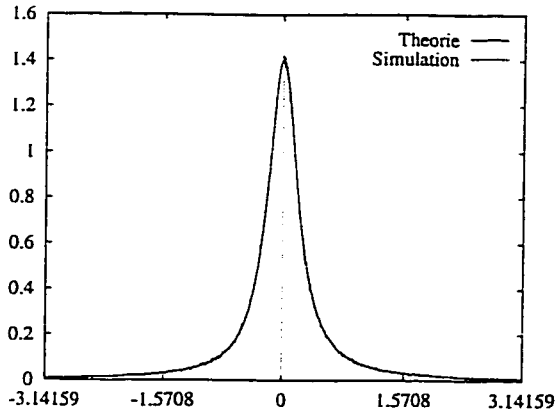


Figure A.7 Densité de probabilité d'une variable aléatoire alpha $A(0, \pi, 4.2)$

A.7 Génération d'une variable aléatoire Alpha

La densité de probabilité d'une variable aléatoire Alpha $A(\overline{x}, w, \alpha)$ est donnée par:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}\frac{\alpha}{[1+\alpha^2(x-\overline{x})^2]tan^{-1}(\alpha w)} & \text{si } \overline{x} - w < x < \overline{x} + w \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{A.15}$$

Sa distribution est donc donnée par

$$u = F(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq \overline{x} - w \\ \frac{1}{2}\frac{tan^{-1}(\alpha(x-\overline{x}))}{tan^{-1}(\alpha w)} + \frac{1}{2} & \text{si } \overline{x} - w < x < \overline{x} + w \\ 1 & \text{si } \overline{x} + w \leq x \end{cases} \tag{A.16}$$

Il en découle donc immédiatement que

$$x = F^{-1}(u) = \frac{1}{\alpha} tan((2u-1)tan^{-1}(\alpha\pi)) \tag{A.17}$$

Pour plus de détails sur une variable aléatoire Alpha, nous conseillons de lire [13].

Annexe B

Le code du simulateur: explication des différents modules

Cette annexe constitue un mini guide de l'utilisateur du simulateur de trafic radiomobile, principalement destiné à ceux qui voudraient utiliser le code pour implanter de nouveaux modules d'allocation dynamique par exemple, ou de contrôle de la position des mobiles, en particulier dans le contexte des cellules floues.

B.1 Les diverses versions du simulateur

Le simulateur a été réalisé en plusieurs étapes. Après la période de mise au point des différents générateurs et de la pile d'événements, nous avons commencé par implanter l'allocation fixe de fréquence sans réservation de canaux pour le handoff. Puis une deuxième version du simulateur propose une allocation fixe avec réservation de canaux pour le handoff. Ensuite, deux autres versions du simulateur ont été réalisées: une pour l'allocation dynamique sans réservation de canaux pour le handoff et une avec réservation de canaux pour le handoff. Cependant, la dernière version (dynamique avec réservation) est une version qui contient en fait les trois autres. En effet, il suffit d'ajuster le paramètre du nombre de canaux réservés pour le handoff à 0 pour avoir une allocation sans réservation. Par ailleurs, le choix de l'allocation dynamique est 1, 2 ou 3 selon la stratégie choisie (et donc extensible à n avec de nouveaux modules), et il suffit de choisir la valeur 0 comme paramètre pour exécuter une allocation fixe. Donc, cette version est une version complète du simulateur.

Enfin, une cinquième version a été élaborée, celle comprenant une procédure de réorganisation des canaux. Cette version comprend également toutes les autres; notons cependant qu'elle n'est réelement utile qu'aux allocations dynamiques puisque lors de l'allocation fixe, il n'y a pas de prêt de canaux.

B.2 Les structures de données

Le simulateur manipule un très grand nombre de variables. De plus, il nous est nécessaire d'accumuler un très grand nombre de données statistiques relatives à chaque cellule, entre autre pour le cas d'un réseau déséquilibré, mais également pour vérifier l'uniformité des résultats dans le cas d'un réseau uniformément chargé. Par ailleurs, les mobiles et les cellules ont plusieurs paramètres qui s'y rattachent.

Tous ces facteurs ont amené à implémenter les variables sous forme de tableaux, mais surtout, dès que cela était possible, sous forme de pointeurs. Certaines variables ont toutefois été déclarées de façon globale, tels que les mobiles ou les cellules, afin de ne pas avoir à les passer par variable dans toutes nos procédures. En effet, pour les mobiles par exemple, bien que chaque mobile est décrit par un pointeur, il faudrait passer par variable un tableau d'environ 2500 pointeurs dans les cas extrêmes, ce qui serait beaucoup trop.

En C, il est très aisé d'implémenter des structures, avec l'instruction *typedef struct*. Par exemple, si l'on veut définir un pointeur vers une cellule définie elle-même par son numéro et le nombre de mobiles actifs dans cette cellules, il suffit de définir un type appelé *Pcellule* ainsi:

```
typedef struct
{
int numero; /* Numero de la cellule */
int nbre_actifs; /* Nombre de mobiles actifs */
} * Pcellule;
```

Par exemple, si *Cell* est une variable de type *Pcellule*, il suffit de récupérer un des éléments de la structure par l'instruction *(*Cell).nbre_actifs*, ici le nombre de mobiles actifs dans la cellule.

Nous allons donc maintenant indiquer les structures qui ont été utilisées dans le simulateur.

B.2.1 Un canal radiomobile

Il est défini (cf. Fig. B.1)par un *pointeur* qui pointe vers:

- son *numéro*, relié au patron de réutilisation. Par exemple, pour un patron de réutilisation de 7 cellules, tous les canaux dans une cellule de patron numéroté 2 seront numérotés 2 modulo 7, soit encore 2, 9, 16, 23, etc...
- son *état*, i.e. *libre* ou *alloué*
- le *numéro du mobile* qui l'utilise
- le *numéro de la cellule* qui gère ce canal
- sa *réservation pour le handoff*, i.e. *Oui* ou *Non*
- le *canal suivant* que la cellule utilise, sous forme de pointeur

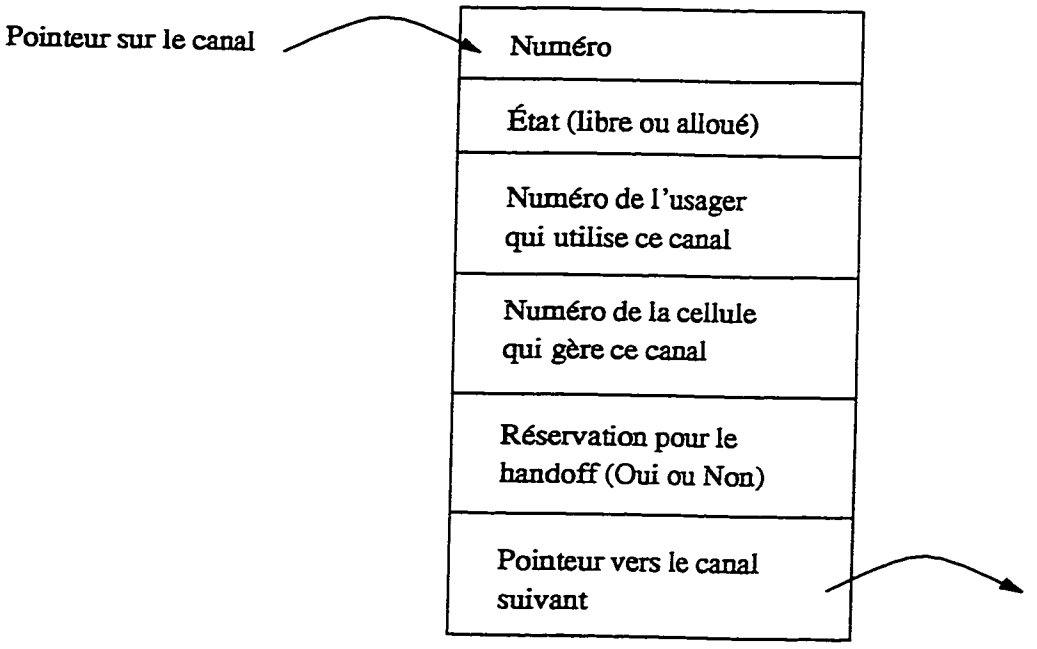


Figure B.1 Structure de l'élément *Canal*

La dernière caractéristique d'un canal montre que notre implantation des canaux dans une même cellule se fait sous forme de liste chaînée. On peut se demander alors à quoi cela sert de toujours avoir le numéro de la cellule qui gère le canal. Comme nous le verrons un peu plus loin, les mobiles pointent vers le canal qu'ils utilisent. Ceci permet, lors du réarrangement de canaux, de savoir si la cellule qui gère le canal est la même que la cellule dans laquelle se trouve physiquement le mobile, puisque cette donnée est incluse dans la structure du mobile.

B.2.2 Un mobile

Il est défini (cf. Fig. B.2) par un *pointeur* qui pointe vers:

- son *numéro* qui est un numéro absolu sur l'ensemble du réseau. Quand un mobile disparaît, on peut réutiliser son numéro par la suite.

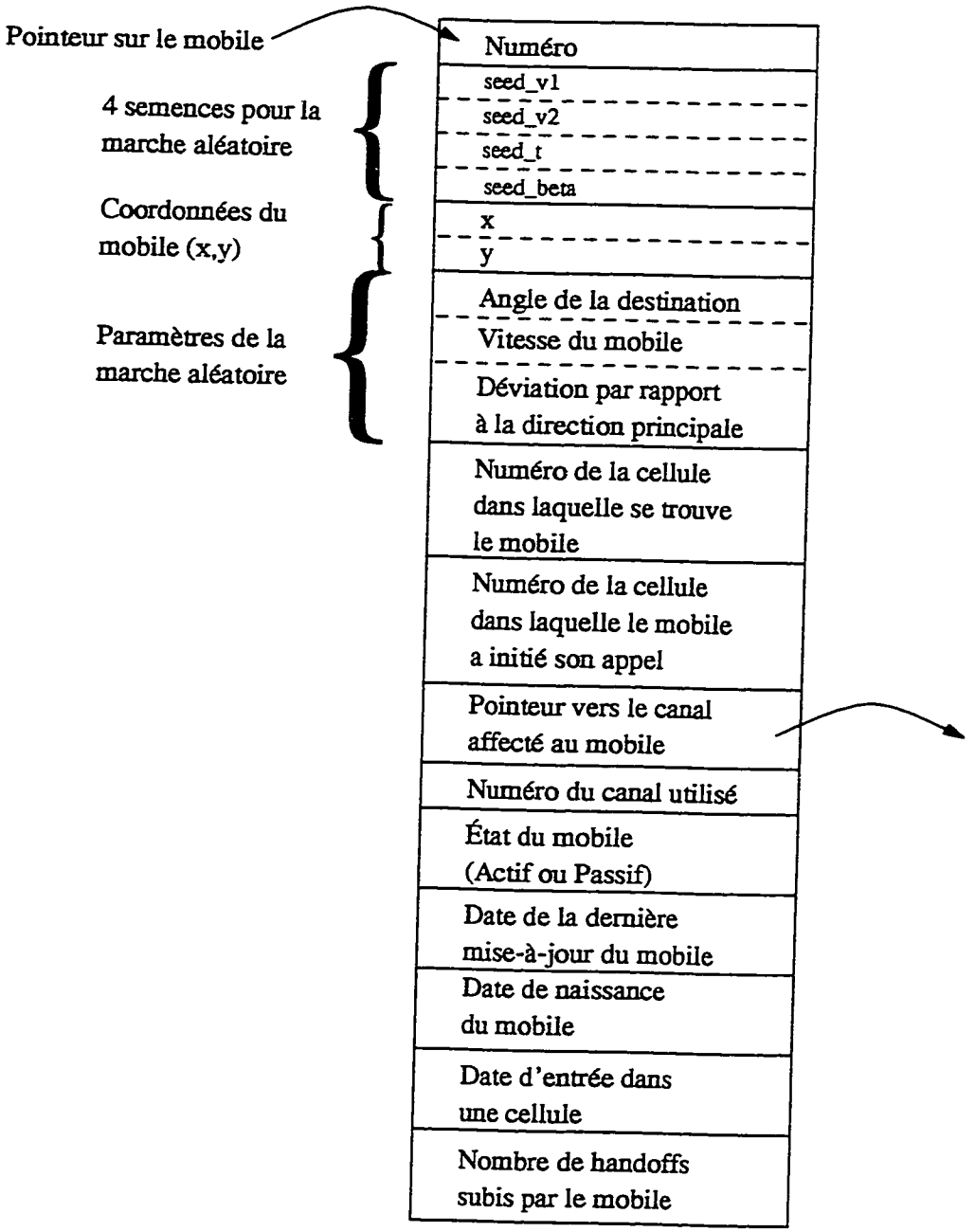


Figure B.2 Structure de l'élément *Mobile*

- les *quatre semences* pour la génération de variables aléatoires utilisées pour la modélisation de la marche aléatoire
- les *deux coordonnées* du mobile, caractérisant ainsi sa position dans le réseau
- les trois paramètres de la marche aléatoire: l'*angle de la destination finale*, la *vitesse du mobile* et la *déviation par rapport à la direction principale*
- le *numéro de la cellule* dans laquelle il se trouve
- le *numéro de la cellule* dans laquelle il a initié son appel
- un *pointeur* vers le canal affecté au mobile
- le *numéro du canal* utilisé
- son *état*, i.e. *Actif* ou *Passif*, ce qui permet de savoir dans notre tableau de pointeurs vers les mobiles quel mobile est en communication et lequel ne l'est pas
- la *date de la dernière mise à jour du mouvement* du mobile
- la *date de naissance* du mobile
- la *date d'entrée* dans une cellule
- le *nombre de handoffs* subis par le mobile

B.2.3 Le tableau de l'ensemble des mobiles

C'est une structure qui est composée de deux éléments:

- le *nombre de mobiles actifs* dans le réseau
- un *tableau de pointeurs* vers des *mobiles*

Cette variable a été laissée globale, pour des raisons de simplicité, bien que le passage par valeurs d'une telle structure soit simple et ne prenne pas trop de place,

puisque l'argument qui passerait dans une fonction serait l'adresse du pointeur vers la structure.

B.2.4 Une cellule

Elle est défini (cf. Fig. B.3) par un *pointeur* qui pointe vers:

- son *numéro*
- les *deux semences* nécessaires à la génération des processus de naissance et de mort
- les *deux paramètres* des processus exponentiels d'inter-arrivées et de mort, i.e. les moyennes
- un *tableau* donnant le numéro des *cellules voisines*
- son *numéro de patron*
- le *nombre de canaux disponibles* dans cette cellule
- le *nombre de canaux réservés au handoff*
- le *nombre de canaux libres et non réservés au handoff*
- le *nombre de canaux libres et réservés au handoff*
- un *pointeur* vers la *liste chaînée de canaux*, i.e. vers le premier canal alloué à cette cellule et qui figure donc au début de la liste chaînée
- le *nombre de communications* ayant eu lieu dans la cellule tout au long de la simulation
- le *nombre maximum d'actifs* présents *simultanément* dans la cellule
- le *nombre de mobiles actifs* servis par la cellule
- le *nombre de tentatives d'appels*

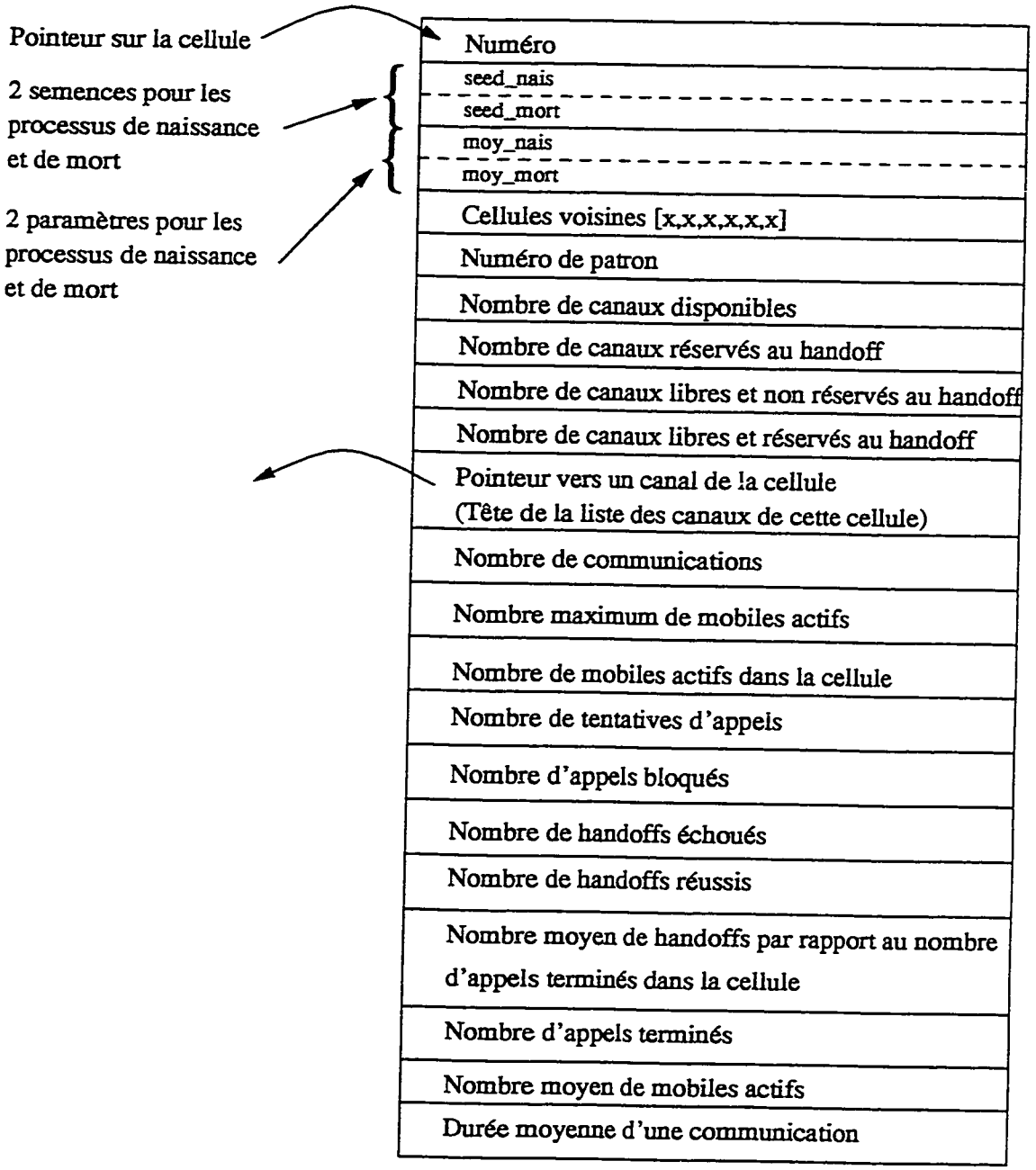


Figure B.3 Structure de l'élément *Cellule*

- le *nombre d'appels bloqués*
- le *nombre de handoffs échoués*
- le *nombre de handoffs réussis*
- le *nombre moyen de handoffs par rapport au nombre d'appels terminés dans la cellule* par cellule
- le *nombre d'appels terminés dans la cellule*
- le *nombre moyen de mobiles actifs* dans la cellule
- la *durée moyenne d'une communication* dans la cellule

L'ensemble des cellules est une variable qui est un tableau de pointeurs vers des cellules, de dimension égale au nombre total de cellules dans le réseau, 49 dans notre cas, mais modulable en fonction du choix de patron de ré-utilisation.

B.2.5 La pile d'événements

La tête de la pile événementielle est une structure dont les trois éléments sont:

- un *pointeur* vers le premier événement de la pile
- le *nombre d'événements* à venir dans la pile
- le *temps écoulé* depuis le début de la simulation

Par ailleurs, chaque événement est lui-même défini par une structure qui est définie comme suit:

- la *date* à laquelle va être exécuté l'événement

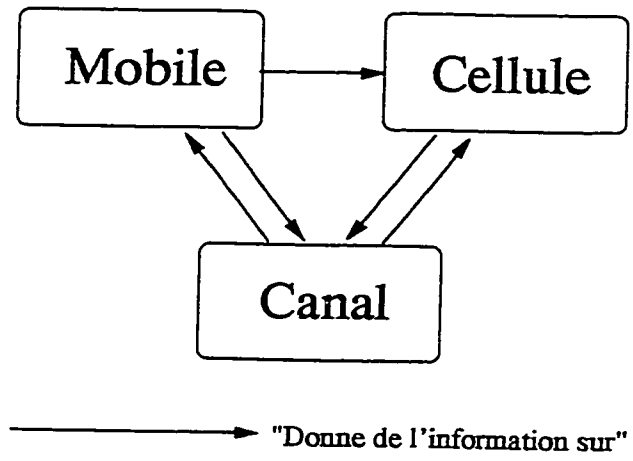


Figure B.4 Les relations entre les structures

- le *numéro du mobile* concerné par cet événement, quand cela est possible; par exemple, lors d'une naissance, on ne sait pas par avance le numéro du mobile
- le *numéro de la cellule* dans laquelle va être exécuté l'événement
- le *type d'événement*, i.e. naissance, mort, etc...
- un *pointeur* vers l'*événement suivant*

B.2.6 Remarques

Ces structures de données présentent un grand avantage, celui de retrouver rapidement quel mobile utilise quel canal dans quelle cellule, et ce à partir de l'une des trois données. En effet, à partir du mobile, on sait quel canal il utilise et dans quelle cellule. Cela est très pratique, surtout dans les procédures d'allocation et de désallocation de canal. À partir d'un canal, on sait quel est le mobile qui l'utilise et donc quelle cellule. À partir d'une cellule, on peut retrouver le nombre de canaux utilisés, savoir lesquels, et donc savoir quels mobiles sont en communication dans cette cellule. Ce 'cycle' de références croisées est donné à la figure B.4.

B.3 Un code en modules

Nous avons divisé notre programme en plusieurs modules qui sont:

- Les fichiers *.h* de déclarations
  - librairies.h
  - definitions.h
  - structures.h
  - var_glob.h
  - var_glob_ext.h
  - parametres.h
  - parametres_ext.h
- Les fichiers *.h* rattachés aux modules *.c*
  - alea.h
  - allocation.h
  - controle.h
  - events.h
  - initialisations.h
  - position.h
  - walk.h
- les modules *.c*
  - alea.c
  - allocation.c
  - controle.c
  - events.c

  - initialisations.c
  - position.c
  - walk.c
- le programme principal *simu_rau.c*

Nous allons reprendre les fichiers *.c* un par un et expliquer rapidement chaque sous-programme, qui est de toute les manières commenté à même le code. Les fichiers *.h* rattachés aux fichiers *.c* ne sont que les déclarations des procédures dont le code se trouve dans les fichiers *.c* correspondant.

B.3.1 Variables et paramètres globaux

Ce sont les fichiers *var_glob.h*, *var_glob_ext.h*, *parametres.h*, *parametres_ext.h*. Les fichiers 'ext' sont les fichiers inclus dans tous les *.c* qui utilisent les variables et paramètres globaux, qui doivent donc être déclarés *externes*. Les deux autres fichiers sont ceux inclus dans le programme principal, pour déclarer les variables et paramètres globaux.

La nuance entre variable et paramètre est mince. Elle a été introduite à des fins pratiques; les paramètres sont les variables susceptibles de varier selon les simulations: le nombre de canaux, le nombre de canaux réservés au handoff, le type d'allocation, le temps moyen d'inter-arrivées (pour le déséquilibre de charge), la durée d'une simulation, le temps entre deux mises à jour du réseau et le temps entre deux mises à jour des canaux.

Les variables globales sont le tableau des mobiles, le tableau des cellules, certaines semences, ainsi que les variables pour nos statistiques finales.

B.3.2 Les autres fichiers *.h* de déclaration

Le fichier *librairies.h* contient la liste de toutes les librairies utilisées. C'est la liste de tous les *#include*.

Le fichier *definitions.h* contient tous les *#define*: les constantes pour les générateurs de variables aléatoires, les paramètres de marche aléatoire, la durée de simulation du régime transitoire pendant lequel aucune donnée statistique n'est enregistrée, etc...

Enfin, le fichier *structures.h* contient la définition de toutes les structures nécessaires à la simulation, telles qu'énoncées précédemment, ainsi que des booléens ou autres énumérations.

B.3.3 alea.c

timer est une sous-routine qui retourne un *float*. Elle va chercher le temps écoulé depuis 1970 en secondes et micro-secondes, et à partir de là retourne une valeur modifiée de ces temps qui sera une semence. *init_rand* ne fait que transformer en *unsigned long* la valeur donnée par *timer*.

init_seed est le générateur de semences tel qu'indiqué à la section 2.4. *rand01* génère des valeurs d'une variable aléatoire uniforme dans [0,1].

Enfin, *VA_unif*, *VA_norm*, *VA_expo*, *VA_alpha*, *VA_ray* et *VA_log_norm* génèrent des valeurs de variables aléatoires respectivement uniformes dans $[a, b]$, normale, exponentielle, alpha, de Rayleigh, et log-normale. Notons que toutes ces procédures passent par valeur la semence utilisée pour chaque variable aléatoire, ce qui permet de générer des variables indépendantes.

B.3.4 allocation.c

Ce module contient cinq procédures. *allocation_canal* effectue les changements de paramètres lorsqu'un canal a été affecté à un mobile: quel canal devient alloué, à quel mobile, dans quelle cellule, s'il est réservé au handoff ou non, etc... C'est une simple allocation de canal et le choix du canal a été fait avant. Le canal est choisi soit dans *events.c* pour une allocation fixe soit dans une des trois procédures d'allocation dynamique (ou plus selon l'ajout de procédures dans le futur) *alloc_dyn1*, *alloc_dyn2* ou *alloc_dyn3*, que l'on trouve dans ce module *allocation.c*. Chacune des trois procédures correspond à l'une des trois stratégies développées dans ce mémoire. Enfin, la procédure *desallocation_canal* effectue les changements de paramètres à la fin de l'utilisation du canal pour le mobile: handoff, communication interrompue, fin (naturelle) d'une communication.

B.3.5 controle.c

Ce module affiche, soit à l'écran, soit dans un fichier, les données concernant un événement, un mobile, une cellule, un canal, ou la pile d'événements. Il a principalement servi lors de la mise au point du simulateur. En effet, il nous a permis de contrôler nos initialisations que ce soit pour les canaux, les cellules ou les mobiles. Il permet également en cours de simulation de vérifier que les changements opérés sont les bons, par exemple lors d'une réallocation de canaux.

B.3.6 events.c

Ce module comprend deux parties: la première gère la pile événementielle, et la deuxième exécute les événements eux-mêmes.

La première partie comprend donc les procédures *ins_event* et *del_event* qui insèrent et détruisent respectivement des événements dans la pile. La procédure *clear_event* efface le premier élément de la pile, qui est l'événement qui vient d'être éxécuté.

Dans la deuxième partie, on retrouve les procédures suivantes:

- *handoff*
- *update*, qui met à jour du réseau
- *birth*, qui est exécutée à la naissance de chaque mobile
- *death*, qui est exécutée à la mort de chaque mobile
- *movement*, qui met à jour les caractéristiques du mouvement du mobile
- *reorgcan*, qui réorganise les canaux lors d'allocation dynamique, ainsi qu'expliqué à la section 4.2

B.3.7 initialisations.c

Ce module contient évidemment les initialisations nécessaires au simulateur, et surtout la réservation de la place mémoire par l'instruction *malloc*:

- *init_mobiles*, pour une partie de l'initialisation des mobiles, l'autre partie se faisant lors de la naissance de chaque mobile
- *init_num_set*, qui assigne à chaque cellule un numéro de patron

- *init_canaux*, qui détermine combien de canaux sont alloués à chaque cellule, lesquels sont réservés au handoff, et surtout affecte les canaux aux cellules selon le numéro de patron déterminé précédemment
- *init_reseau*, qui fait les initialisations dans chaque cellule, dont celle du temps moyen d'inter-arrivée, qui permet de déséquilibrer le réseau si cela est nécessaire
- *init_var*, pour toutes les variables globales, telles que les variables destinées aux statistiques
- *init_event*, qui initialise la pile en lui insérant la première réorganisation du réseau, la première réorganisation des canaux pour une allocation dynamique, ainsi que la première naissance dans chaque cellule. Nous avons vu dans le mémoire que ces seules initialisations servaient à démarrer le processus événementiel.

B.3.8 position.c

num_cell permet de trouver le numéro de la cellule dans laquelle se trouve physiquement un mobile, à partir de ses coordonnées (x,y). Cela sert principalement lors de la réorganisation des canaux pour voir si la cellule qui dessert le mobile est celle où se trouve le mobile. Par ailleurs, cette procédure a d'abord servi de test lors de l'élaboration de notre simulateur.

cell_adj donne le tableau de toutes les cellules adjacentes à une cellule donnée. Pour des raisons d'uniformité, nous avons toujours pris le même ordre pour ranger les cellules adjacentes dans le tableau, conformément à la figure B.5. Cette procédure inclut le concept de réseau fermé.

Enfin, *loop_back* est la procédure qui effectue le changement de coordonnées du

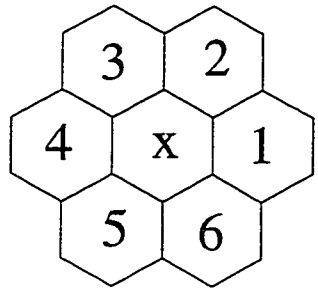


Figure B.5 Ordre de classement des cellules adjacentes dans un tableau

mobile lorsque celui-ci sort du réseau de base, et réentre dans ce réseau par un autre côté. Cela est rendu possible grâce à la procédure *num_cell* qui retourne 0 lorsque le mobile sort du réseau. Une fois que l'on sait qu'il sort du réseau, on cherche où il réentre et on change ses coordonnées.

B.3.9 walk.c

Ce module contient deux procédures. D'une part *param_walk* qui change les paramètres de la marche aléatoire. D'autre part *walk* qui effectue le mouvement du mobile connaissant les paramètres de marche aléatoire.

C'est après cette procédure que l'on regarde où est rendu le mobile et s'il a changé de cellule. Elle est appelée par la procédure de mise à jour du réseau, *update*, qui sert principalement à savoir où sont les mobiles dans le réseau, suite à leur mouvement, ainsi que par la procédure de mise à jour des caractéristiques de marche aléatoire, *movement*.

Annexe C

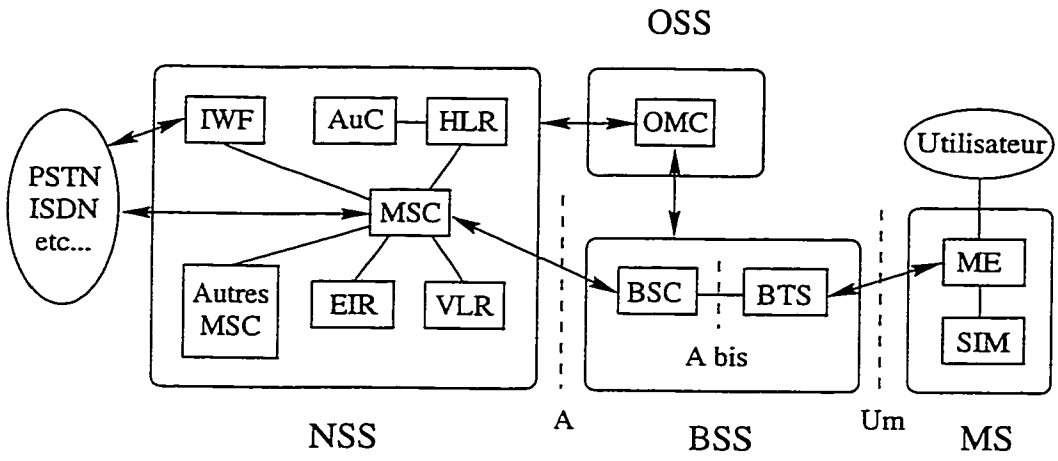
La téléphonie cellulaire: l'exemple du GSM

Afin d'illustrer rapidement la structure d'un réseau cellulaire et d'en mesurer la complexité, prenons l'exemple du GSM, très largement développé dans [18].

C.1 L'architecture du réseau GSM

L'architecture du réseau GSM est fondée sur le modèle en 7 couches OSI (Physique, Liaison, Réseau, Transport, Session, Présentation et Application). Ce réseau est divisé en trois principaux sous-systèmes: le sous-système radio (BSS), le sous-système réseau (NSS) et enfin le sous-système d'exploitation et de maintenance (OSS).

À ces trois sous-systèmes il convient d'ajouter la station mobile (MS) constituée du combiné lui-même (ME) et du module SIM (Subscriber Identity Module) qui est en quelque sorte la carte d'identité de l'abonné. Cependant, certains préfèrent inclure la station mobile dans le sous-système radio; tout est question d'interprétation de la norme, mais cela ne change en rien le concept du GSM. Le schéma général de l'architecture GSM est décrit à la figure C.1. On note immédiatement que cette architecture est découpée en composantes fonctionnelles. Cette souplesse présente l'avantage de laisser une petite liberté aux différents exploitants présents sur le marché.



MSC : Mobile services Switching Center
HLR : Home Location Register
VLR : Visitor Location Register
AuC : Authentification Center
EIR : Equipment Identity Register
IWF : InterWorking Functions

OMC : Operation and Maintenance Center
BSC : Base Station Center
BTS : Base Transceiver Station
MS : Mobile Station
ME : Mobile Equipment
SIM : Subscriber Identity Module

Figure C.1 L'architecture du réseau GSM

C.2 Le module SIM

Ce module est la grande nouveauté que GSM a introduite dans les systèmes radiomobiles et confère de par sa fonction une dimension européenne au GSM. Ce module se présente sous la forme d'une carte à puce, comme les cartes de crédit, que l'on insère dans le combiné. Ainsi, ce qui identifie un abonné n'est pas le combiné qu'il achète mais la carte SIM qu'il peut enlever et remettre à loisir. Cela peut lui permettre, par exemple, lorsque son combiné est défectueux (plus de batteries par exemple), d'emprunter le combiné de son collègue, d'en retirer le module SIM et d'y insérer le sien; alors, la facturation se fera à son nom et non au nom de son collègue. Le service rendu par cette interchangeabilité est également très utile lors de la location de voitures qui peut permettre d'utiliser le téléphone fourni avec la voiture et d'être débité sur son propre compte.

On peut ainsi multiplier à la demande de l'utilisateur, ou presque, les utilisations de la carte SIM. En effet, grâce à sa puce, le module SIM peut contenir des informations supplémentaires sur l'usager et même des données que l'utilisateur peut entrer lui-même, comme des numéros fréquemment appelés, différentes configurations du terminal, etc... Elle contient également les clefs d'identification et de cryptographie nécessaires à la confidentialité des appels.

Par ailleurs, la carte SIM intègre parfaitement le concept d'itinérance qui est la base du GSM et qui permet donc à tout utilisateur d'appeler en tout point du réseau GSM, mais également parfois depuis un réseau dans un pays voisin.

Enfin, détail primordial, la carte SIM n'est aucunement requise pour les appels d'urgences comme le 911...

C.3 Le sous-système radio (BSS)

Ce sous-système est en contact direct avec l'utilisateur, via l'interface radio (U_m), et assure la transmission et la réception des données sur le canal radio. Il sert donc de lien entre la station mobile (MS) et le commutateur du service mobile (MSC). Il est composé de deux grandes unités: la station de base (BTS) et le contrôleur de station de base (BSC). Le BSS gère, entre autres, des fonctions telles que le saut de fréquences, l'encodage, le décodage ou l'entrelacement des trames à la transmission.

La station de base (BTS), unique dans chaque cellule, est en lien direct avec le mobile. Elle gère les liaisons radio avec les mobiles. Typiquement, elle peut gérer entre 20 et 40 communications par cellule. Elle contient l'équipement radio nécessaire y compris l'antenne. L'élement important d'une BTS est le transcodeur-adaptateur

de taux de transmission (TRAU) qui assure la liaison entre le codage du GSM et le codage du réseau fixe, ainsi que, comme son nom l'indique, l'adaptation du débit. Notons cependant, que pour des raisons pratiques, il se peut que le TRAU, bien qu'étant défini comme partie intégrante d'une BTS, puisse se trouver physiquement soit sur le site de la BTS, soit sur le site du BSC, soit entre les deux, ce qui offre une certaine marge de manœuvre à l'opérateur.

Le BSC peut être en charge de plusieurs BTS et contrôle ainsi l'interface radio et les procédures de handoff. Si toutefois le BSC et la BTS sont physiquement délocalisés, on introduit entre eux l'interface 'A bis'. Les protocoles utilisés sont les protocoles LAPD des réseaux RNIS. Cette interface a été créée à des fins économiques: si dans les villes il est plus aisé de grouper BSC et BTS, dans des régions moins denses, comme à la campagne, cela est plus coûteux que de les séparer. En effet, en zone rurale, il sera plus intéressant de décentraliser le BSC pour qu'il contrôle un nombre maximum de BTS, tandis qu'en ville, le traffic est tel qu'il vaut mieux parfois les relier directement, puisque, de toutes les manières, un plus grand nombre de BSC sera nécessaire.

C.4 Le sous-système réseau (NSS)

Son rôle principal est d'assurer les communications des utilisateurs du GSM entre eux ou avec les abonnés des autres réseaux téléphoniques. Il a donc les fonctions d'un commutateur, ce qui comprend la commutation vers les réseaux fixes, mais aussi en sens inverse, il sert à localiser les utilisateurs GSM. Il contient donc les

bases de données concernant les utilisateurs: l'enregisteur de localisation nominal (HLR), l'enregistreur de localisation des visiteurs (VLR), et enfin l'enregistreur d'identification des équipements (EIR). Il est par ailleurs séparé du BSS par l'interface 'A', que nous ne détaillerons pas ici.

Le commutateur du service mobile (MSC) ainsi que les deux registres HLR et VLR forment un tout. Le rôle du MSC est d'établir les liens avec les autres réseaux, que l'utilisateur du GSM soit appelé ou appelant. Cependant, il peut arriver dans certains cas que le MSC lui-même ne soit pas apte à communiquer directement avec certains réseaux; pour les atteindre, il doit alors utiliser des passerelles nommées IWF (InterWorking Functions).

Lorsqu'un abonné GSM se fait appeler, il n'a aucune raison a priori de se trouver dans sa zone d'enregistrement et son numéro d'appel n'est donc plus suffisant pour le rejoindre. L'enregistreur de localisation nominal (HLR) assure donc une traduction du numéro de l'abonné vers le MSC le plus proche de l'endroit où se trouve l'abonné GSM à l'instant t. Mais le HLR n'a pas la possibilité de diriger lui-même les appels. Le HLR tire ses informations de l'enregistreur de localisation des visiteurs (VLR): chaque fois qu'un abonné GSM entre dans sa nouvelle zone de localisation, son unité portative le détecte et transmet au HLR les informations nécessaires. Le VLR, attaché à un ou plusieurs MSC, reçoit de plus des informations utiles à l'authentification de l'abonné et à sa sécurité. Dans les faits, les constructeurs ont associé un VLR à chaque MSC, et l'on parle communément de MSC-VLR.

Par ailleurs, il faut noter que le centre d'authentification (AuC) est une subdivision du HLR dont la fonction principale est la gestion des données concernant la sécurité pour l'authentification des abonnés. L'AuC peut être physiquement séparé ou non de son HLR, mais les autorités normatives ont voulu insister sur l'aspect sécuritaire

du GSM et l'AuC constitue ainsi une barrière supplémentaire à franchir pour violer le système.

Enfin, il se peut en général que le commutateur local du réseau fixe ne puisse interroger directement le HLR; il le fait donc par l'intermédiaire d'un commutateur d'accès (GMSC), via le système de signalisation CCITT n°7. L'EIR, quant à lui, n'a aucun lien direct avec les abonnés puisqu'il identifie l'unité mobile en tant qu'équipement (ME) et permet de contrôler l'accès qui se ferait au réseau à partir d'équipements non homologués ou volés puisque chaque équipement possède son propre numéro d'identification (IMEI).

C.5 Le sous-système d'exploitation (OSS)

Gérer un réseau comme celui du GSM n'est pas chose aisée et bien sûr doit se faire à distance. Les principales fonctions de l'OSS sont donc d'assurer la gestion des abonnés et le bon fonctionnement du réseau, c'est-à-dire, d'une part le faire tourner, et d'autre part, en assurer la maintenance. La gestion des abonnés est divisée en deux parties: d'une part, la localisation des abonnés quand ils se font appeler et d'autre part la facturation, ce qui correspond, en un sens, à la localisation des abonnés GSM losqu'ils appellent.

C.6 La gestion du handoff

Il existe trois sortes de *handoff* (ou *handover* ou *relève*) possibles. La première est la relève de sauvetage (*rescue handover*) lorsque la probabilité que la communication

soit coupée est trop grande. La seconde est la relève de réclusion (*confinement handover*) dont le but est de minimiser le niveau d'interférences. Et enfin la troisième est la relève de surcharge (*traffic handover*) lorsque certaines cellules adjacentes sont moins occupées que d'autres, ce qui permet de limiter l'encombrement des cellules.

Il est parfois difficile de gérer les handoffs à cause des conflits possibles entre les différents critères. L'exemple typique est l'alternative à prendre lorsqu'une cellule est surchargée alors que l'emprunt de canaux inutilisés dans les cellules voisines engendrerait plus d'interférences. La gestion du handoff est très proche de celle de l'assignation de canaux en début de communication, à ceci près, qu'ici, l'appel existe déjà, mais il faut gérer, en plus, le changement de cellule, et donc le nouveau routage.

Les phénomènes de handoff sont généralement préparés par le système et la communication n'est pas brutalement coupée. Cependant, il peut arriver pour une raison quelconque que la communication soit tout de même interrompue. Dans certains cas, il est même possible au système de rétablir la communication. Cette procédure est donc presque identique à celle de l'initialisation d'un appel, à ceci près que le système doit avoir en mémoire quelques données concernant l'appel.

Par ailleurs, il est important d'introduire le numéro d'identité de la station de base (BSIC). Ce numéro n'est pas un numéro unique d'identification mais plutôt un code de couleur, en référence à un coloriage de la carte de couverture du réseau, puisque plusieurs cellules ont le même BSIC. Ce nombre de 6 bits aide un mobile à reconnaître les fréquences à utiliser dans les différentes cellules. Cela est particulièrement utile près des frontières entre deux réseaux. En effet, il se peut, et cela arrive relativement souvent, qu'à la frontière, le mobile reçoive deux signaux sur la même fréquence, mais venant de deux réseaux de mobiles différents. L'unité mobile effectue alors son

choix de signal à partir du BSIC. Ce choix intervient également lors du contrôle de puissance entre deux cellules adjacentes.

C.7 La localisation

Lorsque l'abonné s'inscrit, il le fait dans un PLMN (Public Land Mobile Network) donné; notons qu'il y a environ deux à trois opérateurs par pays, donc deux à trois réseaux indépendants par pays. L'accès aux autres PLMN est bien sûr possible, mais parfois sous certaines conditions, c'est-à-dire qu'il se peut que l'abonné ne puisse avoir accès à tous les services des autres PLMN, dépendant de son abonnement initial.

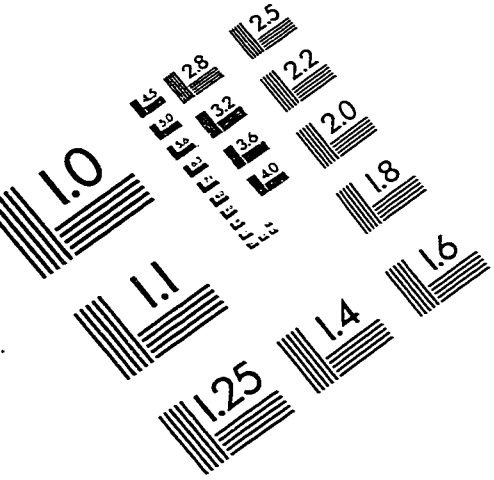
Ainsi que nous l'avons vu précédemment, ce sont les HLR et VLR qui sont principalement en charge de la localisation. Le HLR n'est qu'une base de données intelligente, sans aucune possibilité de diriger elle-même les appels. Toutefois, c'est le HLR qui informe, lors d'un changement de cellule, l'ancien et le nouveau MSC-VLR du changement de position de l'abonné. On a donc une seule fonction de HLR, mais l'opérateur peut décider si le besoin s'en fait ressentir, d'avoir plusieurs équipements HLR répartis en plusieurs points du réseau.

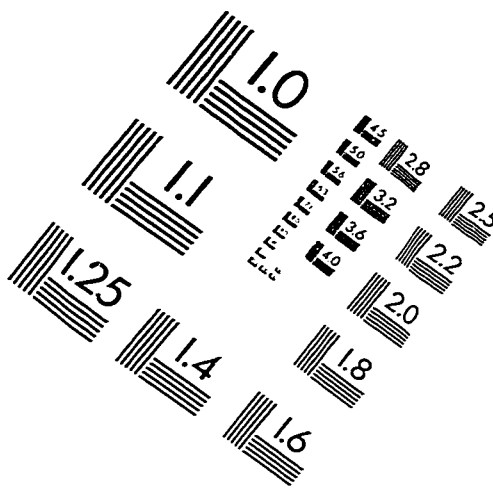
Il est intéressant de remarquer que, en réalité, l'information de la localisation est enregistrée à trois endroits en même temps dans le réseau: dans le HLR et le MSC-VLR concerné, mais également dans le module SIM se trouvant dans la station mobile, bien que ce dernier ait un rôle seulement passif dans le routage.

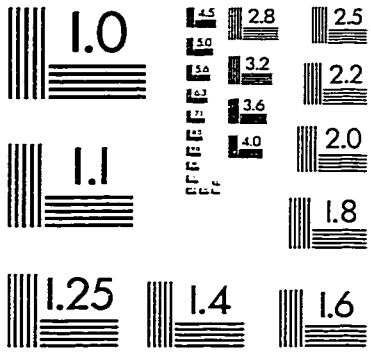
C.8 La sécurité

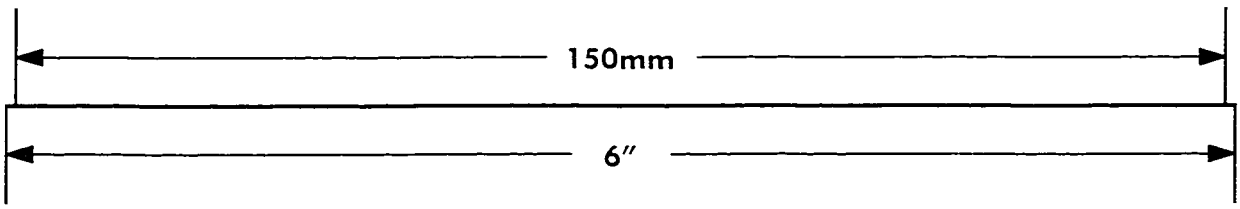
Elle intervient à plusieurs niveaux: d'une part, l'utilisateur veut que ses conversations ou ses données restent confidentielles, et d'autre part, l'opérateur ne veut pas que n'importe qui puisse entrer n'importe comment dans son réseau, utiliser ses ressources, et surtout ne pas payer, ou faire payer un autre usager à sa place. Ces procédures de cryptage et d'authentification se font à l'aide d'algorithmes qui tournent à partir de deux valeurs: une clef secrète d'identification de l'utilisateur, K_i, que l'usager lui-même ne connaît pas afin d'assurer une plus grande sécurité, et un nombre choisi au hasard entre 0 et $2^{128} - 1$. On compare alors les résultats obtenus au niveau du réseau et au niveau du mobile. Pour le cryptage un algorithme supplémentaire est utilisé à partir d'une autre clef, K_c, qui est en fait issue du premier algorithme et qui est donc une donnée temporaire contenue par la carte SIM tout au long de la communication.

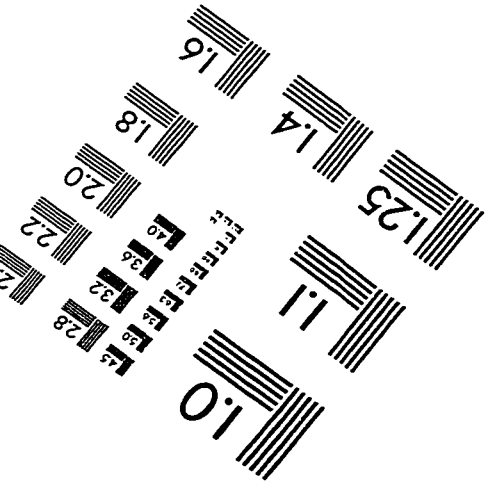
IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)

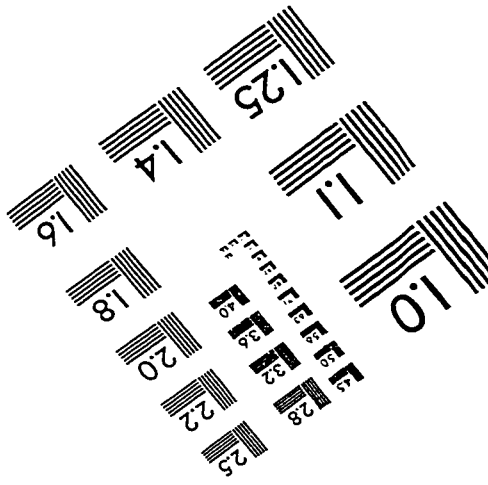












APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved