POLYPUBLIE

Évaluation du problème de déficit de puissance sur le lien descendant dans les réseaux cellulaires CDMA

Steve Tsang-Kwong-U.

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	2000
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Mémoire de maîtrise/Master's thesis
URL de PolyPublie PolyPublie URL	https://publications.polymtl.ca/8718/
Conditions d'utilisation Terms of use	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence Citation	Tsang-Kwong-U., S. (2000). Évaluation du problème de déficit de puissance sur le lien descendant dans les réseaux cellulaires CDMA [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/8718/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche Advisors	Brigitte Jaumard, & Roland P. Malhamé
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

ÉVALUATION DU PROBLÈME DE DÉFICIT DE PUISSANCE SUR LE LIEN DESCENDANT DANS LES RÉSEAUX CELLULAIRES CDMA

STEVE TSANG-KWONG-U
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 (M.Sc.A.)
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
NOVEMBRE 2000

© Steve TSANG-KWONG-U, 2000.

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

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.

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

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

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

0-612-60917-0

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉVALUATION DU PROBLÈME DE DÉFICIT DE PUISSANCE SUR LE LIEN DESCENDANT DANS LES RÉSEAUX CELLULAIRES CDMA

présenté par : TSANG-KWONG-U Steve

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès Sciences Appliquées

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

M. HACCOUN David, Ph.D., président
Mme JAUMARD Brigitte, T.Doctorat, T.Hab., membre et directeur de recherche
M. MALHAME Roland, Ph.D., membre et co-directeur de recherche
M. BÉGIN Guy, Ph.D., membre

À toute ma famille :

mes parents Georges & Lee-Ping,

ainsi que ma soeur Doris

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers mon directeur de recherche Dr. Brigitte Jaumard et mon codirecteur Dr. Roland Malhamé pour leurs précieux conseils et soutien durant mon travail de recherche. Je les remercie également de m'avoir accordé une aide financière durant toute la durée de ma maîtrise.

Je remercie aussi mon école en France, L'École Supérieure d'Électricité (Supélec), la direction des affaires Internationales de m'avoir permis d'effectuer ma dernière année à l'École Polytechnique de Montréal, en particulier Mme Catherine Dao-Duy, Mme Dominique de Swarte, et Mme le Glaunec ma tutrice.

Je tiens également à remercier les autres étudiants du GERAD qui ont su créer une ambiance amicale et productive : Marie-Josée Méthot, Loïc Cadoret, Alban Durrenbach, Pascal Labit, Tekogan Hemazro, Sylvain Perron, Jules Degila, Ovarith Troeung, Cyrille Klam et d'autres que j'oublie certainement...

Je tiens enfin à remercier tous mes amis qui m'ont accompagné et soutenu durant mon séjour à Montréal : Lionel, Brice, Youenn, Pierre-Frederic, Guillaume, Marc et Jérôme et Jérôme, Latdavan, Nadia, Annie, Pascale, Josée, Guillaume, Frédéric, et tous les autres que je ne peux citer faute de place, mais qui je suis sûr, se reconnaîtront.

RÉSUMÉ

Le but de ce mémoire est de présenter une analyse de la capacité d'un réseau cellulaire utilisant la technologie d'accès multiple CDMA, dans le sens descendant. Le sens descendant correspond à la communication dans le sens de la cellule vers le téléphone mobile de l'usager. Notre étude s'intéresse aux limitations de puissance de l'antenne de la station de base, et tente de déterminer la probabilité qu'une station de base, du fait du trafic existant, soit appelée à dépasser la puissance maximale disponible sur le site.

Notre approche diffère de la plupart des analyses de capacité qui ont été faites, et qui s'intéressent souvent uniquement au sens montant, sens de communication du mobile vers l'antenne. Cela s'explique par le fait que le mobile est à priori l'élément le plus critique dans le réseau. Du fait de sa miniaturisation et de sa "mobilité", le mobile ne dispose que d'une faible quantité de puissance. Il peut également arriver que ce soit l'interférence totale perçue par la station de base qui gère leur trafic, qui constitue le facteur limitatif dominant pour la capacité réelle de la cellule. La plupart des articles de la littérature considère que la puissance disponible à l'antenne de la station de base est infinie, ou du moins suffisante pour satisfaire toutes les demandes des usagers.

Dans la réalité, il en est autrement et la puissance de l'antenne peut ainsi se trouver en défaut. Dans ce mémoire nous tentons d'établir les conditions précises pour qu'une telle situation se matérialise. Nous présenterons également un outil de simulation de réseaux cellulaires CDMA, dont le rôle est d'imiter les attributions des usagers aux cellules en respectant ses différentes règles de fonctionnement.

ABSTRACT

The purpose of this study is to present an analysis of the forward link capacity of a cellular network using CDMA technology. The forward link corresponds to the link from the base station to the mobile phone of the user. Our study deals with the limitations of power of the base station, and tries to evaluate the probability that a base station need more power than available to satisfy all the requests.

Our treatment differs from that of other studies of capacity in the literature because it is only the reverse link (from the mobile to the base station) which is of interest. This is easy understandable as the mobile appears to be the most critical part of the network. Indeed, due to its miniaturisation and its mobility, a mobile has only little power storage available. Also, the interferences generated by the set of active mobiles can easily become the limiting factor for the capacity of the cell. In many papers about capacity, the base station is assumed to have infinite power or enough power to accommodate all the users.

In a real network, a base station has only limited power and thus a power shortage at the base station can occur. In this thesis, we will attempt to understand how and when such a situation may arise.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vi

ABSTRACT vii

TABLE DES MATIÈRES viii

LISTE DES FIGURES xi

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES xv

LISTE DES TABLEAUX xvi

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1: PRÉSENTATION DU CDMA 4

1.1 Les techniques d'accès multiple 4

1.1.1 L'AMRF ou FDMA 4

1.1.2 L'AMRT ou TDMA 5

1.1.3 Le CDMA ou AMRC 7

1.2 Fonctionnement d'un réseau AMRC/IS-95 12

1.2.1 Le lien descendant 12

1.2.2 Le lien montant 17

1.2.3 Le contrôle de puissance 19

1.2.4 Le changement de cellule en réseau cellulaire AMRC 24

1.2.5 Le facteur d'utilisation de la voix 31

CHAPITRE 2: LE DÉFICIT DE PUISSANCE 33

2.1 Présentation 33

2.2 Hypothèses 34

2.3 Principe de la méthode 34

2.4 Interférences dans le sens descendant 36

2.4.1 Interférences provenant de la même cellule 36

2.4.2 Interférences provenant des autres cellules 37

2.5 Déficit de puissance pour une cellule isolée 41

2.5.1 Puissance émise 41

2.5.2 Nombre d'utilisateurs maximal 44

2.5.3 Probabilité de blocage 45

2.6 Intégration du facteur d'utilisation de la voix 48

2.6.1 Expression de la puissance émise 48

2.6.2 Nombre limite d'usagers 50

2.7 Résultats pour le cas d'une cellule isolée 51

2.7.1 Expressions des α_{i0} 51

2.7.2 Premières analyses 52

2.7.3 Répartition uniforme suivant la distance 55

2.7.4 Répartition uniforme dans l'espace 58

2.8 Comparaison avec la probabilité de blocage dans le sens montant . . 63

CHAPITRE 3: ÉTUDE POUR UNE CELLULE NON ISOLÉE . . 69

3.1 Étude de l'interaction entre deux cellules 69

3.2 Modélisation des interférences 74
3.2.1 Simplification de l'expression 75
3.3 Formule finale pour la puissance émise 76
3.4 Modélisation symétrique 78
3.5 Méthode matricielle 80
3.6 Probabilité de blocage 84
3.6.1 Probabilité de dépassement du seuil 84
3.6.2 Probabilité d'avoir N_0 usagers dans une cellule 84
3.6.3 Probabilité totale 85
3.6.4 Probabilité totale pour la méthode symétrique 85
3.7 Intégration du facteur de voix 86
3.8 Résultats pour le cas d'une cellule non isolée 87
3.8.1 Calcul du $\overline{\alpha_j}$ 87
3.8.2 Calcul du $\overline{\frac{alpha_{i0}}{alpha_{ij}}}$ 88
3.8.3 Courbes de résultats 92
3.8.4 Cas particulier de la méthode matricielle 99
3.9 Comparaison avec la probabilité de blocage dans le sens montant . . 99

CONCLUSION **104**

BIBLIOGRAPHIE **107**

LISTE DES FIGURES

1.1 Répartition des ressources en AMRF 5
1.2 Répartition des ressources en AMRT 6
1.3 Répartition des ressources en FDMA/TDMA 7
1.4 Répartition des ressources en AMRC 8
1.5 Étalement de bande par sauts de fréquence 9
1.6 Multiplication du signal par la séquence aléatoire 10
1.7 Étalement par séquence directe 11
1.8 Signaux transmis sur le lien descendant 13
1.9 Canal de trafic sur le lien montant 18
1.10 Handoff Classique 26
1.11 Soft-handoff en AMRC 27
1.12 Utilisation des seuils dans le soft-handoff 30

2.1 Répartition des cellules en 3 catégories 38
2.2 Distances aux stations de base des différentes cellules 39
2.3 Symétrie du problème 40
2.4 Variations de I_{ac}/I_0 pour différents valeurs de r 41
2.5 Notations adoptées 42
2.6 Probabilité de dépasser N_{max} en considérant différents niveaux de facteurs de voix 51
2.7 Distance maximale des usagers 53
2.8 Puissance émise pour différentes distances des usagers 54

2.9 Probabilité de dépassement de seuil, cellule isolée, répartition uniforme suivant la distance, sans facteur de voix. La distance en km représente le rayon de la cellule 59

2.10 Déficit de puissance, cellule isolée, répartition uniforme suivant la distance, sans facteur de voix 59

2.11 Dépassement de seuil, cellule isolée, répartition uniforme suivant la distance, facteur de voix de 40% 60

2.12 Déficit de puissance, cellule isolée, répartition uniforme suivant la distance, facteur de voix de 40% 60

2.13 Dépassement du seuil, cellule isolée, répartition uniforme dans l'espace, sans facteur de voix 62

2.14 Déficit de puissance, cellule isolée, répartition uniforme dans l'espace, sans facteur de voix 62

2.15 Dépassement de seuil, répartition uniforme dans l'espace, cellule isolée, facteur de voix de 40% 64

2.16 Déficit de puissance, répartition uniforme dans l'espace, cellule isolée, facteur de voix de 40% 64

2.17 Probabilité de blocage dans le sens montant 66

2.18 Comparaison des probabilités de blocage dans les deux sens - répartition uniforme suivant la distance 67

2.19 Comparaison des probabilités de blocage dans les deux sens - répartition uniforme dans l'espace 67

3.1 Interactions entre 2 cellules 70

3.2 Comparaison de la puissance émise en fonction du nombre d'utilisateurs dans les cellules 79
3.3 Différences de puissance entre la méthode 1, la méthode symétrique, et la puissance émise pour une cellule isolée 80
3.4 Notations 87
3.5 Moyenne des pertes en dB, R=1 km 89
3.6 Moyenne des pertes pour un rayon de cellule de 1 km et une cellule du premier anneau voisin 90
3.7 Moyenne des rapports des pertes en dB 91
3.8 Méthode 1, répartition uniforme suivant la distance, cellule non isolée, sans facteur de voix 93
3.9 Méthode symétrique, cellule non isolée, répartition uniforme suivant la distance, sans facteur de voix 93
3.10 Méthode 1, cellule non isolée, distribution uniforme dans l'espace, sans facteur de voix 94
3.11 Méthode symétrique, cellule non isolée, distribution uniforme dans l'espace, sans facteur de voix 94
3.12 Méthode 1, cellule non isolée, distribution uniforme suivant la distance, facteur de voix de 40% 97
3.13 Méthode symétrique, cellule non isolée, distribution uniforme suivant la distance, facteur de voix de 40% 97
3.14 Méthode 1, cellule non isolée, distribution uniforme dans l'espace, facteur de voix de 40% 98
3.15 Méthode symétrique, cellule non isolée, distribution uniforme dans l'espace, facteur de voix de 40% 98

3.16 Comparaison des deux méthodes pour une distribution uniforme suivant la distance, avec facteur de voix 100
3.17 Comparaison des deux méthodes pour une distribution uniforme dans l'espace, avec facteur de voix 100
3.18 Comparaison des probabilités de blocage pour une distribution uniforme suivant la distance - Méthode 1 102
3.19 Comparaison des probabilités de blocage pour une distribution uniforme dans l'espace - Méthode 1 102
3.20 Comparaison des probabilités de blocage pour une distribution uniforme suivant la distance - Méthode symétrique 103
3.21 Comparaison des probabilités de blocage pour une distribution uniforme dans l'espace - Méthode symétrique 103

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

CDMA	Code Division Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
AMPS	Advanced Mobile Phone System
SNR	Signal to Noise Ratio
CIR	Carrier to Interference Ratio
MTSO	Mobile Telephone Switching Office
Erl	Erlang
W	Watt
P_{pilote}	Puissance du canal pilote émis par la station de base
P_i	Puissance allouée au mobile i
P_T	Puissance totale émise par une station de base
α_{i0}	Atténuation du signal entre la station de base principale et le mobile i
α_{ij}	Atténuation du signal entre la station de base voisine j et le mobile i
$\frac{C}{I}$	Rapport signal sur interférences
γ	Valeur du C/I imposé par le contrôle de puissance
$\frac{E_b}{I_0}$	Rapport signal-sur-bruit
W/R	Gain de traitement
$\mathcal{N}_{therm}$	Puissance du bruit thermique sur toute la largeur de bande

LISTE DES TABLEAUX

1.1 Lois de passage d'une liste à l'autre 32

2.1 Valeurs des seuils pour une cellule isolée 57

INTRODUCTION

La téléphonie mobile a connu une croissance extrêmement rapide durant ces dernières années, passant d'un outil de communication réservé à une minorité de personnes à un produit de consommation grand public. Les appareils se miniaturisent, les tarifs baissent... Ce qui fait qu'aujourd'hui, n'importe qui peut disposer d'un téléphone portable s'il en sent l'utilité, et des fois même s'il n'en sent aucune; mais cela est une autre histoire...

Cette croissance oblige à améliorer les systèmes de téléphonie mobile, pour pouvoir proposer des qualités de service toujours meilleures. La prochaine génération de téléphones mobiles proposera ainsi de nouveaux services, et notamment des applications multimédias telles que la transmission d'images et de vidéos en même temps que le son.

L'augmentation du nombre d'abonnés oblige les systèmes à évoluer vers des techniques offrant des capacités de plus en plus importantes. La capacité correspond à la quantité d'usagers que peut supporter le réseau (celle-ci est souvent donnée en Erlang qui est une unité de mesure du trafic). En Amérique du Nord, la première génération de téléphonie mobile, analogique, s'appelait AMPS (*Advanced Mobile Phone System*). AMPS utilisait le FDMA (Frequency Division Multiple Access) ou AMRF (Accès Multiple par Répartition de Fréquence), dont nous détaillerons le fonctionnement dans la suite. La deuxième génération de téléphonie mobile allait entrer dans l'ère du numérique avec plusieurs types de systèmes : l'IS-54, introduit en 1992 et qui utilise le TDMA/FDMA (TDMA étant l'acronyme pour Time Division Multiple Access ou AMRT, Accès Multiple par Répartition de Temps en français) mais qui n'augmentait pas de beaucoup la capacité par rapport à AMPS,

l'IS-95 proposé par Qualcomm en 1990, adopté en 1993, et qui utilise le CDMA (Code Division Multiple Access) ou AMRC (Accès Multiple par Répartition de Code) en français. *Dans la suite, le terme CDMA sera plus souvent utilisé.* Il permet ainsi d'augmenter la capacité d'un facteur beaucoup plus grand que ne le permet l'IS-54. Cependant, il est difficile de donner un chiffre précis sur cette augmentation et beaucoup d'études sont faites sur ce sujet ([GJP+91],[VV93],[VVGZ94],[R.94]).

Le but de notre étude consiste d'ailleurs à développer une estimation de la capacité d'un réseau utilisant le CDMA, comme l'IS-95. Nous nous intéressons cependant seulement à un aspect de la capacité : celui qui correspond au *sens descendant*, c'est-à-dire que nous allons étudier les liens de la station de base vers le mobile seulement.

Le mémoire qui suit est structuré de la manière suivante :

- Le chapitre 1 "*Présentation du CDMA*" est une présentation générale des différentes notions nécessaires à la compréhension des chapitres suivants. Nous parlerons notamment des différentes techniques d'accès multiples, et des caractéristiques de fonctionnement d'un réseau cellulaire IS-95.

- Le chapitre 2 "*Le déficit de puissance*" expose les objectifs de notre étude, explique ce qu'est le déficit de puissance et comment nous proposons d'évaluer la probabilité que ce phénomène survienne . Ce chapitre s'attachera uniquement au cas d'une cellule isolée. Nous présenterons les calculs théoriques, que nous illustrerons en les appliquant à différents scénarios.

- Le chapitre 3 "*Étude pour une cellule non isolée*" continue l'étude faite dans le chapitre 2 avec une extension de la théorie à une cellule intégrée cette fois-ci à un réseau et non plus isolée. Ce cas est sans doute le plus intéressant car, il

est rare d'avoir un réseau de téléphonie mobile constitué d'une seule cellule...

Les contributions de ce mémoire sont les suivantes.

- Nous présentons une manière d'estimer rapidement la capacité dans le sens descendant d'une cellule utilisant le CDMA/IS-95, sans avoir besoin à recourir à de longues simulations.

- La méthode proposée permet de considérer plusieurs types de répartitions d'usagers. D'ailleurs, nous avons considéré différents types de répartitions alors que la plupart des articles ne considèrent que le cas d'une répartition uniforme.

- Nous avons étudié une modélisation des influences des interférences extra-cellulaires.

- Nous avons développé une nouvelle méthode que nous avons appelé "matricielle" pour l'étude de la capacité de cellules non isolées . Cette méthode permet de considérer plusieurs types de scénarios dans l'étude de cellules non isolées. Nous ne sommes pas limités comme dans les études de la littérature au cas homogène, dans lesquelles toutes les cellules sont identiques.

CHAPITRE 1

PRÉSENTATION DU CDMA

Le descriptif de la norme CDMA que nous allons faire s'inspire principalement du livre[LM98] "CDMA Systems Engineering Handbook" écrit par Jhong Sam Lee et Leonard E. Miller. Nous invitons d'ailleurs les personnes souhaitant avoir plus d'informations sur le CDMA et la norme IS-95 à s'y reporter.

1.1 Les techniques d'accès multiple

Le principe de l'accès multiple, comme son nom l'indique, est de permettre à plusieurs usagers d'accéder aux ressources en même temps. Il faut donc partager les différentes ressources (principalement la bande de fréquence allouée au réseau) entre tous les usagers. La difficulté qui se pose lorsque plusieurs usagers veulent utiliser la bande de fréquence simultanément, c'est de pouvoir séparer tous les signaux entre eux, et de retrouver ainsi les messages envoyés par chaque usager. Il existe plusieurs techniques d'accès multiples : l'AMRT ou TDMA, l'AMRF ou FDMA, et dernièrement l'AMRC ou CDMA.

1.1.1 L'AMRF ou FDMA

En AMRF, la bande de fréquence disponible est divisée en différents canaux. Chaque canal correspond à une modulation sur une fréquence différente, que l'on appelle (fréquence) sous-porteuse. Lorsqu'un usager souhaite établir une communication, on lui assigne une des fréquences sous-porteuses. Chacun des usagers a donc une fréquence propre. Pour retrouver un signal provenant d'un usager précis,

il suffit donc de se placer sur la sous-porteuse correspondante et de filtrer autour en vue d'éliminer les signaux des autres utilisateurs.

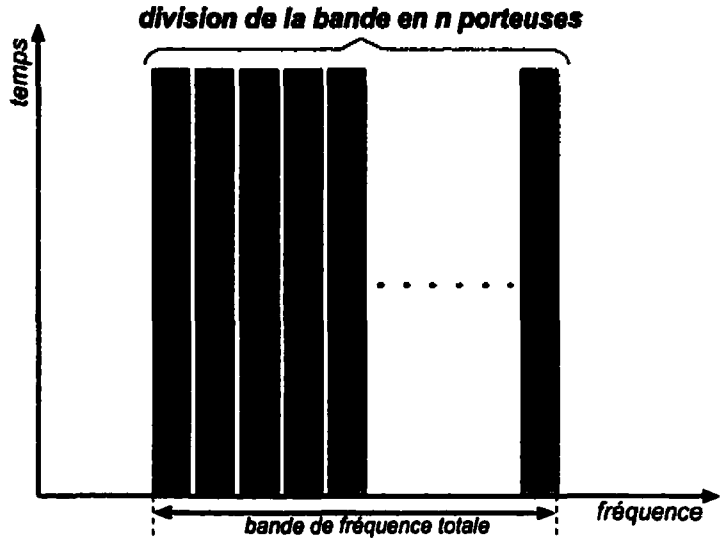


Figure 1.1: Répartition des ressources en AMRF

1.1.2 L'AMRT ou TDMA

En AMRT, on crée des intervalles de temps, et chaque usager utilise toute la bande de fréquence pendant un de ces intervalles de temps. Bien sûr, la durée de l'intervalle est trop courte pour que l'usager ait le temps d'effectuer une communication "complète". C'est pour cela que l'on assigne à l'usager non pas un seul intervalle de temps, mais plusieurs intervalles, ceci de manière périodique. En AMRT, on divise le temps en trames, qui sont elles-mêmes divisées en un certain nombre M d'intervalles de temps (*time slots*). Un usager qui veut communiquer se verra assigner un numéro d'intervalle où il pourra émettre, et il émettra toujours dans le même intervalle, dans toutes les trames. Par exemple, si l'on choisit une trame divisée en M=8 intervalles, Le système pourra satisfaire 8 usagers au maximum. Le premier usager utilisera les intervalles t_0 dans chacune des trames pour

émettre, le deuxième se servira de l'intervalle t_1,... (cf figure 1.2). Cela fonctionne en téléphonie numérique parce que le temps nécessaire pour envoyer une trame de voix codée est inférieur à la durée réelle du message de voix lui-même. C'est-à-dire que, par exemple, il faut moins d'une minute pour envoyer une minute de message vocal. L'AMRT profite de cette caractéristique pour mieux utiliser la bande de fréquence. L'interlocuteur ne voit donc aucune différence. Cependant, cela nécessite de mettre en attente les données à envoyer dans un tampon, jusqu'à ce que le mobile puisse émettre.

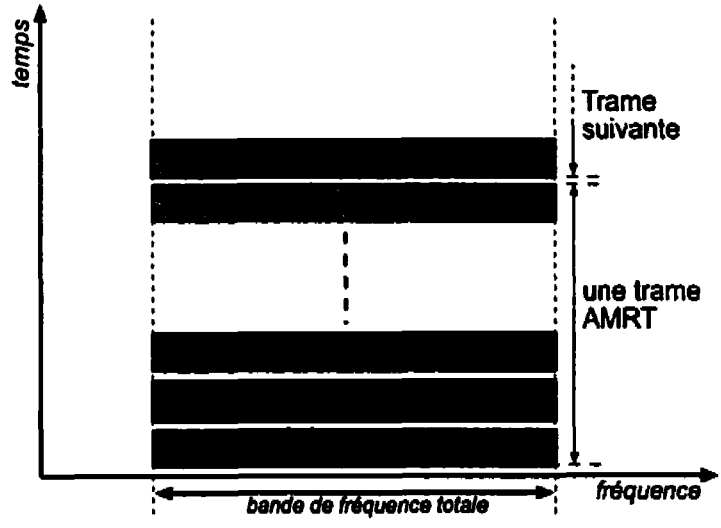


Figure 1.2: Répartition des ressources en AMRT

L'AMRF est souvent utilisé combiné avec l'AMRF, car seul, il ne permet pas vraiment d'utiliser la bande de manière efficace (parce qu'un mobile doit périodiquement utiliser un créneau pour transmettre). Par contre, elle permet d'augmenter la capacité d'un système AMRF, en appliquant de l'AMRT sur chacune des porteuses (ce qui donne la figure 1.3). Le système GSM (Global System Mobile) utilise du FDMA/TDMA.

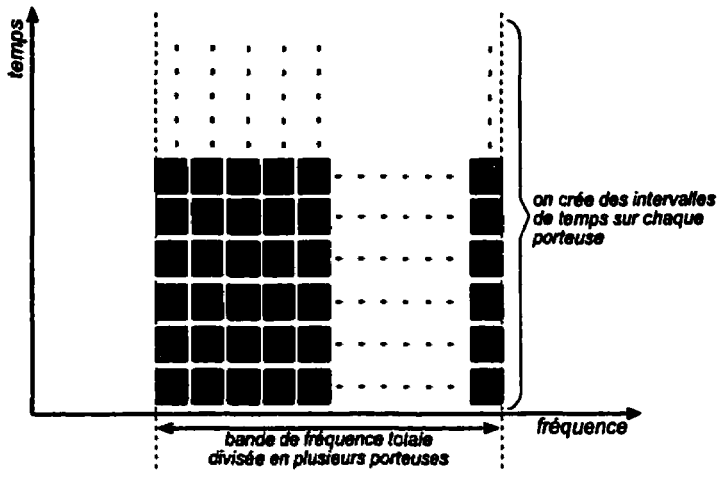


Figure 1.3: Répartition des ressources en FDMA/TDMA

1.1.3 Le CDMA ou AMRC

En AMRC, tous les usagers se servent de toute la bande de fréquence disponible en même temps grâce à une méthode d'étalement de bande. Pour pouvoir les différencier entre eux, des codes PN (pour Pseudorandom Noise) sont utilisés. Ces codes sont composés d'une séquence binaire pseudo-aléatoire qui permet d'étaler le signal de voix codé, sur toute la bande de fréquence.

Les codes PN possèdent les propriétés suivantes :

- la séquence contient autant de bits à zéro que de bits à un
- il existe une faible corrélation entre deux séquences décalées ou entre deux séquences différentes

Ces propriétés se rapprochent de celles des séquences complètement aléatoires.

Cette technique permet de mieux utiliser la bande de fréquence et de manière plus efficace. S'il est admis que le CDMA permet d'augmenter la capacité du système par rapport à celles obtenues avec l'AMRF ou l'AMRT, il est difficile d'estimer de combien la capacité résultante est supérieure. Initialement, à ressources

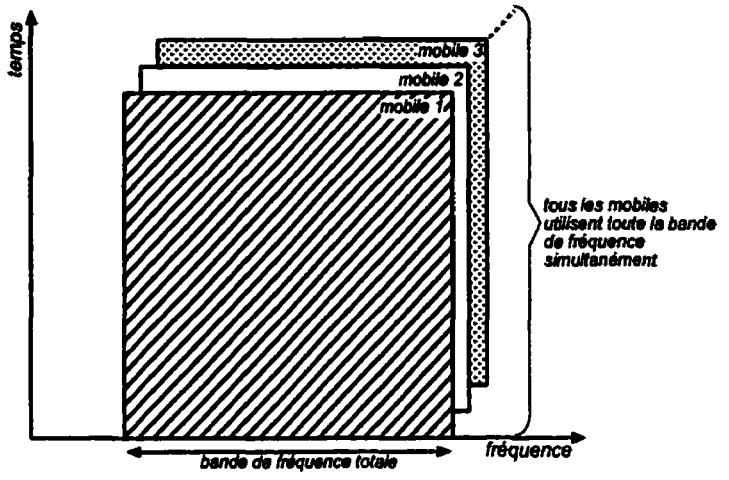


Figure 1.4: Répartition des ressources en AMRC

égales, on estimait à 20 le facteur d'amplification de capacité CDMA par rapport à celles obtenues à partir des autres techniques. Cependant, il semble que des facteurs d'amplification de 4 à 5 fois soient plus conformes à la réalité.

1.1.3.1 L'étalement de bande

L'étalement de bande est une méthode employée pour étaler un signal sur une bande de fréquence de largeur plus grande que ce qui serait nécessaire pour transmettre le signal. Par exemple, en CDMA/IS-95, on transmet un signal de largeur de bande de 9,6 kHz sur une bande de 1,25 MHz. Il existe deux méthodes principales d'étalement de bandes : le saut de fréquence ("*frequency hopping*") et la séquence directe ("*direct sequence*"). Nous les présentons brièvement dans ce qui suit.

1.1.3.1.1 Étalement par sauts de fréquence La bande de fréquence totale est divisée en porteuses comme en AMRF. On crée des intervalles de temps de durée T_h, que l'on appelle *hop* (saut). L'étalement par sauts de fréquence consiste à changer la porteuse de l'usager à intervalles réguliers. Ainsi l'utilisateur transmettra

sur une nouvelle porteuse tous les T_h (sur la figure 1.5, l'utilisateur se sert des cases grisées). En moyenne, le signal transmis occupe donc toute la bande de fréquences possible.

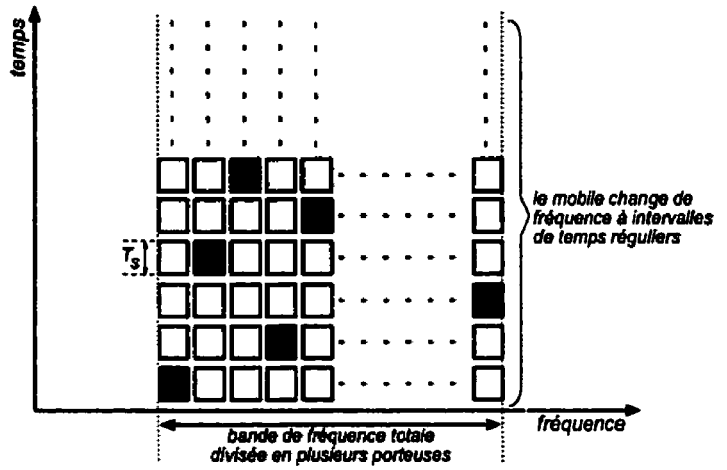


Figure 1.5: Étalement de bande par sauts de fréquence

Le temps pour transmettre un bloc de données peut être différent du temps d'un hop. Appelons T_s ce temps, il existe alors 2 cas possibles:

- soit $T_s < T_h$, ce qui veut dire que l'on a le temps de transmettre plusieurs symboles dans un hop. On parle alors de sauts lents ("*slow hopping*"). Cette technique est souvent employée lorsqu'on utilise de la modulation de phase continue.

- soit $T_h < T_s$. Dans ce cas, un symbole est transmis à travers plusieurs hops. On parle alors de sauts rapides ("*fast hopping*"). Cette technique est employée dans les systèmes à modulation FSK "*Frequency Shift Keying*" non cohérente.

Les fréquences choisies lors des sauts sont déterminées par un code PN, qui est attribué à chaque utilisateur lorsqu'il se connecte au réseau. La réalisation du saut de fréquence requiert alors un synthétiseur permettant les sauts de fréquences

à l'émetteur, parfaitement synchronisé avec celui du récepteur. Il faut également veiller à ce qu'il n'y ait pas de collisions entre les hops des différents utilisateurs, c'est-à-dire que deux utilisateurs se retrouvent sur le même hop à un moment donné.

1.1.3.1.2 Étalement par séquence directe La méthode consiste à multiplier le signal binaire par une séquence binaire pseudo-aléatoire (code PN) dont la fréquence des symboles (appelés chips) est beaucoup plus élevée que la fréquence des symboles du signal.

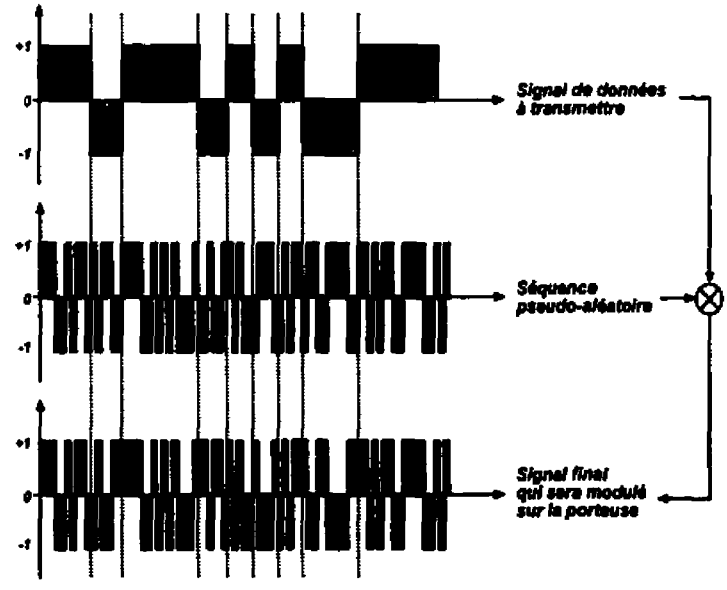


Figure 1.6: Multiplication du signal par la séquence aléatoire

Cela a pour effet d'étaler la bande de fréquence du signal, la faisant passer d'une bande de largeur R à une bande de largeur W. Le rapport $\frac{W}{R}$ est appelé le gain de traitement (*"processing gain"*). De même la puissance du signal se retrouve répartie sur toute la nouvelle largeur de bande. Le signal s'apparente alors à du "bruit". Cette propriété était intéressante pour les applications militaires qui voyaient là un moyen de camoufler le signal envoyé.

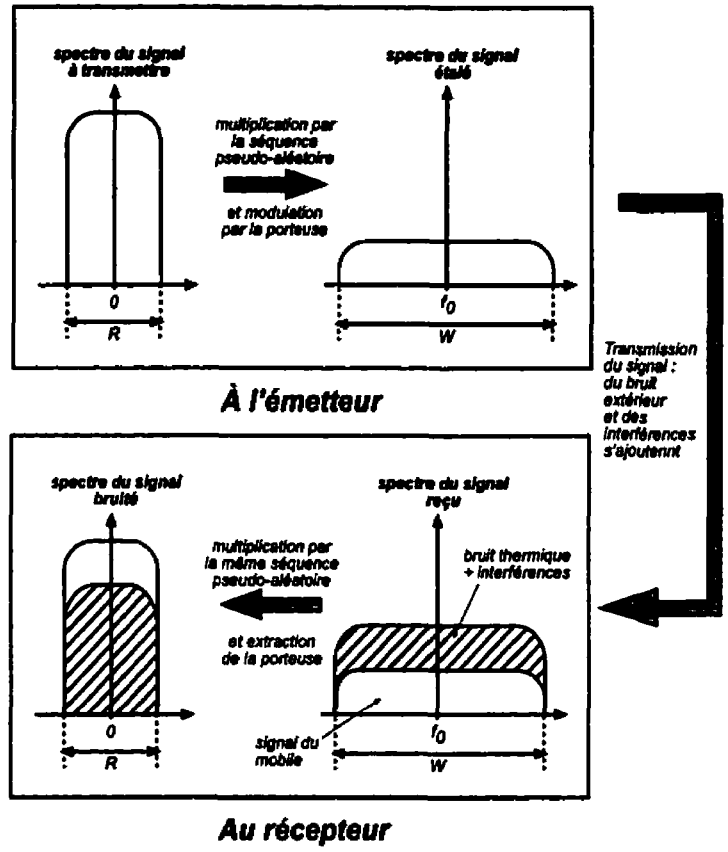


Figure 1.7: Étalement par séquence directe

À l'arrivée, le signal étalé est remultiplié par le même code PN. Les caractéristiques particulières des codes PN (orthogonalité entre eux,...), font que l'on peut ainsi retrouver le signal de départ. En effet, le signal qui arrive au récepteur est bien souvent noyé dans du bruit, et il faut arriver à extraire le signal de ce bruit. La multiplication par la séquence pseudo-aléatoire permet de résoudre ce problème : seul le signal qui avait été multiplié au départ par la séquence, verra sa largeur de bande réduite. Le bruit, lui, restera étalé sur la largeur de bande totale (figure 1.7). Ainsi, en filtrant par la suite, nous ne récupérons qu'une partie du bruit, obtenant de la sorte un rapport signal sur bruit beaucoup plus élevé.

Sur le trajet entre l'émetteur et le récepteur, le signal peut prendre des chemins

multiples et plusieurs signaux provenant du même signal peuvent arriver au récepteur décalés dans le temps. Ce sont ce qu'on appelle des échos multi-chemins. Ces échos ne sont pas éliminés lors de la multiplication par la séquence pseudo-aléatoire. Par contre, il est ainsi possible de récupérer ces différents échos, et de les combiner ensuite pour améliorer la qualité du signal reçu. C'est le but du récepteur de Rake qui utilise pour cela des séquences pseudo-aléatoires décalées dans le temps, de manière à essayer de retrouver d'éventuels échos. Une explication du fonctionnement du récepteur de Rake est donné dans le chapitre 9 du livre de Lee & Miller [LM98]. *La norme IS-95 utilise utilise l'étalement de bande à séquence directe.*

1.2 Fonctionnement d'un réseau AMRC/IS-95

Maintenant que nous avons vu ce qu'était l'AMRC, nous allons nous intéresser à quelques caractéristiques de fonctionnement d'un réseau de téléphonie mobile uti-lisant cette technique d'accès multiple.

1.2.1 Le lien descendant

Le lien descendant correspond au sens de la station de base vers le mobile. Dans un réseau cellulaire AMRC, les stations de base émettent sur plusieurs types de canaux (voir figure 1.8): les canaux de trafic qui servent à établir des communications avec les mobiles, mais également un canal pilote (*"pilot channel"*), un canal de synchronization (*"sync channel"*), et un canal d'information (*"paging channel"*). Parmi ces canaux spéciaux, le plus important est sans doute le canal pilote qui est essentiel pour qu'un mobile puisse établir un lien avec une cellule. Nous détaillerons dans la suite les rôles de chacun.

Chacun de ces canaux transmet des messages différents mais sont tous créés en

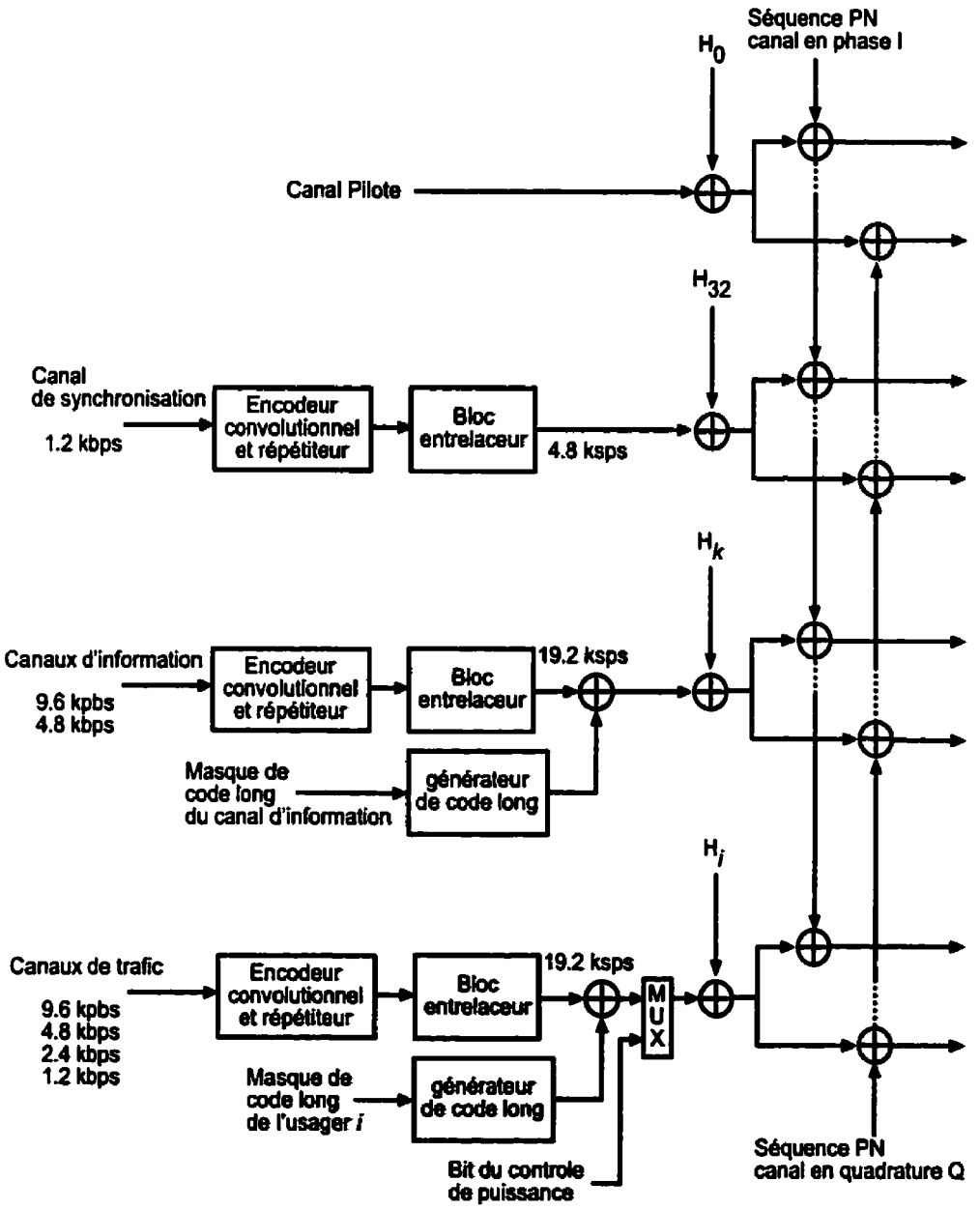


Figure 1.8: Signaux transmis sur le lien descendant

suivant la même logique, mis à part le canal pilote : les données à transmettre sur le canal sont d'abord codées (code convolutionnel, correcteur d'erreur, répétition), entrelacés, modulés par un code de Walsh avant d'être modulés par le code PN court, commun à toutes les stations de base et qui sert juste à l'étalement du spectre du signal. Le code PN court est une séquence de 32768 ($=2^{15}$) bits, plus couramment appelés chips lorsque l'on parle de codes PN.

Les codes de Walsh assurent l'orthogonalité des différents canaux entre eux et servent aussi à l'étalement du signal. Donc, en théorie, les signaux envoyés sur le lien descendant n'interfèrent pas les uns avec les autres. Cependant les codes de Walsh ne peuvent assurer l'orthogonalité entre les différents échos multi-chemins qui peuvent se produire. Ces échos créent alors des interférences entre les signaux, qui dans le pire cas, ont la même puissance que la puissance totale envoyée par la cellule. Il y a autant de canaux en tout que de codes de Walsh. Les codes de Walsh sont au nombre de 64 et sont répartis de la manière suivante :

- le code de Walsh H_0, constitué uniquement de "0" est réservé au canal pilote,
- le code de Walsh H_{32}, constitué de 32 "0" suivi de 32 "1", est dédié au canal de synchronisation,
- entre un et sept codes/canaux pour les canaux d'informations,
- le reste des codes est consacré aux canaux de trafic (soit entre 55 et 63 canaux suivant le nombre de canaux d'informations choisis). Ce nombre peut sembler peu important, mais la limitation de capacité due aux interférences fait qu'en général, le nombre d'appels traités simultanément ne dépasse pas les 55 ou 63.

1.2.1.1 Le canal pilote

Chaque cellule (ou secteur dans le cas de cellules sectorisées) émet continuellement un canal appelé canal pilote. Ce canal pilote a de multiples rôles : il permet entre autres au mobile de se synchroniser en temps, fréquence et phase avec la cellule. Chaque mobile cherche continuellement les canaux pilotes des antennes avoisinantes. Ceci permet à n'importe quel mobile de repérer les antennes avoisinantes, en recherchant les différents canaux pilotes. Les pilotes contiennent tous le même signal, qui correspond au code "0" (i.e. le signal ne contient aucune information), mais diffèrent d'une station de base à l'autre par un décalage du code PN court, permettant ainsi de distinguer de quel secteur ou cellule il s'agit. Le fait que tous envoient le même signal sur le canal pilote permet de retrouver la stations de base d'origine en recherchant uniquement le décalage de phase du signal, ce qui accélère le processus de recherche.

Le problème se pose alors de pouvoir assigner un décalage différent pour toutes les antennes du réseau. Ceci est pratiquement impossible. Mais utiliser le même décalage de phase pour deux cellules suffisamment éloignées l'une de l'autre ne pose aucun problème. À cause des pertes dues à la propagation, normalement le mobile ne pourra détecter les deux pilotes en même temps ; seul un sur les deux devrait être reçu à un niveau de puissance acceptable.

Les phases des pilotes doivent donc être suffisamment décalées entre elles pour éviter toutes interférences significatives entre pilotes voisins. La longueur des séquences PN correspond à une séquence de 2^{15} chips. Les pilotes des cellules doivent être décalés entre eux d'au moins 64 ($=2^6$) chips, ce qui laisse une possibilité de 512 ($=2^9$) décalages de phase. Il reste ensuite à attribuer ces décalages à chacune des

cellules.

Lorsque le mobile recherche les pilotes des cellules, il ne recherche pas tous les pilotes possibles. Il ne recherche que ceux dont les décimations se trouvent dans un certain intervalle de temps, appelée fenêtre de recherche ("*search window size*"). La longueur de cet intervalle lui est indiquée par la cellule via le canal d'information.

En outre, c'est la qualité avec laquelle le canal pilote sera reçue, qui permettra au mobile de choisir les stations de base potentielles pour établir la communication. Le mobile enverra une requête aux stations dont il reçoit le meilleur pilote. Ces dernières décident alors de le prendre en charge ou pas. La puissance allouée au canal pilote détermine la couverture de l'antenne, pour la liaison descendante.

La qualité du canal pilote reçue par le mobile se mesure grâce au rapport E_c/I_t où E_c est l'énergie par chip, et I_t est la densité spectrale (W/Hz) des interférences totales perçues par le mobile. La formule suivante permet de relier ce rapport directement au rapport des puissances du canal pilote et des interférences :

$$\frac{\textit{Puissance du Pilote}}{\textit{Puissance des interférences}} = \frac{R_c}{W} \cdot \frac{E_c}{I_t} \tag{1.1}$$

où $R_c = 1{,}2288$ MHz est le taux de chips par seconde, et $W = 1{,}25$ MHz est la largeur de la bande passante.

1.2.1.2 Le canal de synchronisation

Le canal de synchronisation contient les informations permettant d'identifier la cellule, et aussi la valeur du déphasage du pilote. Ce canal permet au mobile de se synchroniser sur la cellule, après détection de celle-ci via le canal pilote. La synchronisation est nécessaire pour pouvoir décoder les signaux envoyés.

Le canal de synchronisation est modulé par le $32^{ème}$ code de Walsh qui est formé de 32 "zéros" suivis de 32 "uns". Comme pour le canal pilote, le fait de moduler les canaux de synchronisation de toutes les cellules par le même code de Walsh facilite la recherche de ce canal par les mobiles.

1.2.1.3 Les canaux d'information

Les canaux d'information servent à envoyer des messages au mobile lorsque celui ci n'est pas encore assigné à un canal de trafic (par exemple, pour signaler au mobile qu'un appel lui arrive).

1.2.2 Le lien montant

Le lien montant correspond au sens mobile-cellule. Les signaux envoyés dans ce sens ne sont pas créés de la même manière que dans le sens descendant. Le mobile peut émettre sur deux types de canaux, (mais il n'émet pas sur les deux en même temps) : un canal de trafic et le canal d'accès.

1.2.2.1 Le canal de trafic

Le canal de trafic (voir figure 1.9) sert à transmettre les signaux lorsque la communication est établie. Les messages binaires une fois codés en symboles, sont groupés par six pour former un mot de code. Ces nouveaux mots de code sont représentés par des codes de Walsh. Ce sont les mêmes 64 codes utilisés dans le lien descendant, mais ils ne sont pas utilisés de la même manière ici. Dans le lien descendant, ils servaient à moduler un canal particulier pour le séparer des autres. Dans le lien montant, les codes de Walsh servent à coder les données à envoyer. Ensuite, le mobile utilise un code PN long et un code court pour réaliser l'étalement

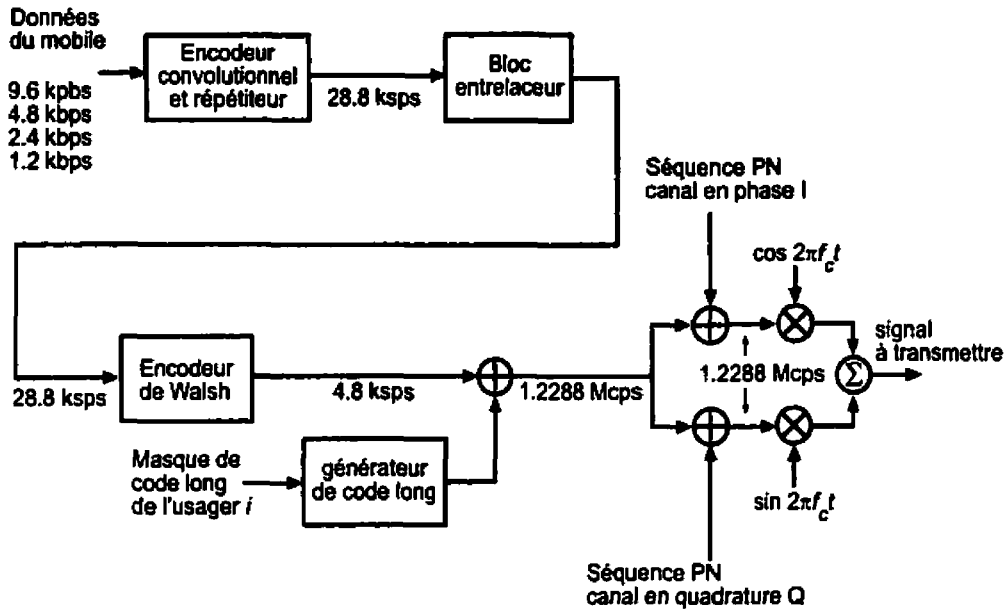


Figure 1.9: Canal de trafic sur le lien montant

de bande. Le code long est un code de $(2^{42}-1)$ chips qui sert à identifier le mobile. Tous les mobiles utilisent le même code long. Cependant, ils se différencient entre eux par une décimation différente de ce code. Chaque mobile possède un déphasage propre, qui est déterminé par le masque de code long propre à chaque mobile (il est relié au numéro de série électronique de l'appareil). Il y a autant de déphasages possibles que de "chips", c'est-à-dire $(2^{42}-1)$. Ce nombre est suffisamment grand pour assurer un déphasage différent pour chaque mobile vendu.

Cependant, un déphasage d'un chip peut facilement être annulé par des retards dus à la propagation, et créer ainsi une ambiguïté. C'est pourquoi on utilise le code PN court qui est le même qui sert à l'étalement du spectre sur le lien descendant. Ce code PN a pour effet d'augmenter la taille de la séquence binaire, et ainsi augmenter les écarts entre deux déphasages consécutifs. Puisque le code court a une taille de 2^{15} chips, l'écart minimal de déphasage entre deux codes passe donc de un chip à 2^{15} chips, ce qui est suffisant pour éviter toute ambiguïté.

1.2.2.2 Le canal d'accès

Le canal d'accès sert lorsque le mobile cherche à établir la communication avec une cellule. Les informations transmises sont aussi étalées par le code long et le code court. Mais le masque de code long utilisé n'est pas le même que pour celui du canal de trafic. La raison est que si le mobile utilisait le masque de code long spécifique à chaque mobile pour moduler le canal d'accès, une cellule devrait rechercher constamment tous les masques possibles pour savoir si un mobile cherche à entrer en liaison avec elle. En utilisant par contre un masque de code long spécifique à la cellule, la recherche de demandes d'accès par d'éventuels mobiles est facilitée. La cellule n'à plus qu'à rechercher les signaux transmis sur un seul déphasage du code PN.

1.2.3 Le contrôle de puissance

Dans un réseau cellulaire AMRC, tous les usagers occupent toute la bande de fréquence en même temps, et sont séparés grâce à leur code PN respectif. Une autre condition est nécessaire pour assurer que le message transmis pourra être décodé avec un minimum d'erreur : le rapport signal sur bruit du message doit être suffisamment élevé.

Le rapport signal sur bruit $\frac{E_b}{I_0}$ est directement lié au CIR (*Carrier-to-Interference Ratio*), rapport de la puissance du signal reçu et des interférences :

$$CIR = \frac{C}{I} = \frac{\textit{Puissance du signal reçu}}{\textit{Puissance des Interférences}} = \frac{R}{W} \cdot \frac{E_b}{I_0} \tag{1.2}$$

où E_b représente l'énergie par bit (W), I_0 la densité spectrale (W/Hz) des interférences, R le taux de bits en bps, et W est la largeur de la bande passante.

L'article de Gilhousen, Jacobs et Padovani [GJP+91] indique que pour avoir un taux d'erreur par bits inférieur à 10^{-3}, le rapport signal sur bruit doit être supérieur ou égal à 7 dB pour le sens montant, et de 5 dB dans le sens descendant. Cette dissymétrie s'explique par le fait que le mobile dispose du canal pilote dans le sens descendant pour aider au décodage du message. Dans le sens montant, il n'existe pas de pilote, et le signal envoyé doit être plus puissant pour assurer une qualité égale.

Nous pouvons donner l'ordre de grandeur des valeurs de rapport signal sur bruit. En AMRC, la bande passante W a une largeur de $1,25$ MHz, et le taux de bits par secondes R est de $9,6$ kbps ou 14,4 kbps. En incorporant ces valeurs dans l'équation (1.2) et en tenant compte des valeurs de Eb/I_0 donné dans l'article [GJP+91] mentionné ci-dessus, nous trouvons les valeurs de CIR suivantes :

Pour la liaison montante	CIR = 3,89E -2 pour R = 9,6 kbps
	CIR = 5,89E -2 pour R = 14,4 kbps
Pour la liaison descendante	CIR = 2,45E -2 pour R = 9,6 kbps
	CIR = 3,72E -2 pour R = 14,4 kbps

Pour s'assurer que le rapport signal sur bruit soit supérieur au seuil de 7 ou 5 dB, le mobile (dans le sens montant) ou la station de base (dans le sens descendant) respectivement peut augmenter la puissance émise. Mais, compte tenu du fait que tout le monde occupe la même bande de fréquence, chaque mobile constitue une source d'interférences pour les autres, et chaque antenne de cellule interfère avec les autres cellules. Par contre, cellules et mobiles ne causent pas d'interférences entre eux parce que *les signaux ne sont pas émis dans la même bande de fréquences.* Si le mobile émet trop de puissance, il créera trop d'interférences pour les autres.

Le but du contrôle de puissance est de veiller à ce que chaque mobile ou chaque

station de base envoie le minimum de puissance nécessaire. Le minimum correspond à la puissance nécessaire pour que le rapport signal sur bruit soit au dessus du seuil requis. Ceci améliore la capacité du système. Une autre utilité du contrôle de puissance est de palier aux fluctuations de puissance dues aux pertes dans le milieu extérieur. Ces pertes varient selon la position du mobile, mais peuvent aussi varier pendant la communication si le mobile se déplace ou encore si des obstacles font temporairement écran entre le mobile et la cellule.

Pour la liaison montante, le contrôle de puissance est composé de 2 phases :

- un contrôle en boucle ouverte ("*Open Loop Power Control*") qui vise à faire des corrections importantes et rapides, mais avec un manque de précision.
- un contrôle en boucle fermée ("*Closed Loop Power Control*") doit apporter les petites corrections de puissance supplémentaires à celles déjà apportées par le contrôle en boucle ouverte.

1.2.3.1 Le contrôle de puissance en boucle ouverte

Le principe du contrôle en boucle ouverte est le suivant : le mobile se base sur la puissance du signal pilote qu'il reçoit pour déterminer grossièrement quelle puissance il doit envoyer. La puissance reçue lui permet de faire une estimation sur les pertes que subit le signal envoyé par la station de base. En supposant que le signal qu'il enverra, subira à peu près les mêmes pertes, il peut en déduire la puissance nécessaire. Le raisonnement fait est le suivant : le rapport signal sur

bruit reçu à la station de base s'écrit de la manière suivante (en dB):

$$\begin{aligned}\text{SNR reçu à la station de base (dB)} = {} & \text{puissance envoyée par le mobile (dBm)} \\ & \text{- pertes sur lien montant (dB)} \\ & \text{- interférences sur le lien montant (dBm)}\end{aligned} \tag{1.3}$$

Pour estimer les pertes sur le lien montant, le mobile calcule les pertes sur le lien descendant de la manière suivante :

$$\begin{aligned}\text{Puissance reçue (dB)} = {} & \text{puissance de la cellule (dBm)} \\ & \text{- pertes sur lien descendant (dB)}\end{aligned} \tag{1.4}$$

La puissance de la cellule fait référence à la puissance du pilote de la cellule à l'antenne, et non lorsque celle-ci est reçue au mobile. De cette équation, le mobile peut avoir une expression des pertes sur le lien montant en supposant qu'elles sont les mêmes que sur le lien descendant. Si nous remplaçons ces pertes dans l'équation 1.3, nous obtenons :

$$\begin{aligned}\text{Puissance envoyée par le mobile (dB)} = {} & \text{SNR reçu à l'antenne} \\ & + \text{puissance de la cellule (dBm)} \\ & + \text{interférence totale} \\ & \text{sur le lien montant (dBm)} \\ & - \text{puissance reçue (dBm)}\end{aligned} \tag{1.5}$$

Le mobile n'a pas accès aux informations concernant le rapport signal sur bruit reçu à l'antenne, la puissance de la cellule ou les interférences totales que subit l'antenne de la cellule. La seule chose que le mobile connaisse est la puissance reçue

pour le canal pilote. Mais, puisque ce calcul ne sert qu'à avoir une estimation de la puissance à envoyer, des valeurs constantes moyennes sont prises pour les valeurs inconnues. Le calcul se simplifie donc à :

$$\begin{aligned} \text{Puissance envoyée par le mobile (dB)} &= \text{constante} \\ &\quad - \text{puissance reçue (dBm)} \end{aligned} \tag{1.6}$$

La norme IS-95 prend une valeur de -73 dB pour la constante, mais elle peut changer pour chaque antenne du réseau pour mieux s'adapter à la cellule. Les informations permettant d'étalonner cette constante sont envoyées au mobile via le canal de synchronisation (*sync channel*). Mais le principe de base reste le même, c'est-à-dire que la puissance envoyée par le mobile est inversement proportionnelle à la puissance du pilote reçue.

La réponse du mobile au contrôle de puissance en boucle ouverte est inégale dans les deux sens (augmentation ou diminution) volontairement. Si la puissance doit diminuer, le mobile exécute l'ordre rapidement. Par contre, une augmentation de puissance est faite de manière graduelle. La raison est qu'une augmentation de puissance veut dire une augmentation des interférences pour les autres usagers, et dans le cas où cette augmentation est temporaire (due à une chute rapide mais brève de la puissance reçue), le mobile aura créé des interférences inutiles pour les autres mobiles pendant ce laps de temps. Au contraire, si la demande d'accroissement de puissance persiste, cela veut dire qu'il y a un réel manque de puissance. Prendre un peu plus de temps pour augmenter la puissance permet de s'assurer que cela est bien nécessaire. Le mobile risque pendant ce laps de temps, de subir une dégradation de son rapport signal sur bruit, mais on estime qu'il est plus raisonnable d'avoir une baisse de qualité sur un seul mobile plutôt que de risquer d'en avoir une pour tous

les usagers de la cellule.

Le contrôle en boucle ouverte permet de faire des ajustements grossiers mais rapides de la puissance à émettre. Le contrôle en boucle fermée va permettre un réglage plus fin de la puissance à émettre.

1.2.3.2 Le contrôle de puissance en boucle fermée

La station de base mesure le rapport signal sur bruit du signal envoyé par le mobile. S'il est inférieur au seuil souhaité, il demande alors au mobile d'augmenter sa puissance, et inversement s'il est supérieur au seuil. Le mobile ajuste alors sa puissance par intervalles de ± 1 dB. L'antenne maintient sa demande tant que le mobile n'envoie pas la puissance qu'elle souhaite.

Les demandes de puissance de l'antenne se font en mettant un bit spécial à 1 ou 0 (1 pour une augmentation, 0 pour une diminution). Cette information est envoyée au mobile toutes les 1,25 ms, c'est-à-dire 800 fois par seconde.

1.2.3.3 Le contrôle de puissance dans le sens descendant

Dans le sens descendant, le contrôle de puissance est moins complexe que dans le sens montant. Les ajustements de puissance se font sur demande du mobile : celui-ci mesure le taux d'erreurs par trame et informe périodiquement la station de base de sa valeur. La station de base compare alors ce taux à un seuil, et décide selon le cas d'augmenter ou de diminuer la puissance qui est allouée au mobile.

1.2.4 Le changement de cellule en réseau cellulaire AMRC

Lorsqu'un usager se déplace dans le réseau, il est possible qu'il change de cellule. Dans ce cas, il faut changer la station de base qui l'administre, de manière à ce que

le mobile soit toujours desservi par la station de base qui lui est la plus favorable, et que la communication garde ainsi une bonne qualité. De plus, un mobile présent dans une cellule mais desservi par une autre crée des interférences énormes pour les usagers de cette cellule. La raison étant que la puissance du mobile en question est alors contrôlée par la station de base extérieure, et non par la cellule où elle se trouve. Le phénomène de changement d'antenne ou de cellule est appelé "handoff" ou "handover".

1.2.4.1 Le handoff classique

Dans les systèmes de téléphonie mobile analogique, le handoff se déroule de la manière suivante : la cellule, lorsqu'elle détecte que le rapport signal-sur-bruit du mobile devient inférieur à un certain seuil fixé à l'avance, demande au système de rechercher si d'autres antennes du réseau reçoivent un meilleur signal du mobile. Si c'est le cas, on sélectionne un canal libre à cette nouvelle station de base, et on transfère l'appel sur celle-ci.

Ce type de handoff est qualifié de hard-handoff. En hard-handoff, le mobile est obligé de cesser la communication avec la première antenne, puis de créer un nouveau lien avec la nouvelle station de base. C'est ce qui se passe dans les systèmes analogiques, et dans ceux utilisant l'AMRF ou l'AMRT. On voit donc que des problèmes peuvent survenir si la nouvelle antenne ne possède aucun canal de libre, ou s'il se passe un problème lors du changement d'antenne. Il y a, dans ce cas de figure, un risque de ne pouvoir rétablir une nouvelle connection avec la nouvelle antenne, et donc que l'utilisateur perde la communication.

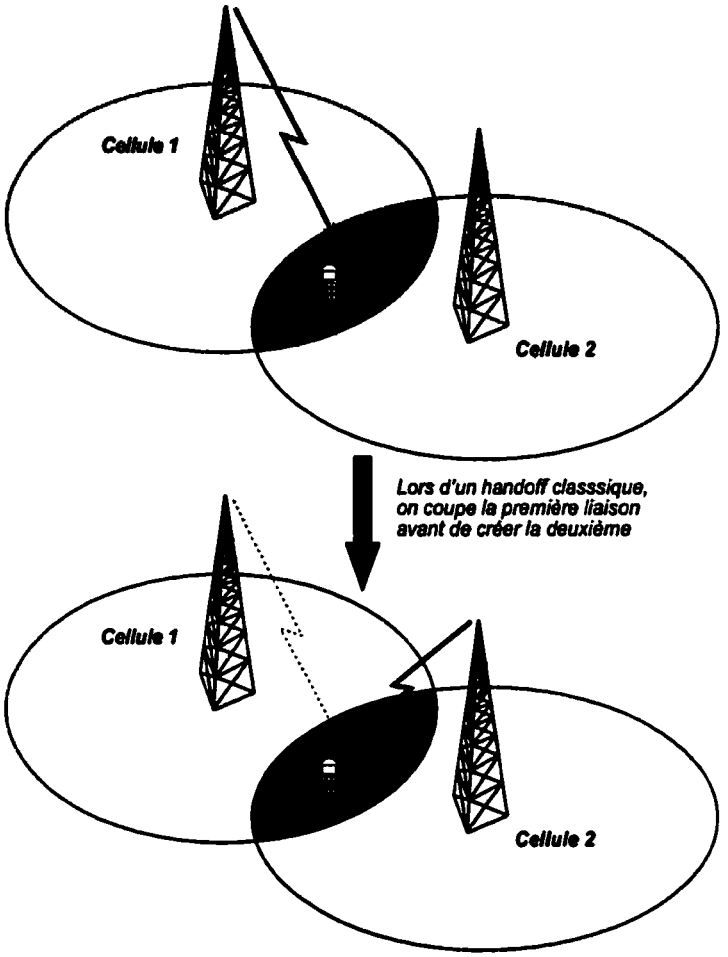


Figure 1.10: Handoff Classique

1.2.4.2 Le soft-handoff

Dans les réseaux AMRC, on effectue un soft-handoff qui résout les problèmes de fiabilité lors du changement d'antenne. En effet, le mobile n'est pas obligé de cesser la communication avec la première antenne. Il peut entretenir plusieurs communications simultanément et ne garder en dernier qu'une seule d'entre-elles. Il y a donc moins de chance que l'usager perde la communication lors d'un processus de soft-handoff.

Nous pouvons distinguer deux cas :

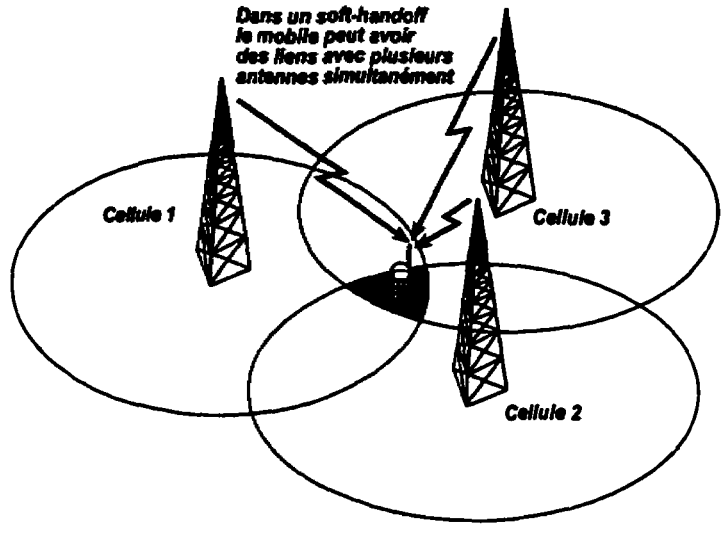


Figure 1.11: Soft-handoff en AMRC

- lorsque le changement se fait entre deux antennes de cellules différentes, on parle de soft-handoff,

- lorsque le changement se fait entre deux antennes d'une même cellule, c'est-à-dire que le mobile passe d'un secteur à un autre dans une même cellule, on parle alors de softer-handoff. Un secteur est une sous-division de la cellule. Généralement, les cellules sont tri-sectorisées (la sectorisation permet d'augmenter la capacité d'un réseau).

Dans les deux cas, le processus se passe de la même manière, la seule différence étant que, pour un softer-handoff, les changements se font en "interne" dans la cellule, sans avoir besoin de passer par le MTSO (Mobile Telephone Switching Office). Ce dernier reste cependant informé du changement d'antennes.

Pendant un soft-handoff, un mobile est en communication avec plusieurs antennes à la fois. Cela a ses inconvénients et ses avantages. Les avantages résident dans le fait que le mobile reste toujours en contact avec au moins une antenne et ne

risque donc pas de perdre la liaison pendant le processus. De plus, le mobile peut combiner les signaux provenant de plusieurs antennes pour améliorer la qualité globale du signal reçu (diversité spatiale). La même manipulation est faisable pour les signaux envoyés dans le sens montant : toutes les antennes participant au handoff reçoivent le même message provenant du mobile; ces messages sont ensuite transmis au MTSO qui décide alors à chaque fois de ne garder que celui qui a la meilleure qualité (i.e. le moins d'erreur).

Par contre, le fait d'être lié à plusieurs antennes veut dire que chaque antenne doit allouer une partie de sa puissance pour maintenir un lien avec ce mobile. Cela est peu intéressant car cette puissance allouée pourrait servir à établir un lien avec un autre mobile. C'est pourquoi il est nécessaire de veiller à ce que la part de mobiles en situation de soft-handoff reste minime dans le réseau, sous peine de gaspiller les ressources et diminuer la capacité du système.

En ce qui concerne la puissance du mobile, nous avons vu qu'elle était contrôlée sans arrêt par la cellule qui l'administre. Lorsque le mobile se retrouve en handoff, il est administré par plusieurs antennes à la fois, et sa puissance doit donc être régulée en tenant compte des exigences de toutes les antennes. Le mobile n'augmentera sa puissance que si toutes les antennes le lui demandent. Par contre, si une seule antenne lui demande de diminuer sa puissance, il devra s'exécuter. Cela semble logique car, si une antenne souhaite que le mobile baisse la puissance de ses signaux, c'est qu'elle estime que ce mobile crée trop d'interférences pour les autres usagers de sa cellule, et qu'elle serait toujours capable de décoder le signal avec une puissance moindre. Évidemment, cela veut dire que les autres antennes risquent de ne pas recevoir un signal suffisamment fort, mais l'important est d'avoir au moins une antenne capable de décoder correctement le signal.

1.2.4.3 Les listes de stations

Une fois que le mobile est entré en communication avec une base, il continue à surveiller les canaux pilotes. Le mobile maintient en permanence quatre listes de stations (les règles de mises à jour de ces listes seront mentionnées au 1.2.4.4 et un exemple est donné sur la figure 1.12):

- **Liste des actifs** : liste des stations avec lesquelles le mobile est en communication. Cette liste peut comporter plusieurs stations, en particulier dans les zones de handoff.
- **Liste des candidats** : ce sont les stations dont la force du canal pilote est suffisante pour pouvoir devenir actifs, mais qui n'ont pas reçu l'autorisation de le devenir.
- **Liste des voisins** : le canal pilote est fort mais pas suffisant pour être *candidat*.
- **Liste des stations restantes** : Toutes les autres stations.

Les listes des *candidats* et des *voisins* ont une capacité limitée. Si elles sont pleines et qu'une nouvelle station arrive dans la liste, une des stations déjà présentes doit être évacuée. Un aperçu du fonctionnement de ces listes est donné dans la figure 1.12.

1.2.4.4 Mise à jour des listes

Les paramètres suivants sont utilisés pour les mises à jour des listes :

- T_{add} est le seuil de rapport signal-sur-bruit au delà duquel le pilote devient candidat.

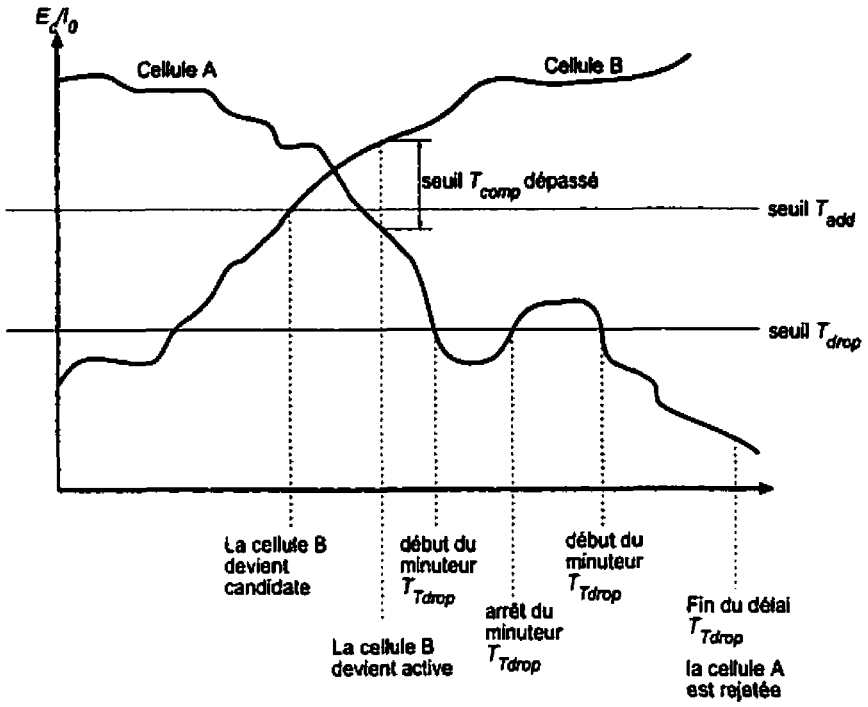


Figure 1.12: Utilisation des seuils dans le soft-handoff

- T_{drop} est le seuil de rapport signal-sur-bruit en dessous duquel le pilote, s'il y demeure suffisamment longtemps (T_{Tdrop}) doit être rejeté.

- T_{comp} est un seuil de rapport signal-sur-bruit qui permet de comparer les pilotes candidats aux pilotes actuellement actifs.

- T_{Tdrop} est le délai au bout duquel un pilote, qui est passé sous le seuil T_{drop}, est rejeté.

Lorsque le mobile détecte un pilote voisin dont la force dépasse T_{add} ou lorsqu'il détecte un pilote candidat qui a une puissance supérieure (de T_{comp}) à celle d'un pilote actif, il en informe la station de base, par un message appelé "*Pilot Strength Measurement Message*". Par contre si un des pilotes qui fait partie de la liste des *actifs* ou des *candidats* voit sa puissance passer sous T_{drop}, et qu'elle reste inférieure

à T_{drop} durant tout le délai T_{tdrop}, ce pilote sera rejeté dans la liste des *voisins*.

La station de base envoie au mobile des "*Handoff Direction Message*", lui donnant la liste des stations qui le prennent en charge. Le mobile met alors à jour sa liste de stations *actives*. La station de base peut aussi envoyer un "*Neighbor List Update Message*" au mobile pour qu'il mette à jour sa liste de *voisins*. Ce message permet aussi d'incrémenter un compteur pour chaque pilote *voisin*. Ce compteur indique l'âge du pilote, c'est-à-dire le temps depuis lequel le pilote a été ajouté à la liste. Si cet âge dépasse un âge maximum "*NGHBR_MAX_AGE*", le pilote est rejeté des *voisins*.

Le tableau 1.1 résume les différents cas pouvant se produire.

1.2.5 Le facteur d'utilisation de la voix

Dans une conversation téléphonique, il est rare qu'une personne parle tout le temps (elle fait des pauses, attend lorsque c'est son interlocuteur qui parle,...). Il y a donc des moments où aucune information ne passe sur le lien. D'ordinaire, on considère qu'un usager utilise vraiment le lien entre 40% et 50% du temps. C'est ce qu'on appelle le facteur d'utilisation de la voix.

La norme IS-95 tire parti de cette observation. Lorsque l'usager ne parle pas, la puissance émise sur le lien est réduite (le taux d'envoi des bits est diminué), réduisant ainsi par la même occasion les interférences causées à autrui.

Liste Origine	Liste Destination	Cause
Actifs	Candidats	Un *Handoff Direction Message* n'incluant pas la station a été reçu et le délai T_{Tdrop} n'est pas écoulé
Actifs	Voisins	Un *Handoff Direction Message* n'incluant pas la station a été reçu et le délai T_{Tdrop} est écoulé
Actifs	Restants	*Inutilisé*
Candidats	Actifs	Un *Handoff Direction Message* incluant la station a été reçu
Candidats	Voisins	Le délai T_{Tdrop} est écoulé ou la liste déborde
Candidats	Restants	*Inutilisé*
Voisins	Actifs	Un *Handoff Direction Message* incluant la station a été reçu
Voisins	Candidats	La puissance du canal pilote dépasse le seuil T_{add}
Voisins	Restants	L'âge de la station dépasse l'âge maximum "*NGHBR_MAX_AGE*" ou la liste déborde
Restants	Actifs	Un Handoff Direction Message incluant la station a été reçu
Restants	Candidats	La puissance du canal pilote dépasse le seuil T_{add}
Restants	Voisins	Un *Neighbor List Update Message* a été reçu

Tableau 1.1: Lois de passage d'une liste à l'autre

CHAPITRE 2

LE DÉFICIT DE PUISSANCE

2.1 Présentation

Lorsqu'un mobile établit une communication avec un secteur, la station de base de ce dernier doit lui attribuer une certaine quantité de puissance. Elle correspond à la puissance des signaux qu'elle lui envoie. Comme nous l'avons vu précédemment, il est nécessaire de contrôler la quantité de puissance envoyée, les deux raisons principales étant : premièrement, limiter les interférences pour les autres usagers, et deuxièmement, assurer en revanche que le rapport signal sur interférences ($\frac{E_b}{I}$) perçu par le mobile, soit suffisamment élevé pour pouvoir décoder le message avec un minimum d'erreurs.

Une valeur de 7 dB[GJP+91] pour le rapport signal sur bruit au niveau de la station de base est nécessaire pour assurer un taux d'erreur par bit (BER) inférieur à 10^{-3}. Cependant, comme vu précédemment, un rapport de 5 dB est suffisant dans le cas de la liaison descendante, parce que le canal pilote de la station de base aide le mobile à obtenir une plus grande efficacité dans le décodage (en permettant de réaliser une démodulation cohérente). Dans le sens montant, il n'existe pas de canal pilote, la démodulation est non-cohérente et c'est pour cela qu'il est nécessaire d'avoir un plus grand rapport signal sur bruit. La quantité de puissance allouée est déterminée par le contrôle de puissance, et doit correspondre à la puissance minimale nécessaire au bon fonctionnement de la liaison.

2.2 Hypothèses

Dans l'étude qui suit nous allons considérer des cellules qui peuvent être sectorisées ou non. Les antennes seront supposées parfaites, avec un diagramme de rayonnement isotrope (le gain ne dépend pas de la direction). C'est cette hypothèse qui fait que notre étude reste valide que la cellule soit sectorisée ou non. Cependant dans le cas d'une cellule sectorisée, la sectorisation sera considérée comme parfaite, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de zone de chevauchement entre les secteurs. Cette condition est importante lorsqu'on calcule les interférences, puisqu'elle exclut la possibilité d'avoir des interférences entre secteurs d'une même cellule.

Pour une cellule non sectorisée, les résultats correspondront aux performances de la cellule. Pour une cellule sectorisée, les résultats donnent les performances pour un secteur seulement. Dans la suite nous utiliserons plus souvent le mot cellule et ajouterons les modifications dans le cas d'un secteur, si nécessaire.

Nous considérerons aussi un contrôle de puissance parfait. C'est-à-dire que nous ne tiendrons pas compte des fluctuations de puissance autour de la valeur désirée. la station de base attribuera donc de façon instantanée exactement la puissance nécessaire à chaque fois, pour chaque mobile qu'elle administre. Nous ne tiendrons pas non plus compte des limites imposées par la capacité dans le sens montant (limitée par les interférences entre les messages des mobiles parvenant à la station), car notre but est d'étudier les limites dues uniquement au canal descendant.

2.3 Principe de la méthode

Nous allons essayer d'évaluer la probabilité qu'une station de base se retrouve en déficit de puissance, c'est-à-dire qu'elle n'ait plus assez de puissance pour ac-

cepter un nouvel usager. Le calcul va consister à rechercher la probabilité que la puissance totale émise dépasse un certain seuil. Par exemple, nous pouvons fixer ce seuil à 95% de la puissance disponible pour les usagers (puissance totale de la station de base diminuée de la puissance dédiée aux canaux pilotes). Ceci laisse donc un intervalle de sécurité de 5% qui permet de faire face aux fluctuations de puissances des usagers qui sont en communication avec le secteur. Si l'on utilisait cette puissance pour accepter un nouveau mobile, il se pourrait que cela entraîne une dégradation des signaux par la suite, parce que la station de base du secteur n'aurait plus de puissance supplémentaire pour essayer d'améliorer la qualité des liaisons. Cela pourrait aussi causer des ruptures de communication si les liens se dégradaient vraiment trop.

Maintenir un intervalle de sécurité permet d'éviter d'arriver à cette situation extrême. Le but est donc de trouver : $Prob[P_T > P_{seuil}]$ où P_T est la puissance totale émise par la station de base, et P_{seuil} est le seuil de puissance au-delà duquel la station de base ne doit plus accepter de nouvel usager. La démarche de calcul sera la suivante :

- Dans un premier temps, nous essaierons d'établir une expression de la puissance P_T émise dans une cellule, en fonction du nombre N d'usagers actifs dans la cellule.

- Une fois cette expression obtenue, nous allons chercher $Prob[P_T > P_{seuil}|N]$, la probabilité conditionnelle que la puissance émise dépasse le seuil sachant qu'il y a N usagers actifs dans la cellule.

- Enfin, en utilisant l'expression de la probabilité qu'il y ait N usagers actifs simultanément dans une cellule, nous pourrons calculer la probabilité totale

(inconditionnelle) de dépasser le seuil, en faisant une moyenne sur le nombre d'usagers possibles dans la cellule :

$$Prob[P_T] = \sum_N Prob[P_T > P_{seuil}|N] \cdot Prob[N] \tag{2.1}$$

Nous commencerons par étudier la puissance émise dans une cellule lorsqu'elle est isolée. Ensuite, nous étudierons le cas d'une cellule non isolée, et analyserons comment tenir compte des interférences causées par les cellules voisines dans l'expression qui aura été établie pour une seule cellule.

2.4 Interférences dans le sens descendant

2.4.1 Interférences provenant de la même cellule

Dans le sens descendant, les signaux envoyés aux différents usagers sont modulés et étalés par des codes de Walsh spécifiques à chaque usager qui assurent une parfaite orthogonalité entre les différents signaux. Donc dans un cas parfait, il n'existe pas d'interférences provenant de la même cellule. Cependant, le phénomène des échos multi-chemins dégrade l'orthogonalité des signaux et crée donc des interférences à l'arrivée au mobile.

Soit I_k le k^{eme} écho multi-chemin de la puissance totale envoyée I_t. I_k représente donc une fraction, soit β_k, de la puissance totale envoyée :

$$I_k = \beta_k I_t \tag{2.2}$$

$$\text{et } \sum_k \beta_k = 1 \tag{2.3}$$

Dans ce cas, l'énergie reçue par bit pour l'echo j sera :

$$E_{b_j} = \beta_j E_{b_t} \tag{2.4}$$

et les interférences, pour cet écho j, sont constituées par la somme de tous les autres échos :

$$I_j = I_t \sum_{k \neq j} \beta_k = I_t (1 - \beta_j) \tag{2.5}$$

Si le mobile utilise un nombre M de démodulateurs à la réception pour effectuer des recombinaisons entre les différents échos, le rapport signal-sur-bruit total à l'arrivée vaut :

$$\frac{E_b}{I} = \sum_{i=1}^{M} \frac{E_{b_i}}{I_i} = \sum_{i=1}^{M} \frac{E_{b_t}}{I_t} \cdot \frac{\beta_i}{1 - \beta_i} \tag{2.6}$$

Pour simplifier le problème, on considère souvent une sorte de pire cas où toute la puissance envoyée aux autres mobiles va se transformer en interférences. C'est ce cas que nous considérerons dans l'étude que nous allons faire.

2.4.2 Interférences provenant des autres cellules

Les signaux envoyés par une cellule ne sont pas orthogonaux aux signaux envoyés par une autre cellule. Donc toutes les puissances envoyées par les autres cellules vont constituer des interférences. Bien sûr, les mobiles se trouvant en bordure de cellule subiront plus d'interférences provenant des autres cellules, que les mobiles se trouvant à l'intérieur de la cellule.

Nous allons faire une petite étude qualitative concernant les interférences des autres cellules. Nous allons supposer un réseau de cellules hexagonales de "rayon" $R_c = \frac{2}{\sqrt{3}} R$ (voir la figure 2.1 pour identifier les différentes variables). Les cellules

voisines peuvent être divisées en plusieurs catégories, selon la distance de leur centre par rapport au centre de la cellule principale. On peut ainsi former des anneaux de cellule, qui regroupent les cellules se situant à la même distance :

- le premier anneau où les centres sont à une distance $d_1 = 2R$,
- le deuxième anneau où les cellules sont à une distance $d_1 = 3R_c = \frac{6}{\sqrt{3}}R$,
- le troisième anneau où les cellules sont à une distance $d_1 = 4R$

Ce qui fait 18 cellules voisines considérées. Les interférences provenant des cellules plus éloignées sont considérées comme négligeables.

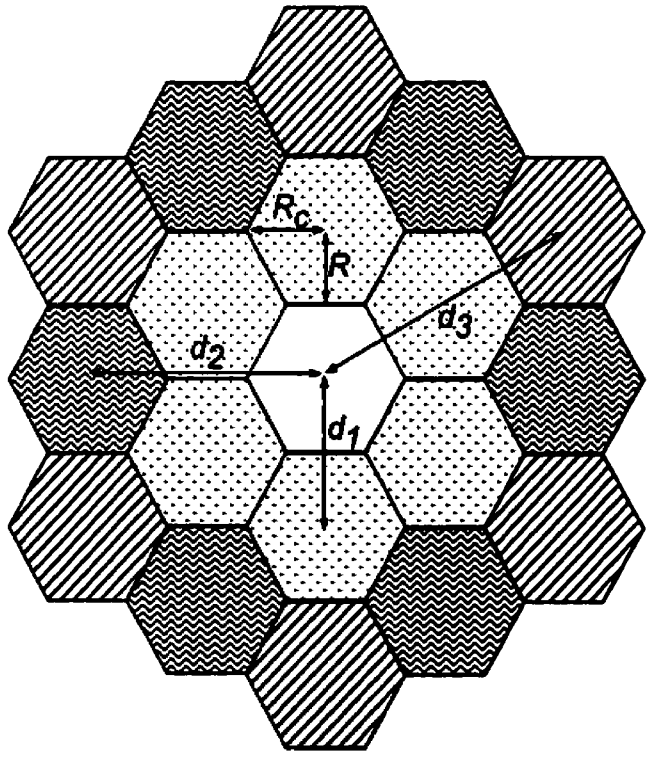


Figure 2.1: Répartition des cellules en 3 catégories

Nous allons supposer de plus que toutes les cellules émettent la même puissance P. Nous devons alors tenir compte des pertes subies lors de la propagation du signal

entre la station de base de la cellule et le mobile. Une manière simple de représenter les pertes est de prendre une expression de la forme r^4, c'est-à-dire que la puissance reçue s'écrit P/r^4 . C'est ce que nous allons considérer dans notre étude.

Dans ce cas, le rapport entre les interférences provenant de la cellule principale à un point à une distance r_0 du centre et celles provenant d'une cellule voisine i s'écrit (voir la figure 2.2):

$$\frac{I_i}{I_0} = \frac{r_0^4}{r_i^4} = \left[\frac{r_0}{r_i}\right]^4 \tag{2.7}$$

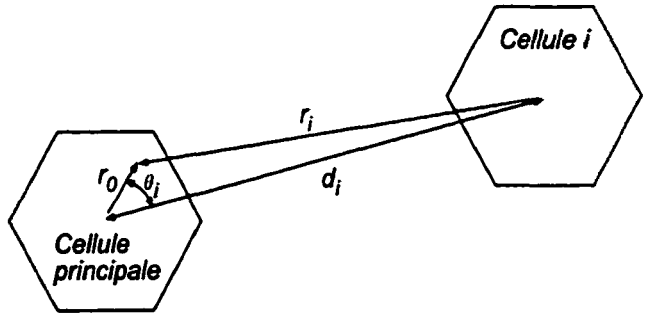


Figure 2.2: Distances aux stations de base des différentes cellules

Le calcul se ramène donc à un simple calcul de rapport de distance géométrique. Nous avons la relation :

$$r_i^2 = r_0^2 + d_i^2 - 2r_0 d_i \cos\theta_i \tag{2.8}$$

où θ_i est l'angle formé par les arcs mobile-antenne 0 et antenne i-antenne 0.

Le rapport entre toutes les interférences provenant des autres cellules et celles provenant de la cellule principale s'écrit donc :

$$\frac{I_{ac}}{I_0} = \sum_{i=1}^{18} \frac{I_i}{I_0} = \sum_{i=1}^{18} \left[\frac{r_0}{r_i}\right]^4 \tag{2.9}$$

$$= \sum_{i=1}^{18} \left[\frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + d_i^2 - 2r_0 d_i \cos\theta_i}}\right]^4 \tag{2.10}$$

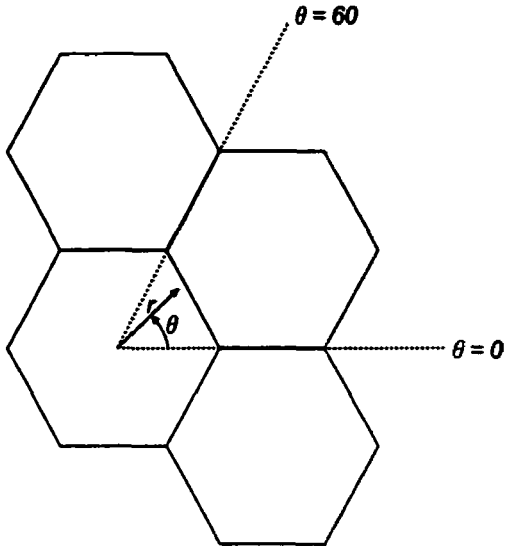


Figure 2.3: Symétrie du problème

Du fait de la symétrie du problème nous pouvons étudier les variations de I_{ac}/I_0 pour un mobile se trouvant entre les angles $\theta = 0^o$ et $\theta = 60^o$ (voir figure 2.3), et pour r variant entre 0 et R_c. Nous avons tracé les variations de ce rapport pour différentes valeurs de r, en fonction de l'angle θ : ce sont les schémas de la figure 2.4

où I_{ac} représente l'interférence totale provenant des autres cellules.

Pour un r donné le pire cas est le cas où $\theta = 30$. Cela veut dire que le mobile est aligné avec le centre de la cellule principale et le centre d'une cellule voisine. C'est aussi la position où le mobile est le plus proche d'une antenne voisine. Nous pouvons remarquer que pour un r donné, la variation due uniquement à l'angle θ peut être négligée : pour $r = 0,8R_c$, le rapport varie entre 0,68 et 0,8. Cela justifie le fait que dans la suite, nous effectuerons parfois les calculs pour des mobiles se trouvant à un angle fixé, et dans ce cas, nous prendrons toujours le pire cas.

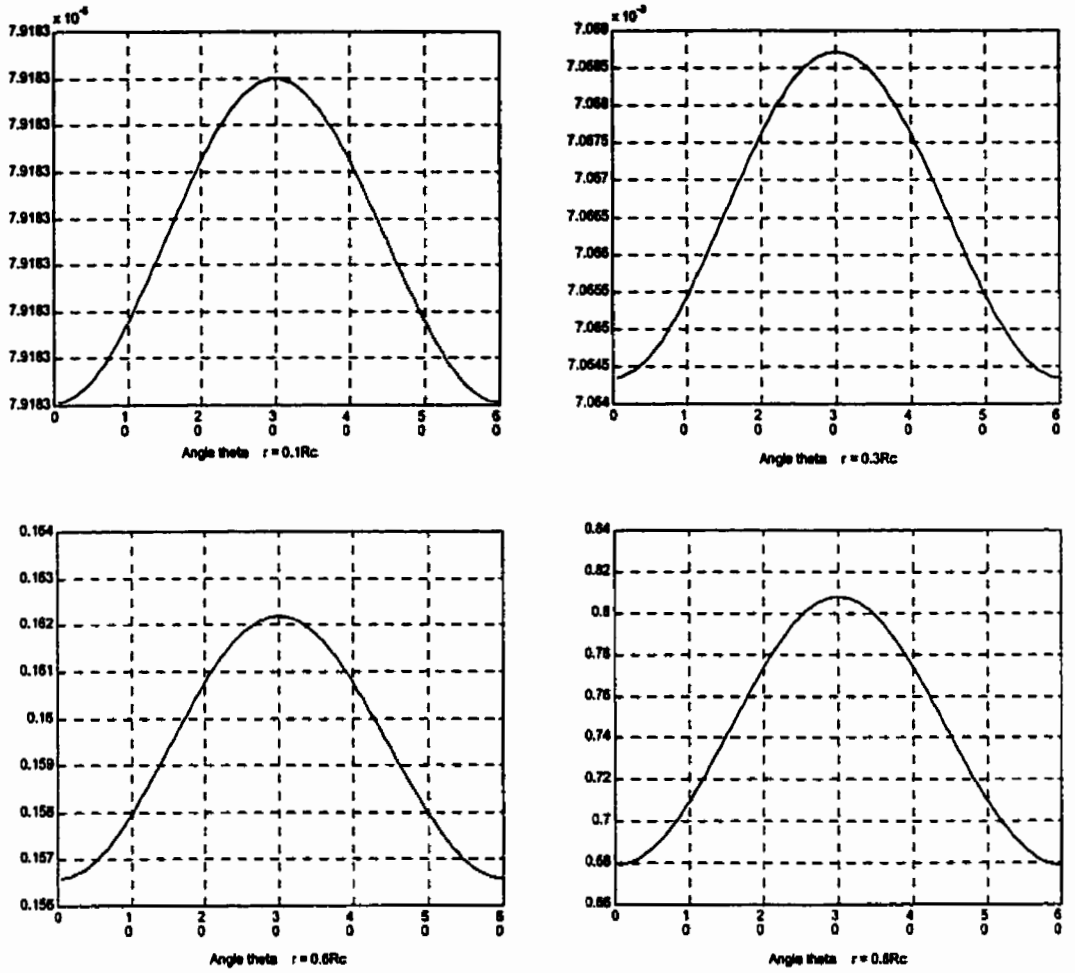


Figure 2.4: Variations de I_{ac}/I_0 pour différents valeurs de r

2.5 Déficit de puissance pour une cellule isolée

2.5.1 Puissance émise

Dans ce premier cas, nous considérons une cellule unique, isolée. Nous n'avons donc pas d'interférences provenant des autres cellules. Nous adopterons les notations suivantes :

- P_{pilote} sera la puissance du canal pilote émis par la station de base. Dans notre cas, nous supposons que la puissance allouée au canal pilote est fixée et

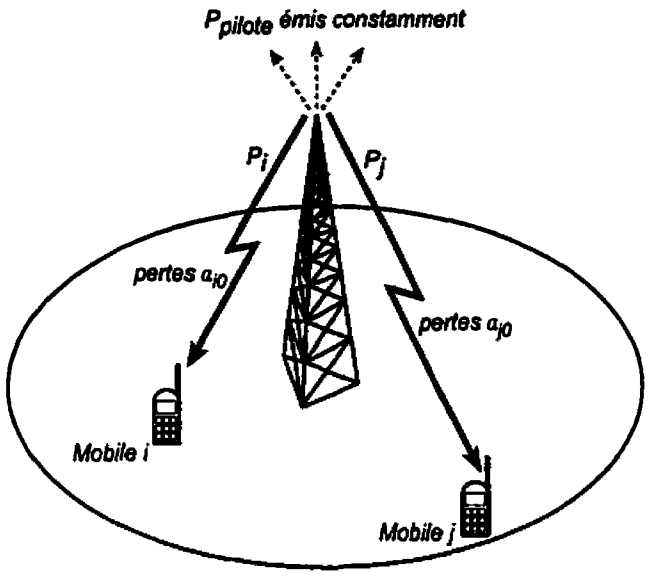


Figure 2.5: Notations adoptées

constante,

- P_i sera la puissance allouée par la station de base pour le mobile i,
- P_T représentera la puissance totale émise par la station de base, y compris le pilote. Nous avons donc la relation : $P_{pilote} + \sum_i P_i = P_T$,
- α_{i0} représentera l'atténuation due à la propagation entre la station de base et le mobile i. L'indice 0 servira lorsque nous considérerons une cellule non isolée. L'indice 0 se rapportera toujours à la cellule que nous étudions,
- γ sera le rapport signal sur interférence $\frac{C}{I}$ que doivent percevoir tous les mobiles. Il est relié au rapport signal-sur-bruit $\frac{E_b}{I_0}$ par le gain W/R :

$$\frac{C}{I} = \frac{R}{W} \cdot \frac{Eb}{I_0} \tag{2.11}$$

- enfin, $\mathcal{N}_{therm}$ représentera la puissance associée au bruit thermique.

Nous partons de l'hypothèse que tous les mobiles doivent percevoir le même $\frac{C}{I} = \gamma$. Avec la notation précédente, le rapport signal-sur-interférences perçu par le mobile i s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{C}{I} = \gamma = \frac{\textit{Puissance du signal reçu}}{\textit{Puissance des interférences}} = \frac{P_i/\alpha_{i0}}{(P_T - P_i)/\alpha_{i0} + \mathcal{N}_{therm}} \tag{2.12}$$

La puissance du signal reçu est égale à la puissance du signal envoyé par la station de base, divisée par l'atténuation que subit le signal durant le trajet antenne-mobile. La puissance associée aux interférences est constituée par la somme du bruit thermique et de toutes les puissances émises par la station de base, autres que la puissance destinée au mobile i (le signal envoyé au mobile i ne constitue pas une interférence pour lui-même). Les signaux envoyés par les autres mobiles actifs dans la cellule ne constituent pas des interférences pour le mobile i, la raison étant, nous le rappelons, que les communications dans le sens descendant et dans le sens montant ne se font pas sur les mêmes bandes de fréquences. Les seuls signaux pouvant donc être des sources d'interférences sont les signaux provenant des antennes des stations de base des cellules. Pour l'instant, nous ne considérons qu'une seule cellule, et donc nous n'avons qu'une seule source d'interférences. De l'équation (2.12), nous pouvons extraire la valeur de la puissance allouée par la station de base au mobile i, P_i :

$$P_i = \frac{\gamma}{1+\gamma}(P_T + \alpha_{i0}\mathcal{N}_{therm}) \tag{2.13}$$

Supposons que nous ayons N utilisateurs actifs dans la cellule en même temps. En utilisant le fait que $P_T = P_{pilote} + \sum_i^N P_i$ et l'équation (2.13), nous pouvons écrire

que :

$$\sum_{i}^{N} P_i = \frac{\gamma}{1+\gamma}\left(\sum_{i=1}^{N} P_T + \mathcal{N}_{therm}\sum_{i=1}^{N}\alpha_{i0}\right) \tag{2.14}$$

ou encore :

$$P_T - P_{pilote} = \frac{\gamma}{1+\gamma}\left(NP_T + \mathcal{N}_{therm}\sum_{i=1}^{N}\alpha_{i0}\right) \tag{2.15}$$

Finalement, nous arrivons à une expression pour la puissance totale émise par une antenne lorsqu'elle doit satisfaire les demandes de N usagers simultanément :

$$P_T = \frac{1}{1 - N\frac{\gamma}{1+\gamma}}\left(P_{pilote} + \frac{\gamma}{1+\gamma}\mathcal{N}_{therm}\sum_{i=1}^{N}\alpha_{i0}\right) \tag{2.16}$$

2.5.2 Nombre d'utilisateurs maximal

En examinant l'expression (2.16), nous pouvons remarquer qu'il existe une limite sur le nombre d'utilisateurs N que la station de base peut supporter. Cette limite provient du dénominateur : $(1 - \frac{N\gamma}{1+\gamma})$ qui doit rester positif pour que la puissance émise garde un sens. Ce qui nous donne un nombre N_{max} d'utilisateurs pouvant espérer être administrés en même temps :

$$N_{max} = \textit{partie entière}\left[\frac{1+\gamma}{\gamma}\right] \tag{2.17}$$

Lorsque le nombre d'utilisateurs dans la cellule se rapproche de ce nombre, la puissance à fournir grandit très rapidement, et si ce nombre dépasse N_{max}, la puissance à fournir par la station de base pour chaque utilisateur devient négative selon (2.16). L'interprétation physique est que le système ne peut trouver une solution stable qui satisfasse les conditions de signal sur bruit pour tous les usagers. Le contrôle de puissance demanderait alors une puissance infinie. Il donnerait l'ordre

sans arrêt d'augmenter la puissance émise pour chaque mobile. la station de base ne pourra pas répondre aux exigences de puissances, et les liens avec les différents mobiles se briseront. Cette notion de nombre maximal d'utilisateurs se retrouve dans d'autres travaux effectués [HB00] et porte le nom de capacité pôle ou *pole capacity.*

Pour des valeurs de $\gamma = 2,42E-2$ (correspondant à un $\frac{E_b}{I}$ de 5 dB, un taux de bits R=9,6kbps, et une largeur de bande de 1,25MHz), nous obtenons $N_{max} = 41$.

2.5.3 Probabilité de blocage

2.5.3.1 Probabilité de dépassement du seuil

D'après l'expression obtenue pour la puissance totale émise (2.16), on peut dire que :

$$Prob[P_T > P_{seuil}|N] = Prob[\sum_{i=1}^{N} \alpha_{i0} > \Omega(N)|N] \tag{2.18}$$

ou $\Omega(N)$ est de la forme suivante :

$$\Omega(N) = \frac{1+\gamma}{\gamma \mathcal{N}_{therm}} \left[P_{seuil}(1 - \frac{N\gamma}{1+\gamma}) - P_{pilote} \right] \tag{2.19}$$

2.5.3.2 Probabilité d'avoir N usagers dans une cellule

Nous utiliserons les résultats sur les systèmes de file d'attente avec nombre de serveurs limité[Ros], M/M/m avec pertes (c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'attente possible dans le système). Dans un tel serveur, la probabilité d'avoir N utilisateurs dans le système, $N \leq m$ est donnée par :

$$Prob[N] = \frac{\rho^N/N!}{\sum_{j=0}^{m} \rho^j/j!} \tag{2.20}$$

où ρ est la demande de trafic en Erlang dans la cellule. L'Erlang est une unité de mesure de trafic défini de la manière suivante :

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\text{nombre d'appels arrivant par sec}}{\text{nombre d'appels traités par sec}} \tag{2.21}$$

Un usager génère entre 0,02 et 0,03 Erlang ce qui correspond à une moyenne d'un appel d'une minute toutes les 33 minutes, ou d'un appel de cinq minutes toutes les deux heures et demie.

Dans notre situation, le nombre de serveurs limite sera donné par le nombre N maximal que le système peut supporter physiquement. Ce terme nous est apparu au cours des étapes de calcul. La première limite fut obtenue dans l'equation (2.16) et nous avions estimé sa valeur à 41.

D'autres limites apparaissent dans l'équation (2.19) qui donne la valeur des seuils pour chaque N . Nous pouvons remarquer que le seuil peut devenir négatif, ce qui veut dire que $Prob[\sum \alpha_i > \Omega(N)|N] = 1$ de manière certaine.

Si nous nous reportons à l'équation (2.19), il faut que N respecte la condition suivante pour que le seuil $\Omega(N)$ reste positif :

$$N < \frac{1+\gamma}{\gamma}\left(1 - \frac{P_{seuil}}{P_{pilote}}\right) \tag{2.22}$$

Pour avoir des ordres de grandeurs, pour des valeurs de $P_{pilote} = 2W$ et $P_{seuil} = 9,6W$, le nombre maximum d'usagers actifs en même temps est de l'ordre de 34.

2.5.3.3 Probabilité totale

La probabilité totale s'écrira donc :

$$P = \sum_{N} Prob\left[\sum_{i=1}^{N} \alpha_i > \Omega(N)|N\right] . Prob[N] \tag{2.23}$$

Il faut donc pouvoir évaluer la probabilité qu'une somme de variables aléatoires dépasse une certaine valeur. Pour cela, une manière simple est d'utiliser le théorème de la limite centrale qui permet de faire une approximation gaussienne pour une somme de variables aléatoires identiquement distribuées.

2.5.3.4 Rappel du théorème de la limite centrale

Soient $X_1, X_2, ..., X_N$, N variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées. Dans ce cas, la somme $\sum_i^N X_i$ peut être approchée par une loi Normale dont la moyenne et la variance sont égales à N fois la moyenne et la variance d'un X_i, c'est-à-dire que si :

$$\begin{aligned} E[X_i] &= \mu \\ Var[X_i] &= \sigma^2 \end{aligned} \tag{2.24}$$

Alors, nous pouvons faire l'approximation suivante :

$$Prob\left[\sum_{i=1}^{N} X_i < P_{seuil}\right] \simeq Prob\left[Norm(N\mu, N\sigma^2) < P_{seuil}\right] \tag{2.25}$$

$$= 1 - Q\left(\frac{P_{seuil} - N\mu}{\sigma\sqrt{N}}\right) \tag{2.26}$$

où $Norm(x, y)$ représente une normale de moyenne x et de variance y.

Nous allons dans ce chapitre présenter les résultats obtenus avec la théorie présentée plus tôt. Nous allons étudier différents cas de figures.

2.6 Intégration du facteur d'utilisation de la voix

2.6.1 Expression de la puissance émise

Nous avons vu dans la présentation que le facteur d'utilisation de la voix permettait de réduire les interférences générées par un lien, ce qui permet d'augmenter la capacité de la cellule. Notons ν_i la variable aléatoire qui indique si l'usager est en train d'émettre. Cette variable est une variable de type Bernoulli, de paramètre ν. On estime souvent la valeur de ν entre 40% et 50%. Reprenons l'expression du rapport signal sur bruit (2.12) :

$$\frac{E_b}{I} = \gamma = \frac{P_i/\alpha_{i0}}{(P_T - P_i)/\alpha_{i0} + \mathcal{N}_{therm}} \tag{2.27}$$

Pour tenir compte du facteur d'utilisation de la voix, il faut apporter les modifications suivantes :

- la puissance totale fournie par l'antenne s'écrit maintenant :

$$P_T = P_{pilote} + \sum_{i=1}^{N} \nu_i P_i \tag{2.28}$$

- les interférences que perçoit le mobile i deviennent :

$$I_i = P_{pilote} + \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \nu_j P_j = P_T - \nu_i P_i \tag{2.29}$$

Nous obtenons donc une nouvelle expression pour la puissance émise pour un utilisateur :

$$P_i = \frac{\gamma}{1 + \nu_i \gamma}(P_T + \alpha_{i0}\mathcal{N}_{therm}) \tag{2.30}$$

Cette fois-ci, on tient compte de (2.28) pour relier les P_i à la puissance totale, ce qui donne :

$$P_T = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^{N} \frac{\nu_i \gamma}{1+\nu_i \gamma}} \left(P_{pilote} + \mathcal{N}_{therm} \sum_{i=1}^{N} \frac{\nu_i \gamma}{1+\nu_i \gamma} \alpha_{i0} \right) \tag{2.31}$$

Nous avons donc une expression où interviennent 3 variables aléatoires :

- N le nombre d'usagers ayant un lien avec l'antenne,
- ν_i le facteur d'activité de l'usager i,
- et α_{i0} l'atténuation du signal. Cette atténuation est directement liée à la distance de l'usager i à l'antenne de la cellule.

Nous allons traiter le problème en conditionnant sur les différentes variables aléatoires. Nous allons supposer que les variables aléatoires peuvent être traitées comme étant indépendantes entre elles. Cela veut dire que par exemple le facteur d'utilisation d'un usager ne dépend pas du nombre d'usagers ayant un lien en même temps avec l'antenne, ni de la position de ces dits usagers. Nous allons étudier le cas suivant en exemple : supposons que nous ayons N usagers ayant un lien, et que k seulement d'entre eux soient actifs à un instant donné. La puissance émise à ce moment-là par l'antenne sera donnée par :

$$P_T = \frac{1}{1 - k\frac{\gamma}{1+\gamma}} \left(P_{pilote} + \frac{\gamma}{1+\gamma} \mathcal{N}_{therm} \sum_{i=1}^{k} \alpha_{i0} \right) \tag{2.32}$$

On peut alors étudier la probabilité que cette puissance dépasse le seuil de puissance. Remarquons que la puissance émise pour k usagers actifs parmi N est la même que pour k usagers lorsqu'on ne tient pas compte du facteur de voix.

Il faut par la suite, tenir compte de la probabilité qu'il y ait k usagers actifs en même temps sur les N. Puisque la variable ν_i est une variable de Bernoulli, la probabilité d'avoir k usagers actifs pour N usagers connectés est donnée[Ros] par :

$$Prob[k \text{ actifs sur } N] = C_N^k \nu^k (1-\nu)^{N-k} \tag{2.33}$$

où $C_N^k = \frac{N!}{k!(N-k)!}$. Il faut également tenir compte de la probabilité qu'il y ait N usagers desservis en même temps par l'antenne. Cette probabilité est donnée par les probabilités de files d'attente (2.20), comme nous l'avons vu précédemment.

2.6.2 Nombre limite d'usagers

Dans l'étude que nous avions faite pour une cellule isolée sans tenir compte du facteur de voix, il était apparu un nombre limite d'usagers au-delà duquel le système ne pouvait plus satisfaire le rapport signal sur bruit pour tous les usagers. Le système est alors instable et la cellule va chercher à augmenter continuellement la puissance envoyée à chaque usager, de manière à rétablir un rapport signal sur bruit acceptable.

Dans le cas où nous tenons compte du facteur de voix, le nombre d'usagers à qui la cellule envoie de la puissance varie selon les variables d'activité de chaque usager. Seul des calculs probabilistes peuvent donc être faits sur ce nombre limite. En fait le nombre maximal d'usagers à qui l'antenne peut envoyer de la puissance simultanément reste le même que dans le cas sans facteur de voix, à savoir :

$$N_{max} = \textit{partie entière}\left[\frac{1+\gamma}{\gamma}\right] \tag{2.34}$$

Mais maintenant, étant donné que le facteur de voix intervient, nous pouvons seulement avoir une probabilité que le nombre d'utilisateurs actifs en même temps dépassent ce nombre maximal. Cette probabilité est donnée, pour N usagers connectés à l'antenne, par la formule suivante et est représentée dans la figure 2.6.

$$Prob[N_{actifs} > N_{max}] = \sum_{k>N_{max}}^{N} C_N^k \nu^k (1-\nu)^{N-k} \tag{2.35}$$

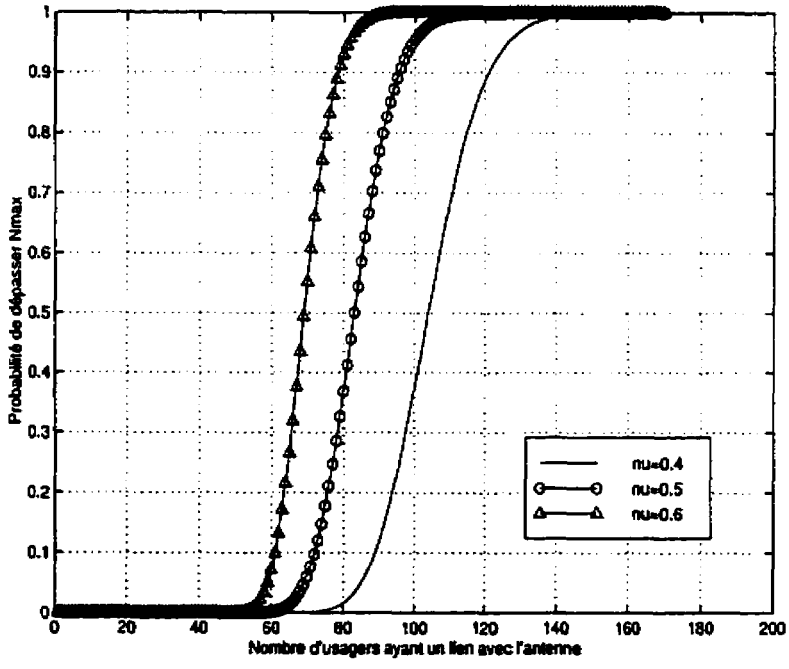


Figure 2.6: Probabilité de dépasser N_{max} en considérant différents niveaux de facteurs de voix

2.7 Résultats pour le cas d'une cellule isolée

2.7.1 Expressions des α_{i0}

Les α_{i0} représentent les pertes dues uniquement à la propagation entre deux points du réseau. Il est très difficile d'avoir une formule exacte donnant ce type

de pertes, parce qu'elles dépendent fortement de l'environnement dans lequel on se trouve. Plusieurs formules empiriques ont été développées, l'une des plus connues étant sans doute celle de Hokomura-Hata[Hat80], basée sur des mesures faites au Japon.

Cependant, la formulation la plus souvent utilisée dans les travaux est la suivante :

$$\alpha = r^4 10^{\zeta}/10 \tag{2.36}$$

où r représente la distance séparant les deux points du réseau entre lesquels nous voulons calculer les pertes, et ζ est une log-normale de moyenne nulle et de variance $\sigma^2 = 8$ dB représentant les variations dues au "shadowing" ou effets d'ombrages. Nous allons utiliser cette représentation pour effectuer nos calculs. Mais dans le contexte présent, nous ne nous intéresserons qu'au terme de pertes se rapportant à la distance. En effet, l'effet de manque de puissance nous paraît principalement dépendre de la position des usagers dans la cellule. Si les usagers sont très éloignés de la station de base, ils demanderont plus de puissance et le déficit de puissance risque de survenir rapidement. C'est pour cela que nous prendrons simplement l'expression suivante pour les facteurs d'atténuation :

$$\alpha = r^4 \tag{2.37}$$

2.7.2 Premières analyses

Nous allons d'abord faire une analyse simple des différentes expressions trouvées dans le chapitre précédent. La courbe 2.7 nous donne la distance maximale où peuvent se trouver les usagers suivant le nombre d'usagers actifs dans la cellule.

Cette courbe a été obtenue grâce à la formule (2.16) donnant la puissance émise pour une cellule isolée et en supposant que tous les usagers soient à la même distance d de la station de base. Dans ce cas, nous avons la relation suivante :

$$d = \sqrt[4]{\frac{1+\gamma}{NN_0\gamma}\left[P_{seuil}\left(1 - N\frac{\gamma}{1+\gamma}\right) - P_{pilote}\right]} \tag{2.38}$$

La courbe a été tracée pour les valeurs suivantes : $P_{pilote} = 2W$ $P_{seuil} = 9,6W$ ce

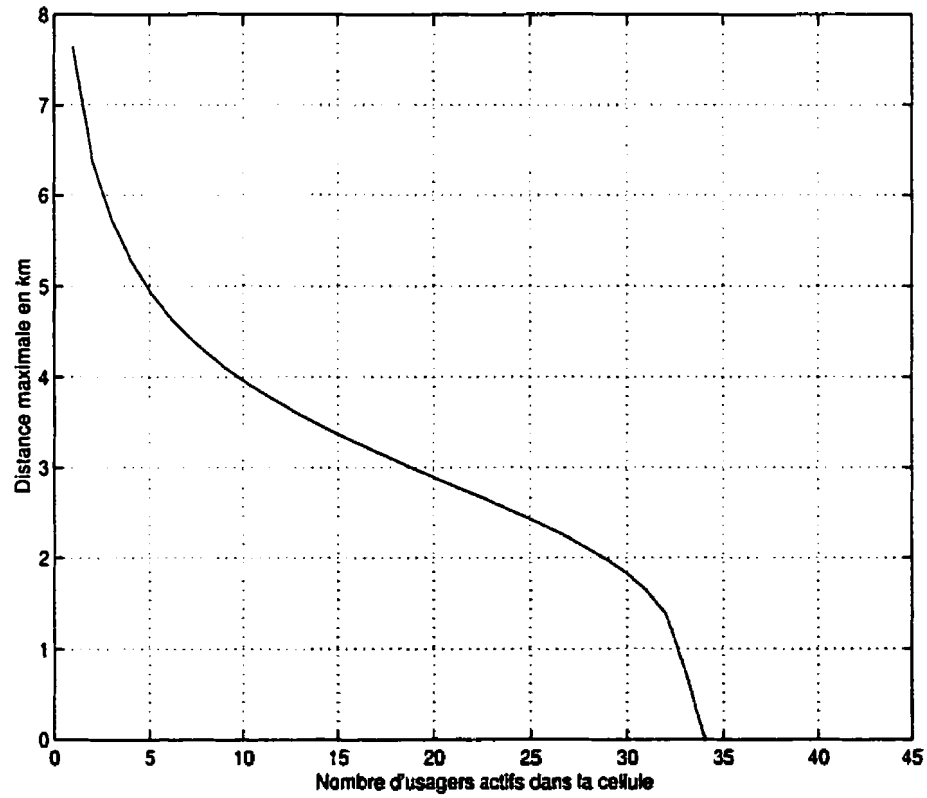


Figure 2.7: Distance maximale des usagers

qui correspond à un seuil équivalent à 95% de la puissance réservée aux utilisateurs, pour une puissance totale disponible à la station de base de 10 W.

Le graphique 2.8 nous donne la puissance émise par la station de base suivant le nombre d'utilisateurs dans la cellule. Tous les usagers ont encore la même distance,

mais nous avons fait varier cette distance, pour étudier le comportement de la puissance émise. La formule utilisée pour tracer la courbe est toujours l'équation (2.16).

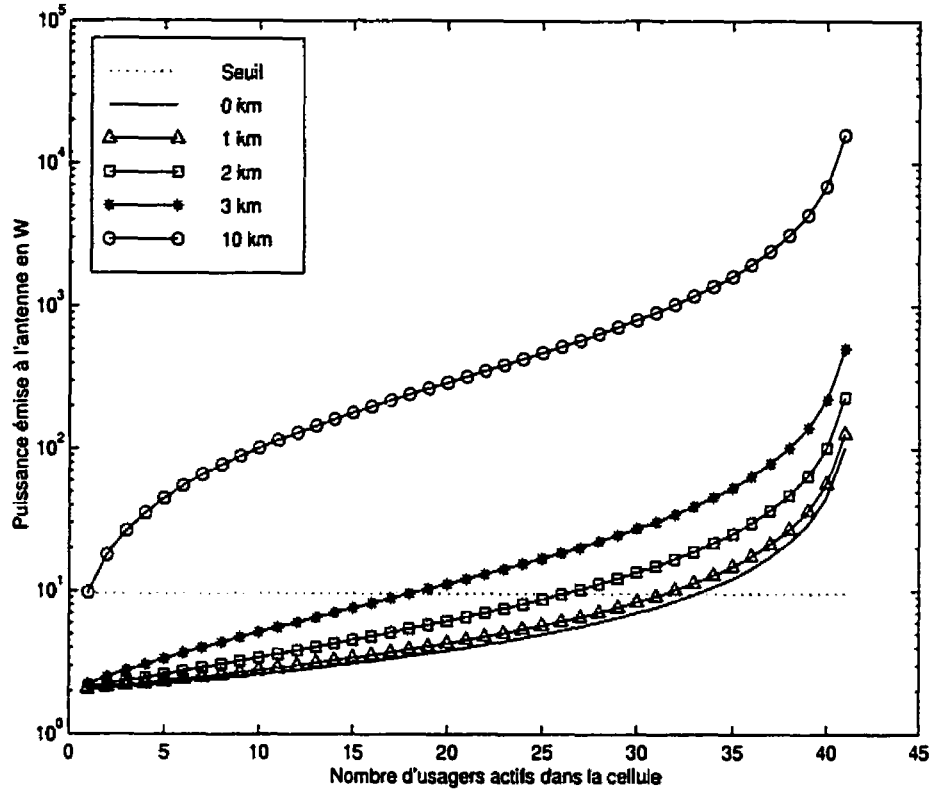


Figure 2.8: Puissance émise pour différentes distances des usagers

La courbe intitulée "0 km" correspond en fait au cas où il n'y aurait pas de pertes du tout entre la station de base et l'usager (bref, c'est comme si tous les usagers étaient collés à la station de base...). C'est le cas idéal, qui va nous servir de référence.

De manière générale, l'étude de ces graphes montre que pour des cellules de petite taille, de rayon inférieur à 2 km, le phénomène de déficit de puissance ne sera pas le phénomène limitatif. Sur la figure 2.8, la puissance émise dépasse le seuil

seulement à partir de 30 usagers actifs en même temps, pour une cellule de 2 km. Sur la figure 2.7, nous pouvons remarquer la même chose : pour que la station de base puisse administrer 30 mobiles en même temps, il faut que ceux-ci soit à moins de 2 km de la station de base. Par contre, cela se dégrade rapidement lorsque les cellules deviennent plus grosses : pour des cellules de 4 km de rayon, on voit que le seuil est dépassé pour 18 usagers environ.

Il faut noter que ces courbes correspondent à chaque fois à un pire cas (les usagers se trouvent tous sur le bord de la cellule), mais nous donnent une bonne idée sur les besoins de puissance en fonction des positions des mobiles, et aussi par rapport à la taille que devrait avoir la cellule. Lorsque la demande est forte dans une zone donnée, il faudra découper cette zone en petites cellules pour espérer obtenir une qualité de service satisfaisante.

2.7.3 Répartition uniforme suivant la distance

Nous allons considérer dans ce chapitre que nous avons une répartition uniforme des usagers suivant la distance par rapport à la station de base. C'est-à-dire que, si R est le rayon de la cellule alors $\forall 0 \leq r \leq R$, $Prob[r] = \frac{1}{R}$. Cela ne correspond bien sûr pas à une répartition uniforme dans l'espace. Cette répartition veut dire que plus on se rapproche de la station de base, plus le nombre d'usagers potentiels augmente. Plus précisément, cela nous donne la probabilité suivante :

$$p(r, \theta) = \frac{3}{2\pi R} \tag{2.39}$$

Nous devons analyser le comportement statistique de $\sum \alpha$ qui est donc ici une somme de variables aléatoires uniformes identiquement distribuées. De plus, nous

considérerons que ces variables sont indépendantes entre elles. Cela semble être une hypothèse correcte, puisqu'à priori, l'appel d'un usager est indépendant de l'appel d'un autre.

2.7.3.1 Application du théorème de la limite centrale

Dans le cas d'une répartition uniforme suivant r, pour r variant de 0 à R, nous avons :

$$\begin{aligned} E[\alpha] &= \int_0^R r^4.Prob[r]\,dr &= \tfrac{1}{5}R^4 \\ E[\alpha^2] &= \int_0^R r^8.Prob[r]\,dr &= \tfrac{1}{9}R^8 \\ Var[\alpha] &= E[\alpha^2] - E[\alpha]^2 &= \tfrac{16}{225}R^8 \end{aligned} \tag{2.40}$$

et donc, nous utiliserons l'approximation suivante :

$$Prob\left[\sum_{i=1}^{N}\alpha_i > \Omega(N)|N\right] \simeq Prob\left[Norm(N\frac{R^4}{5}, N\frac{16R^8}{225}) > \Omega(N)|N\right] \tag{2.41}$$

2.7.3.2 Résultats sans tenir compte du facteur de voix

Nous allons nous intéresser à différentes tailles de cellules. Si nous observons l'expression (2.19) donnant les valeurs des seuils $\Omega(N)$ dans le cas d'une cellule isolée, nous remarquons que ces seuils ne dépendent pas de la taille de la cellule, mais uniquement de la puissance du pilote, du nombre d'usagers actifs et de la puissance seuil que nous nous fixons. Prenons toujours les valeur suivantes : $P_{pilote} = 2W$ et $P_{seuil} = 9,6W$. Dans ce cas, les valeurs des seuils suivants le nombre d'usagers sont donnés par le tableau 2.1.

La valeur du seuil devient négative à partir de 34 usagers. Cela veut dire que quelle que soit la position des usagers dans le secteur, la station de base dépassera

Nombre d'usagers	Seuil	Nombre d'usagers	Seuil
1	9,815416612504874e+015	2	9,509684128428440e+015
3	9,270395164435200e+015	4	8,898219160275574e+015
5	8,592486676199141e+015	6	8,286754192122708e+015
7	7,981021708046274e+015	8	7,675289223969841e+015
9	7,369556739893409e+015	10	7,063824255816976e+015
11	6,758091771740543e+015	12	6,452359287664109e+015
13	6,146626803587675e+015	14	5,840894319511242e+015
15	5,535161835434809e+015	16	5,229429351358377e+015
17	4,923696867281944e+015	18	4,617964383205512e+015
19	4,312231899129078e+015	20	4,006499415052644e+015
21	3,700766930976210e+015	22	3,395034446899778e+015
23	3,089301962823346e+015	24	2,783569478746911e+015
25	2,477836994670478e+015	26	2,172104510594045e+015
27	1,866372026517612e+015	28	1,560639542441178e+015
29	1,254907058364747e+015	30	9,491745742883144e+014
31	6,434420902118800e+014	32	3,377096061354474e+014
33	3,197712205901468e+013	34	-2,737553620174195e+014
35	-5,794878460938521e+014	36	-8,852203301702848e+014
37	-1,190952814246719e+015	38	-1,496685298323152e+015
39	-1,802417782399584e+015	40	-2,108150266476017e+015
41	-2,413882750552450e+015	42	-2,719615234628886e+015
43	-3,025347718705319e+015	44	-3,331080202781751e+015
45	-3,636812686858184e+015		

Tableau 2.1: Valeurs des seuils pour une cellule isolée

de toute manière le seuil maximal de puissance. Cette valeur de 34 usagers était aussi donnée par l'expression (2.22).

Le graphique 2.9 nous donne la probabilité de dépasser le seuil en fonction du nombre d'usagers. Les courbes correspondent à différentes tailles de cellules. Nous avons fait varier le rayon des cellules entre 1 km et 10 km. Ces courbes confirment ce que nous avions dit précédemment à savoir que pour des petites cellules (de rayon inférieur à 3 km), la cellule peut supporter jusqu'à un peu plus de 30 usagers sans risquer de dépasser le seuil fatidique des 95%.

Nous pouvons maintenant calculer la probabilité totale de déficit de puissance sur la cellule, en appliquant la formule (2.23). Le résultat dépend bien sûr de la demande en trafic ρ dans la cellule. Les courbes de la figure 2.10 montrent l'évolution de la probabilité de blocage dans une cellule en fonction de la demande en Erlang. Les courbes correspondent à différentes tailles de cellule. Nous constatons que pour une cellule de 1 km de rayon, on peut garder une probabilité de blocage inférieure à 1% tant que la demande ne dépasse pas 23 Erlangs environ. Pour de vraiment grosses cellules (rayon de l'ordre de 10 km), nous constatons que les performances sont vraiment médiocres : la probabilité de manque de puissance est supérieure à 10%, même lorsque la demande est faible (23 Erl).

2.7.3.3 Prise en compte du facteur d'utilisation de la voix

Les différentes figures tracées précédemment se basaient sur les formules qui ne tenaient pas compte du facteur d'utilisation de la voix. Si nous considérons le facteur de voix, nous obtenons alors les résultats résumés dans les figures 2.11 et 2.12.

On se rend compte que le facteur de voix a un effet considérable sur la capacité de la cellule. Elle permet quasiment de doubler la capacité. Bien sur, cela dépend du facteur d'utilisation de la voix pris pour le calcul. Ici, nous avons pris un facteur d'utilisation de 40%.

2.7.4 Répartition uniforme dans l'espace

Cette fois-ci, nous allons nous intéresser au cas où les usagers sont répartis uniformément dans l'espace dans la cellule, et non plus seulement suivant le rayon. Cette répartition donne donc un plus grand nombre d'usagers en bordure de cellule.

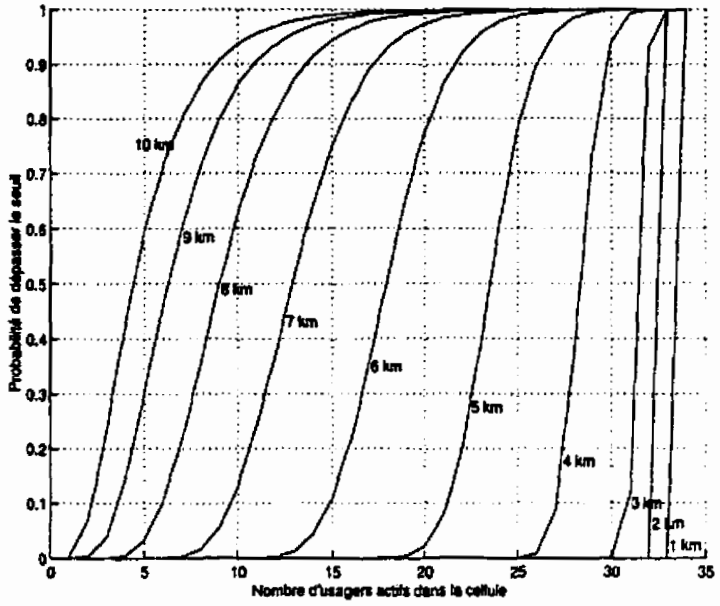


Figure 2.9: Probabilité de dépassement de seuil, cellule isolée, répartition uniforme suivant la distance, sans facteur de voix. La distance en km représente le rayon de la cellule

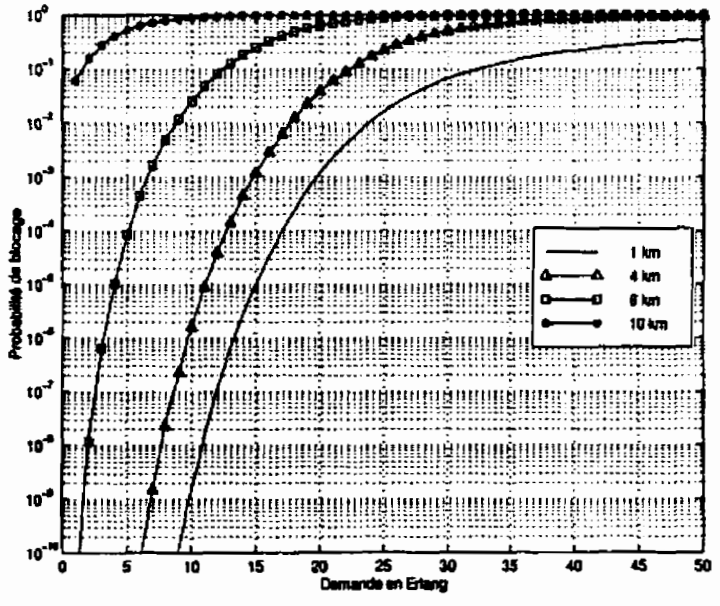


Figure 2.10: Déficit de puissance, cellule isolée, répartition uniforme suivant la distance, sans facteur de voix

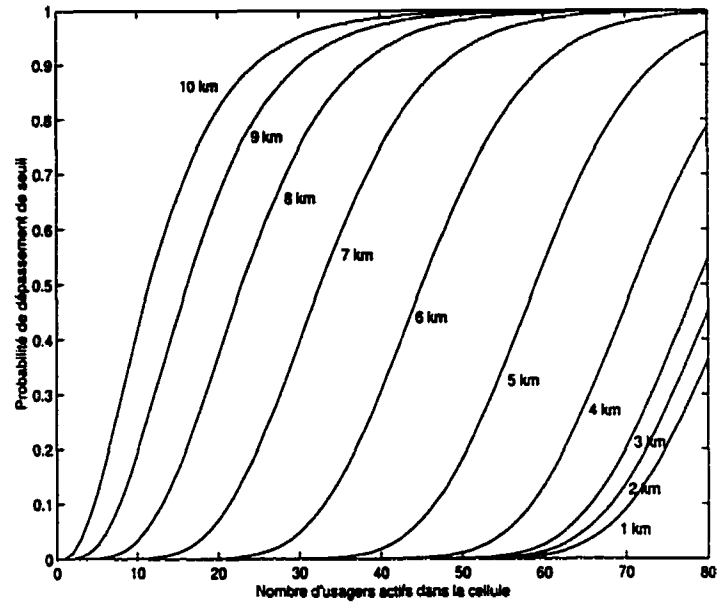


Figure 2.11: Dépassement de seuil, cellule isolée, répartition uniforme suivant la distance, facteur de voix de 40%

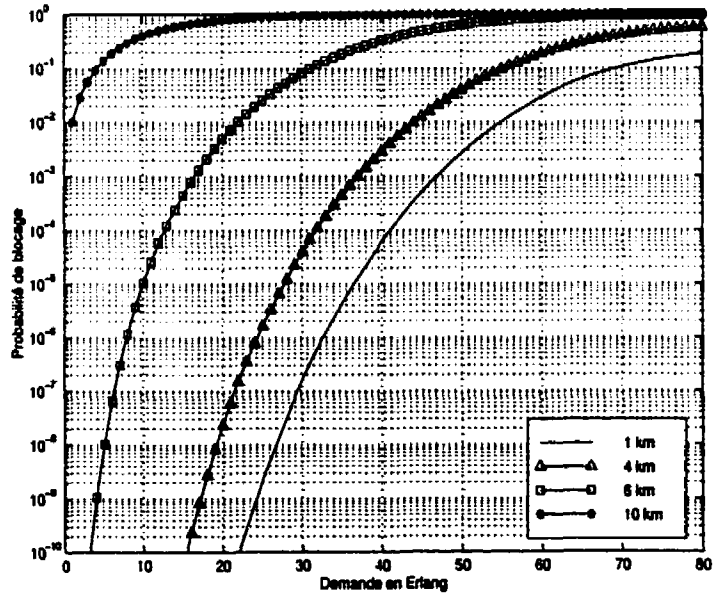


Figure 2.12: Déficit de puissance, cellule isolée, répartition uniforme suivant la distance, facteur de voix de 40%

Il faut donc s'attendre à ce que la probabilité d'entrer en manque de puissance soit beaucoup plus élevée que pour la répartition uniforme suivant la distance étudiée précédemment.

Comme notre formule d'évaluation de la probabilité tient compte seulement de la distance r, il nous faut trouver la densité de probabilité d'une uniforme dans l'espace, ramenée en coordonnées polaires. Cette densité s'écrit :

$$p(r,\theta) = \frac{3r}{\pi R^2} \tag{2.42}$$

2.7.4.1 Application du théorème de la limite centrale

Dans le cas d'une répartition uniforme dans l'espace, pour r variant de 0 à R, nous avons :

$$\begin{aligned} E[\alpha] &= \int_0^R r^4.Prob[r]\,dr &&= \tfrac{1}{3}R^4 \\ E[\alpha^2] &= \int_0^R r^8.Prob[r]\,dr &&= \tfrac{1}{5}R^8 \\ Var[\alpha] &= E[\alpha^2] - E[\alpha]^2 &&= \tfrac{4}{45}R^8 \end{aligned} \tag{2.43}$$

et donc, nous utiliserons l'approximation suivante :

$$Prob\left[\sum_{i=1}^{N}\alpha_{i0} > \Omega(N)|N\right] \simeq Prob\left[Norm(N\frac{R^4}{3}, N\frac{4}{45}R^8) > \Omega(N)|N\right] \tag{2.44}$$

2.7.4.2 Sans facteur de voix

Nous obtenons les courbes suivantes pour la répartition uniforme dans l'espace. Les courbes obtenues dans l'étude précédente (cas de la répartition uniforme suivant la distance) sont aussi incluses dans les figures pour permettre d'effectuer une comparaison entre les probabilités obtenues. Sur la figure 2.13, les courbes en pointillés correspondent aux résultats obtenus dans l'étude précédente.

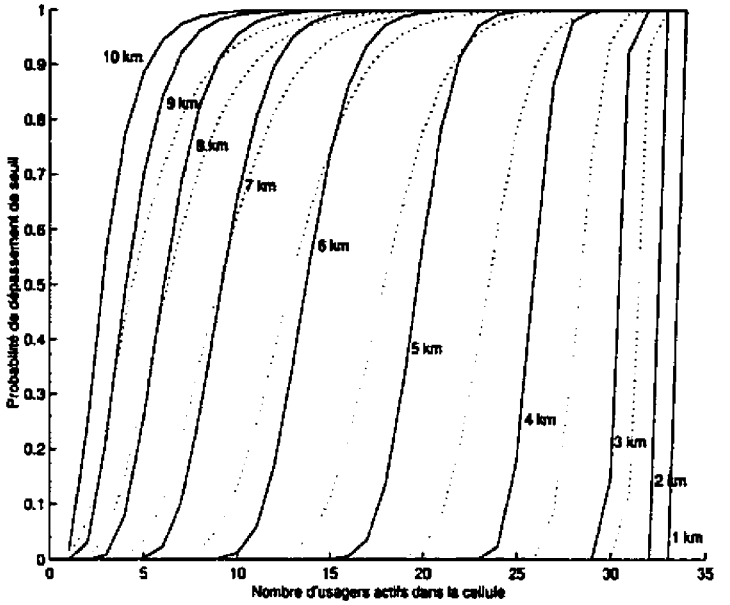


Figure 2.13: Dépassement du seuil, cellule isolée, répartition uniforme dans l'espace, sans facteur de voix

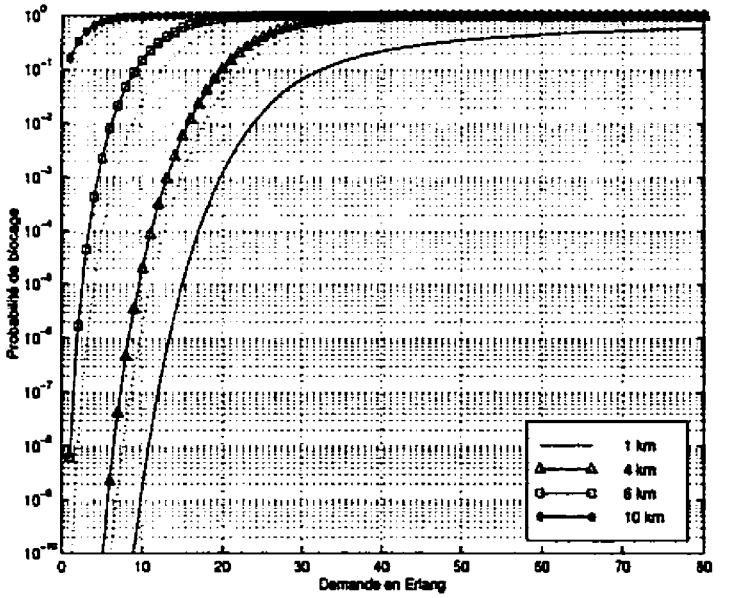


Figure 2.14: Déficit de puissance, cellule isolée, répartition uniforme dans l'espace, sans facteur de voix

Comme nous pouvions l'attendre, les probabilités sont plus élevées. Cette probabilité plus grande est due au plus grand nombre d'usagers présents en bordure de cellule pour une répartition uniforme dans l'espace. Cependant, l'augmentation de probabilité n'est perceptible que pour des cellules de taille assez grande : les cellules dont le rayon est de l'ordre de quelques km ne voient pas leur probabilité augmenter de beaucoup.

2.7.4.3 Avec facteur de voix

La figure 2.15 montrent les courbes résultats pour la répartition uniforme dans l'espace, mais en tenant compte cette fois ci du facteur de voix. Les remarques restent les mêmes que dans le cas où l'on ne tenait pas compte du facteur de voix.

Les courbes en pointillés correspondent aux courbes obtenus pour une distribution uniforme suivant la distance pour permettre de comparer les effets de la répartition. Encore une fois, elles sont négligeables pour des cellules de petite taille et prennent de plus en plus d'importance lorsqu'on augmente le rayon des cellules. Les différences de capacité pouvant aller jusqu'à 5 Erlangs pour des cellules de rayon d'environ 4 à 6 km.

2.8 Comparaison avec la probabilité de blocage dans le sens montant

Nous allons maintenant comparer les courbes que nous avons obtenues avec celles correspondant à la probabilité de blocage dans le sens montant. Nous allons utiliser une formule tirée du livre de Jhong Sam Lee [LM98]. Le lecteur souhaitant plus de détails concernant la théorie permettant d'arriver à cette formule, est invité à consulter l'ouvrage cité.

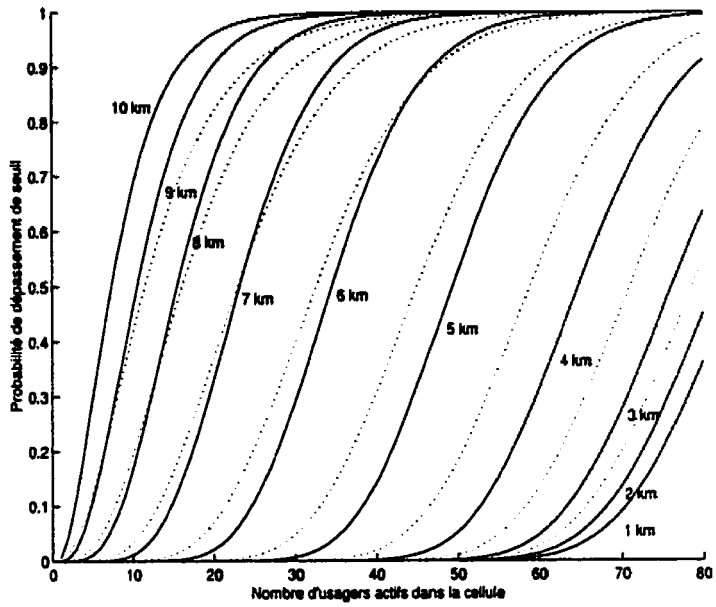


Figure 2.15: Dépassement de seuil, répartition uniforme dans l'espace, cellule isolée, facteur de voix de 40%

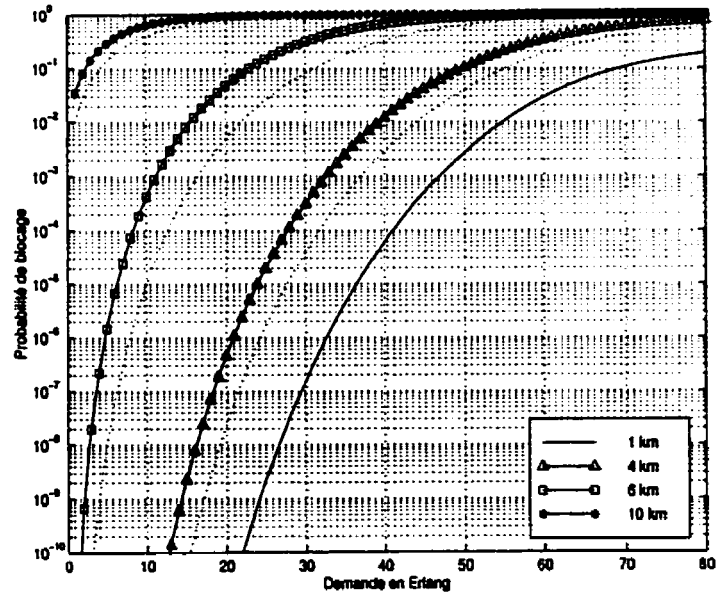


Figure 2.16: Déficit de puissance, répartition uniforme dans l'espace, cellule isolée, facteur de voix de 40%

La probabilité de blocage dans le sens montant est imposée par le taux d'interférences perçu par la station de base. Si ce taux dépasse un certain seuil, la station de base décide de ne plus accepter de nouvel usager, sous peine de rendre le système instable. Souvent, ce taux est pris égal à 10 fois la puissance associée au bruit thermique. La notation communément adoptée ([GJP+91],[VV93]) est $\eta = \frac{\text{bruit thermique}}{\text{interférences}} = 0,1$. En partant de cette hypothèse, les calculs menés dans l'ouvrage de Lee aboutissent au résultat suivant (les notations du livre ont été conservées telles quelles) :

$$B_{CDMA} = Q\left(\frac{\frac{W}{R_b}X_0 - \overline{M}\,\overline{\alpha_r}\,\rho_{med}e^{\frac{1}{2}\beta^2\sigma_{dB}^2}(1+\xi)}{\sqrt{\overline{M}\,\overline{\alpha^2}\,\rho_{med}^2 e^{2\beta^2\sigma_{dB}^2(1+\xi')}}}\right) \tag{2.45}$$

avec :

W largeur de la bande passante,

R_b taux de bits par sec,

X_0 le seuil de blocage. Il est relié à η de la manière suivante : $X_0 = 1 - \eta$,

$\overline{M}$ la demande de trafic en Erlang,

$\overline{\alpha_r}$ et $\overline{\alpha_r^2}$ sont respectivement la moyenne et la variance du facteur de voix,

$\beta = \ln(10)/10$,

m_{dB} et σ_{dB} sont la moyenne et la variance du rapport signal sur bruit des signaux des mobiles reçus à la station de base,

$\rho_{med} = e^{\beta m_{dB}}$,

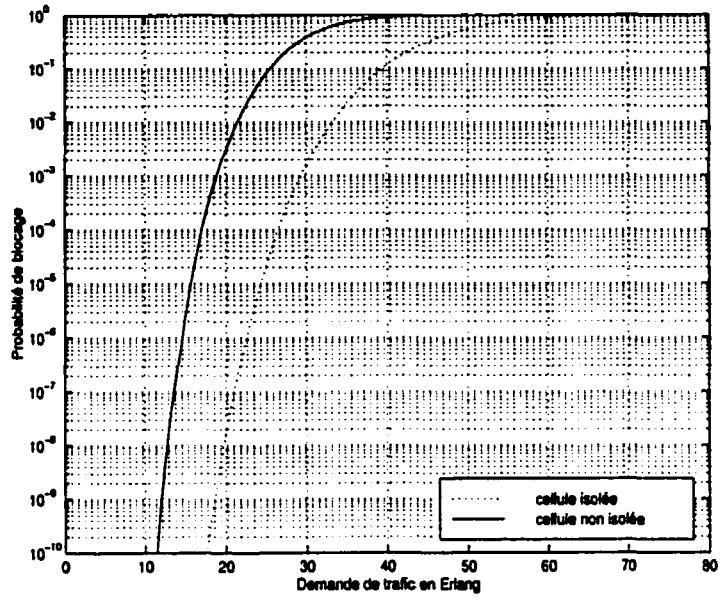


Figure 2.17: Probabilité de blocage dans le sens montant

ξ et ξ' sont des coefficients prenant en compte les interférences provenant des autres cellules. Si on considère une cellule isolée, ces deux paramètres sont nuls.

Nous avons tracé les courbes pour une cellule isolée et une cellule non isolée sur la figure 2.17. Les valeurs des différentes variables sont les suivantes : $W/R_b = 128$, $X_0 = 0,9$, $\overline{\alpha_r} = 0,4$, $\overline{\alpha_r^2} = 0,31$, $m_dB = 7dB$, $\sigma_dB = 2,5dB$. Pour la cellule non isolée, les facteurs d'interférences valent $\xi = \xi' = 0,55$.

De manière à pouvoir comparer les probabilités de blocage dans les deux sens, nous avons superposé les courbes de blocage dans le sens montant aux courbes que nous avons obtenues (figures 2.18 et 2.19). La probabilité de blocage dans le sens montant ne dépend pas de la position des mobiles dans la cellule puisque le contrôle de puissance fait en sorte que tous les signaux envoyés par les mobiles arrivent avec la même puissance à la station de base. Nous nous rendons compte que pour des petites cellules, le blocage dans le sens montant va toujours être le facteur limitant

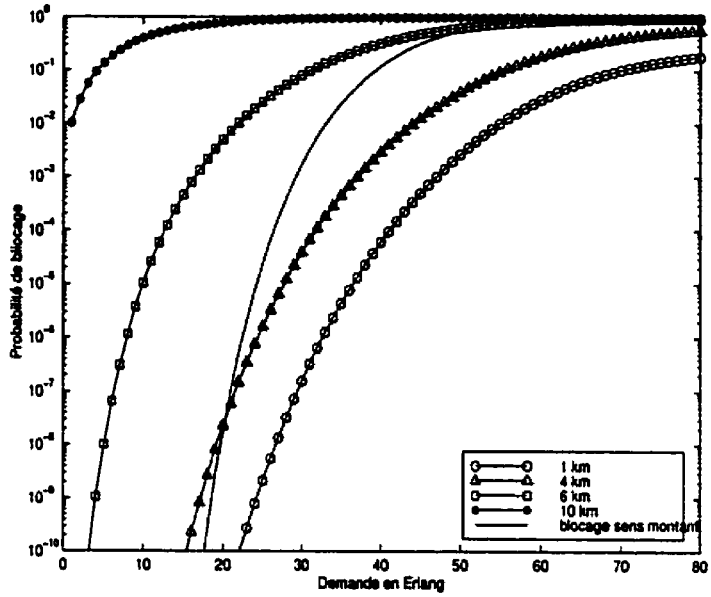


Figure 2.18: Comparaison des probabilités de blocage dans les deux sens - répartition uniforme suivant la distance

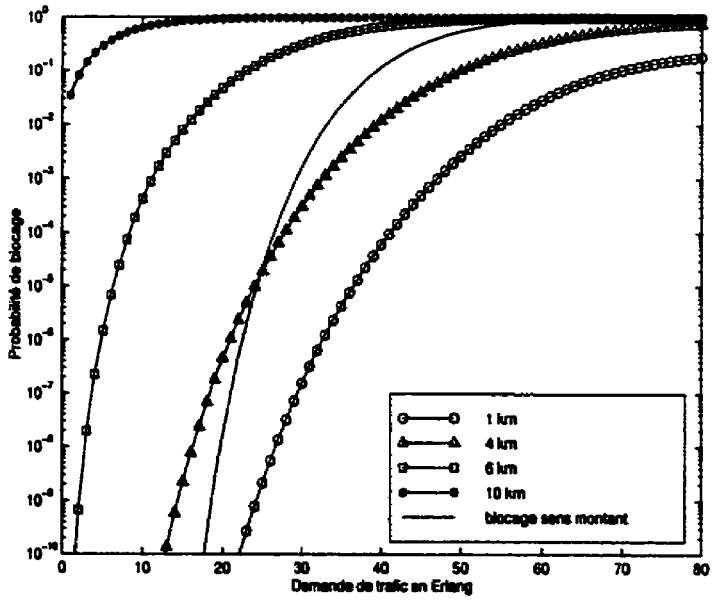


Figure 2.19: Comparaison des probabilités de blocage dans les deux sens - répartition uniforme dans l'espace

de la capacité. La probabilité qu'un déficit de puissance survienne reste plus faible que celui d'un blocage du aux interférences émises par les mobiles. Mais, on voit que pour des cellules de taille plus grande, par exemple de rayon égal à 4 km, le déficit de puissance peut arriver avant le blocage dans le sens montant.

Ceci se produit pour les demandes de trafic faibles. L'explication est que pour des cellules de taille assez grandes, il se peut que plusieurs mobiles très éloignés de la station de base demandent à avoir la communication. Dans ce cas, ces mobiles vont requérir de fortes quantités de puissance de la part de la station de base. Par contre leur nombre reste suffisamment faible pour que les interférences qu'elles génèrent ne causent pas de blocage dans le sens montant. Il faut émettre une réserve cependant sur cette observation : plus la taille de la cellule est grande, plus les mobiles sont susceptibles d'être éloignés. Et le mobile ayant une puissance très limitée, il se peut que ce dernier ne puisse pas créer de liens avec la station de base, faute d'avoir suffisamment d'énergie.

D'autre part, dans le cas d'une cellule de rayon 4 km, lorsque la probabilité de déficit de puissance est supérieure à la probabilité de blocage dans le sens montant, cela se produit pour des probabilités négligeables : de l'ordre de 10^{-4} pour une distribution uniforme suivant la distance, et de l'ordre de 10^{-10} pour une distribution uniforme dans l'espace. On peut donc dire que ce n'est que pour des cellules de très grosses tailles que l'on ait une chance d'avoir un déficit de puissance avant un blocage du aux interférences.

Cette première étude nous permet d'avoir une première impression sur les performances que l'on peut espérer d'une antenne. Cependant l'étude d'une cellule isolée reste peu réaliste et c'est pourquoi nous allons nous intéresser au cas où la cellule est dans un réseau, entourée d'autres cellules.

CHAPITRE 3

ÉTUDE POUR UNE CELLULE NON ISOLÉE

Il est rare qu'une cellule soit complètement isolée dans un réseau cellulaire réel. Et c'est bien souvent la source de problèmes divers pour le réseau. C'est pour cela qu'il est plus intéressant d'étudier le cas de cellules non isolées, si l'on veut obtenir des résultats utilisables dans un réseau réel. Cependant, une première étude sur une cellule seule aura permis de faire une évaluation préliminaire du problème. Les cellules voisines sont des sources d'interférences, aussi bien dans le sens montant que dans le sens descendant. Dans le sens montant, ce sont les mobiles des cellules voisines qui vont gêner la réception des signaux des mobiles de notre cellule. Dans le sens descendant, ce sont par contre les antennes des stations de base qui vont créer du bruit supplémentaire pour les mobiles. Ces interférences sont appelées interférences inter-cellulaires, par opposition aux interférences intra-cellulaires qui proviennent de notre propre cellule. Nous allons dans un premier temps étudier les variations entraînées par ces interférences dans les cellules voisines, et dans un deuxième temps, nous intégrerons ces résultats en vue d'établir une expression de la puissance émise en présence d'interférences inter-cellulaires.

3.1 Étude de l'interaction entre deux cellules

Pour mesurer l'influence d'une cellule voisine, nous allons considérer le cas de deux cellules. L'une sera notre cellule principale (celle dont on recherche la puissance émise), l'autre sera la cellule interférente. Pour faciliter la compréhension des notations, nous noterons indicé 0 tous les termes qui se rapportent à la cellule

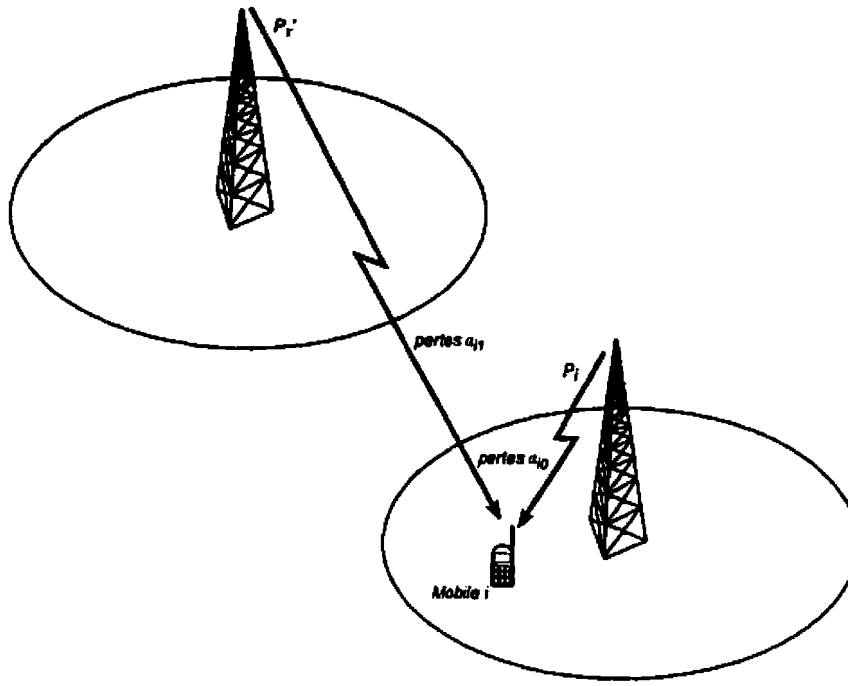


Figure 3.1: Interactions entre 2 cellules

principale (cellule 0), et tout ce qui se rapportent à l'autre cellule sera indicé 1. Soit P_T' la puissance émise par la cellule voisine. Dans ce cas, cette puissance sera perçue par le mobile i avec une intensité P_T'/α_{i1} où α_{i1} représente les pertes dues à la propagation entre la station de base de la cellule 1 et le mobile i. La cellule principale envoie elle une puissance P_i au mobile i, et cette puissance subit des pertes α_{i0}.

Le rapport signal-sur-interférences (2.12) peut donc être réécrit de la manière suivante :

$$CIR = \frac{P_i/\alpha_{i0}}{(P_T - P_i)/\alpha_{i0} + P_T'/\alpha_{i1} + \mathcal{N}_{therm}} = \gamma \tag{3.1}$$

En utilisant à nouveau le fait que $P_{pilote} + \sum_i P_i = P_T$ (raisonnement effectué dans le calcul de la puissance émise par une cellule isolée), nous arrivons à l'expression

suivante :

$$P_T = \frac{1}{1 - \frac{N_0\gamma}{1+\gamma}} \left[P_{pilote} + \frac{\gamma}{1+\gamma} \sum_{i=1}^{N_0} \left(\mathcal{N}_{therm} + \frac{P'_T}{\alpha_{i1}} \right) \alpha_{i0} \right] \tag{3.2}$$

L'équation précédente peut être réécrite sous la forme :

$$P_T = \frac{1}{1 - \frac{N_0\gamma}{1+\gamma}} \left(P_{pilote} + \frac{\gamma}{1+\gamma} \mathcal{N}_{therm} \sum_{i=1}^{N_0} \alpha_{i0} \right) + \frac{\gamma}{1 - (N_0 - 1)\gamma} \sum_{i=1}^{N_0} \frac{\alpha_{i0}}{\alpha_{i1}} P'_T \tag{3.3}$$

Nous constatons que les variations de P_T se font de manière affine en fonction de P'_T, puissance émise par la cellule voisine. De fait, P_T se met sous la forme :

$$P_T = P_{T_{seul}}(N_0) + \Delta(N_0)\, P'_T \tag{3.4}$$

où

$$P_{T_{seul}}(N_0) = \frac{1}{1 - \frac{N_0\gamma}{1+\gamma}} \left(P_{pilote} + \frac{\gamma}{1+\gamma} \mathcal{N}_{therm} \sum_{i=1}^{N_0} \alpha_{i0} \right) \tag{3.5}$$

$$\Delta(N_0) = \frac{\gamma}{1 - (N_0 - 1)\gamma} \sum_{i=1}^{N_0} \frac{\alpha_{i0}}{\alpha_{i1}} \tag{3.6}$$

$P_{T_{seul}}(N_0)$ a la même expression que la puissance émise par une cellule isolée (cf. section 2.5). $\Delta(N_0)$ est le coefficient de pente de la droite $P_T = f(P'_T)$. Il représente en fait la sensibilité de la cellule 0 à la puissance émise par la cellule 1. Les deux termes dépendent du nombre N_0 d'usagers actifs dans la cellule 0. On remarque que plus il y a d'usagers dans la cellule, plus le coefficient $\Delta(N_0)$ est grand.

Les termes $P_{T_{seul}}(N_0)$ et $\Delta(N_0)$ dépendent de la position des usagers. Supposons que nous prenions la valeur moyenne, pour une distribution donnée, pour la position des usagers. Dans ce cas, ces termes ne dépendent plus que du nombre d'usagers

actifs, et nous obtenons les équations suivantes :

$$P_{T_{seul}}(N_0) = \frac{1}{1-\frac{N_0\gamma}{1+\gamma}}\left(P_{pilote}+\frac{\gamma}{1+\gamma}\mathcal{N}_{therm}N_0\overline{\alpha_{i0}}\right) \tag{3.7}$$

$$\Delta(N_0) = \frac{\gamma}{1-(N_0-1)\gamma}N_0\frac{\overline{\alpha_{i0}}}{\alpha_{i1}} \tag{3.8}$$

où $\overline{\alpha_{i0}}$ et $\frac{\overline{\alpha_{i0}}}{\alpha_{i1}}$ seront les valeurs "moyennes" de α_{i0} et de $\frac{\alpha_{i0}}{\alpha_{i1}}$.

Les formules (3.7) et (3.8) nous donnent les variations d'émissions de puissance de la station de base de la cellule 0 en fonction de la puissance émise par la cellule voisine 1. Cependant, les variations de puissance de la cellule 0, vont créer elles aussi des variations de puissance dans la cellule 1, et ainsi de suite, jusqu'à arriver à un état d'équilibre entre les puissances d'émissions des 2 cellules. L'équation (3.4) trouvée reste valable à l'équilibre, mais elle doit être vérifiée pour les 2 cellules. Cela nous donne un système d'équations, qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} P_0 = P_{0_{seul}}(N_0) + \Delta_0(N_0)P_1 \\ P_1 = P_{1_{seul}}(N_1) + \Delta_1(N_1)P_0 \end{cases} \tag{3.9}$$

Le système précédent admet pour solution :

$$\begin{cases} P_0 = \frac{P_{0_{seul}}+\Delta_0 P_{1_{seul}}}{1-\Delta_0\Delta_1} \\ P_1 = \frac{P_{1_{seul}}+\Delta_1 P_{0_{seul}}}{1-\Delta_0\Delta_1} \end{cases} \tag{3.10}$$

Nous remarquons que les solutions pouvaient être négatives. Ce seraient des solutions qui n'auraient bien entendu aucun sens dans la réalité. Il apparaît donc une nouvelle limite du système, de même type que celle donnant le nombre d'utilisateurs maximal dans le cas d'une cellule isolée. Ici, la limite est donnée par $(1-\Delta_0\Delta_1)$

qui doit rester positif. En utilisant les expressions de Δ_i donnée par (3.8), nous arrivons à la condition suivante :

$$\frac{\gamma}{1-(N_0-1)\gamma} N_0 \frac{\overline{\alpha_{i0}}}{\alpha_{i1}} \cdot \frac{\gamma}{1-(N_1-1)\gamma} N_1 \frac{\overline{\alpha_{j1}}}{\alpha_{j0}} < 1 \tag{3.11}$$

Les indices i représentent les mobiles qui sont dans la cellule 0, alors que les indices j représentent les mobiles qui sont dans la cellule 1. Notons que les valeurs des $\frac{\overline{\alpha_{i0}}}{\alpha_{i1}}$ et $\frac{\overline{\alpha_{j1}}}{\alpha_{j0}}$ ne sont pas forcément identiques. Nous étudierons de manière plus précise les valeurs de ces termes dans la section 3.8.2. Notons $\varepsilon = \frac{\overline{\alpha_{i0}}}{\alpha_{i1}} \cdot \frac{\overline{\alpha_{j1}}}{\alpha_{j0}}$. L'expression précédente devient alors :

$$\gamma^2 N_0 N_1 \varepsilon < [1-(N_0-1)\gamma]\,[1-(N_1-1)\gamma] \tag{3.12}$$

Le développement de l'inégalité précédente nous donne une relation entre N_0 et N_1 :

$$N_0 < \frac{(1+\gamma)}{\gamma} \frac{(1+\gamma)-N_1\gamma}{(1+\gamma)-N_1\gamma(1+\varepsilon)} \tag{3.13}$$

Faisons une petite analyse de l'inégalité obtenue :

- si $\varepsilon \ll 1$, on retrouve la valeur du nombre maximal d'usagers dans une cellule pour le cas isolé (cf. 2.17):

$$N_0 < \frac{1+\gamma}{\gamma} \tag{3.14}$$

Ceci est tout à fait normal puisque si ε devient très petit, cela veut dire que les interférences provenant de la cellule voisine deviennent négligeables. C'est bien comme si la cellule 0 était isolée.

- si $\varepsilon = 1$, on trouve une relation entre N_0 et N_1:

$$N_0 + N_1 < \frac{1+\gamma}{\gamma} \tag{3.15}$$

Le cas $\varepsilon = 1$ correspond en sorte à un pire cas, puisque cela veut dire que les pertes entre les mobiles et les deux antennes des deux cellules sont égales. Chaque mobile est donc en quelque sorte, à égale distance des deux antennes, donc à la limite séparant les deux cellules. C'est un cas où tous les mobiles sont en handoff.

3.2 Modélisation des interférences

L'étude précédente va nous permettre de modéliser les interférences des autres cellules dans notre calcul de puissance. Il faut considérer 2 types de cellules interférentes : celles dont les mobiles ne subissent pas d'interférences de la part de la station de base de la cellule 0, parce qu'elles ne sont pas dans la direction de la station de base, et celles dont les mobiles subissent ces interférences. Bien sûr, si nous considérons des cellules non sectorisées et où il n'y a qu'une antenne omnidirectionnelle, toutes les cellules voisines subissent des interférences venant de la cellule 0.

Pour le premier type de cellules, la puissance des interférences émises sera détermi-née par la formule (2.16) (puissance émise par une cellule isolée ne subissant aucune interférence inter-cellulaires).

Pour le deuxième type de cellule, nous utiliserons la formule (3.4) plutôt que (3.10), qui donne la puissance émise à l'équilibre entre 2 cellules. La raison est que dans le cas général, la cellule 0 sera entourée de plus d'une cellule et l'équilibre

se fera entre plus que 2 cellules. L'expression (3.4) nous permet de considérer des variations de puissances dues à plusieurs cellules voisines et non une seule.

3.2.1 Simplification de l'expression

L'expression (3.3) donnant les variations de puissance tient compte du nombre d'usagers actifs dans la cellule, mais aussi de leur position dans la cellule. Cependant, puisque nous n'utiliserons cette formule que pour modéliser les interférences des cellules voisines, nous prendrons des valeurs moyennes de manière à simplifier les calculs des termes d'interférences.

Les termes α_{i0} représentent les pertes entre la station de base de la cellule 0 et le mobile i. Ces pertes dépendent de la position du mobile dans la cellule, en particulier de sa distance par rapport à la station de base de la station de base. De manière à simplifier les calculs, nous prendrons la distance correspondant à la distance moyenne des usagers dans la cellule, $\overline{\alpha_{i0}}$. De cette manière, les termes de la forme $\sum_{N_0} \alpha_{i0}$ se ramènent dans les calculs à $N_0 \alpha_{i0}$.

Les termes $\frac{\alpha_{i0}}{\alpha_{ij}}$ représentent le rapport des pertes respectivement entre les antennes des deux cellules et le mobile i. Nous prendrons tous les $\frac{\alpha_{i0}}{\alpha_{ij}}$ égaux au rapport moyen des pertes. Dans la suite nous noterons $\overline{\frac{\alpha_{i0}}{\alpha_{ij}}}$ ce rapport. L'interférence I_j provenant d'une cellule voisine j sera donc composée de 2 termes :

$$I_j(N_j) = I_{seul}(N_j) + \Delta(N_j)\, P_T \tag{3.16}$$

- un terme constant, qui représente la puissance que la cellule émettrait si elle

était isolée :

$$I_{seul}(N_j) = \frac{1}{1 - \frac{N_j\gamma}{1+\gamma}} \left(P_{pilote} + \frac{\gamma N_{therm} \overline{\alpha_j}}{1+\gamma} N_j \right) \tag{3.17}$$

où $\overline{\alpha_j}$ représente les pertes moyennes entre la station de base de la cellule j et les mobiles qu'elle administre.

- un terme représentant les variations de puissance dans les autres cellules causées par les émissions de la cellule principale. Ce terme sera de la forme :

$$P_T \Delta(N_j) = \frac{\gamma \frac{\overline{\alpha_{ij}}}{\alpha_{i0}}}{[1 - (N_j - 1)\gamma]} N_j P_T \tag{3.18}$$

où $\frac{\overline{\alpha_{ij}}}{\alpha_{i0}}$ représente le rapport moyen des pertes entre la station de base de la cellule j et le mobile, et des pertes entre la station de base de la cellule 0 et le mobile.

Remarquez qu'il y a eu une inversion des indices 0 et j. Cela est normal puisque nous appliquons le résultat trouvé aux cellules avoisinantes.

Les deux termes dépendent du nombre N_j d'usagers actifs dans la cellule voisine. Ce nombre N_j d'usagers n'est pas forcément le même que celui de la cellule principale.

3.3 Formule finale pour la puissance émise

La formule que nous allons établir dans la suite tiendra compte des interférences des cellules avoisinantes. Dans le cas d'antennes directionnelles, il faut distinguer les cellules dont les antennes se trouvent dans la direction de la station de base de la cellule principale, et les autres. Les premières seront soumises aux interférences

causées par les émissions de notre antenne principale. Par contre les autres, ne se trouvant pas dans la direction d'émission, ne subiront pas d'interférences venant de notre antenne. Cependant toutes contribuent aux interférences dans notre cellule. Cela veut dire que dans les formules, il faudra tenir compte des termes I_{jseul} pour toutes les cellules avoisinantes, mais le terme $P_T\Delta(N_j)$ n'apparaîtra que pour les cellules qui sont sous l'influence de la cellule principale. Bien sûr, dans le cas de cellules omnidirectionnelles, le problème ne se pose pas, puisque la station de base de la cellule principale émet dans toutes les directions et touchent donc toutes les cellules voisines.

Supposons que nous ayons M cellules interférentes considérées, et L ($\leq$ M) cellules qui subissent des interférences de la part de la cellule principale. En introduisant les termes d'interférences dans l'equation (2.12), nous obtenons :

$$SNR = \frac{\frac{P_i}{\alpha_{i0}}}{\frac{P_T - P_i}{\alpha_{i0}} + \frac{\sum_{j=1}^{L}\Delta(N_j)P_T + \sum_{j=1}^{M} I_{seul}(N_j)}{\alpha_{ij}} + \mathcal{N}_{therm}} = \gamma \qquad (3.19)$$

où les N_j représentent le nombre d'usagers actifs dans la cellule j.
En utilisant la même transformation que dans le cas d'une cellule isolée, nous pouvons extraire l'expression de la puissance émise P_T :

$$P_T = \frac{1}{1 - \frac{\gamma}{1+\gamma}\left(N_0 + \sum_{j=1}^{L}\sum_{i=1}^{N_0}\Delta(N_j)\frac{\alpha_{i0}}{\alpha_{ij}}\right)} \cdot \left[P_{pilote} + \frac{\gamma}{1+\gamma}\sum_{i=1}^{N_0}\left(\mathcal{N}_{therm} + \sum_{j=1}^{M}\frac{I_0(N_j)}{\alpha_{ij}}\right)\alpha_{i0}\right] \qquad (3.20)$$

Nous refaisons l'approximation faite auparavant sur les $\frac{\alpha_{i0}}{\alpha_{ij}}$, c'est-à-dire que nous allons considérer la valeur moyenne de ce rapport pour une distribution donnée.

Cela donne une expression approchée de la première partie de la formule donnant P_T :

$$P_T = \frac{1}{1 - \frac{N_0\gamma}{1+\gamma}(1 + \sum_{j=1}^{L} \frac{\overline{\alpha_{i0}}}{\alpha_{ij}}\Delta(N_j))} \cdot [P_{pilote} + ...] \tag{3.21}$$

Nous allons faire une 2ème approximation sur la deuxième partie de la formule (3.20), de manière à ramener le facteur de α_{i0} à un terme constant. De cette manière, le calcul d'évaluation de la puissance émise se ramènera à une forme semblable à celle trouvée pour une cellule isolée. Nous allons là aussi prendre la valeur moyenne pour la distribution considérée : $\overline{\alpha_{ij}}$.

L'expression finale de la puissance émise prend donc la forme :

$$P_T \simeq \frac{1}{1 - \frac{N_0\gamma}{1+\gamma}\left(1 + \sum_{j=1}^{L} \frac{\overline{\alpha_{i0}}}{\alpha_{ij}}\Delta(N_j)\right)} \left[P_{pilote} + \frac{\gamma}{1+\gamma}\sum_{i=1}^{N_0}\left(\mathcal{N}_{therm} + \sum_{j=1}^{M}\frac{I_0(N_j)}{\overline{\alpha_{ij}}}\right)\alpha_{i0}\right] \tag{3.22}$$

3.4 Modélisation symétrique

Nous allons ici étudier une autre modélisation pour le cas de plusieurs cellules. Celle-ci est basée sur les suppositions suivantes : les cellules ont toutes le même nombre d'utilisateurs actifs en même temps, et du fait de la symétrie du réseau. l'état d'équilibre fait que, normalement, toutes les cellules vont émettre à la même puissance P_T.

À partir de cette constatation, nous pouvons trouver aussi une expression pour la puissance émise par chaque cellule. L'équation (3.19) se réécrit à l'équilibre entre toutes les cellules de la manière suivante :

$$SNR = \frac{\frac{P_i}{\alpha_{i0}}}{\frac{P_T - P_i}{\alpha_{i0}} + \sum_{j=1}^{M}\frac{P_T}{\alpha_{ij}} + \mathcal{N}_{therm}} = \gamma \tag{3.23}$$

Le développement nous donne pour P_T :

$$P_T = \frac{1}{1 - \frac{\gamma}{1+\gamma}\left(N + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\frac{\alpha_{i0}}{\alpha_{ij}}\right)}\left[P_{pilote} + \frac{\gamma}{1+\gamma}\mathcal{N}_{therm}\sum_{i=1}^{N}\alpha_{i0}\right] \qquad (3.24)$$

Nous pouvons alors comparer la puissance donnée par cette formule à celle que donnerait l'expression 3.22 obtenue dans le chapitre précédent (que nous appellerons *méthode 1*), dans la même situation : c'est-à-dire que toutes les cellules ont le même nombre d'usagers en même temps. Les résultats sont données par les courbes de la figure 3.2.

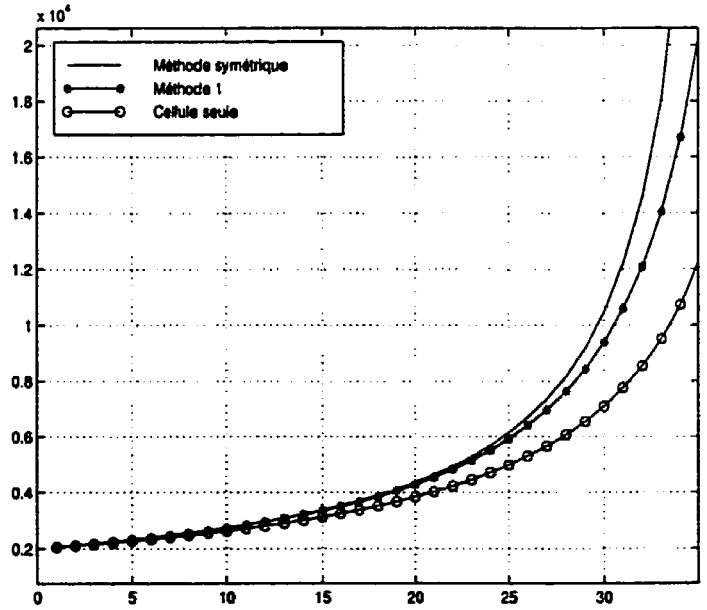


Figure 3.2: Comparaison de la puissance émise en fonction du nombre d'utilisateurs dans les cellules

Les deux expressions ne donnent pas vraiment les mêmes résultats... Cependant, pour des cellules ayant peu d'usagers actifs en même temps (en deçà d'une vingtaine d'usagers actifs en même temps), les deux formules concordent à peu près. L'écart se situe au niveau du mW. Par contre, lorsque l'on considère une trentaine d'usagers,

l'écart devient tout de suite plus significatif : on a une différence d'1W pour 30 usagers ! La conclusion de cette comparaison, est que le terme d'interactivité n'est pas du tout suffisant pour prendre en compte les augmentations de puissances dues aux cellules voisines.

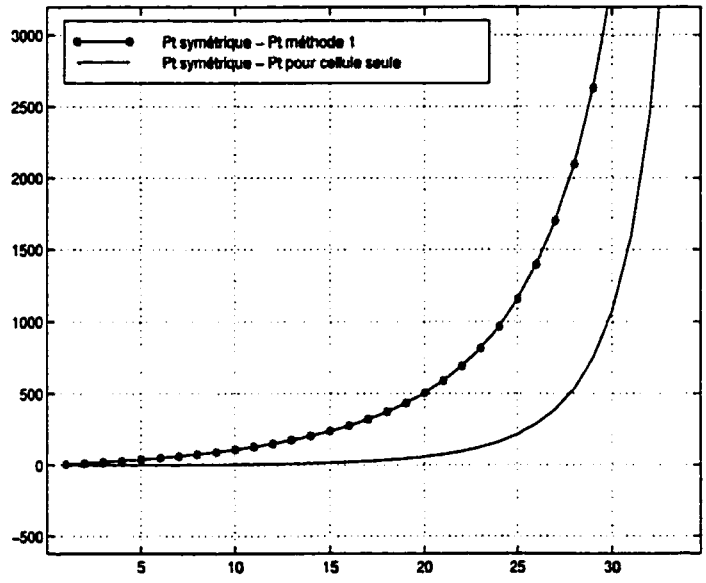


Figure 3.3: Différences de puissance entre la méthode 1, la méthode symétrique, et la puissance émise pour une cellule isolée

3.5 Méthode matricielle

Nous allons développer une autre méthode qui se situe dans le prolongement de la méthode 1. Dans la méthode 1, nous considérions uniquement les impacts des variations de puissance entre la cellule principale et les cellules avoisinantes. Mais en revanche, les interactions de même type entre cellules autres que la cellule principale étaient négligées. En réalité, dans le réseau, toutes les cellules interagissent entre elles, et il se crée donc une sorte d'équilibre.

Si nous reprenons la formule (3.4) qui donnait l'influence de la puissance d'une cellule voisine sur la puissance émise par la cellule principale. Nous pouvons écrire cette relation entre toutes les paires de cellules du réseau considéré. De manière générique, nous aurons entre deux cellules i et j, une relation du type :

$$P_i = P_{i_{seul}}(N_i) + \sum_{j=1, j\neq i}^{M} \Delta_{ij}(N_i) P_j \tag{3.25}$$

où les termes $P_{i_{seul}}(N_i)$ et $\Delta_{ij}(N_i)$ sont de la forme :

$$P_{i_{seul}} = \frac{1}{1 - \frac{N_i \gamma}{1+\gamma}} \left(P_{pilote} + \frac{\gamma}{1+\gamma} \mathcal{N}_{therm} \sum_{k=1}^{N_i} \alpha_{ik} \right) \tag{3.26}$$

$$\Delta_{ij}(N_i) = \frac{\gamma}{1 - (N_i - 1)\gamma} \sum_{k=1}^{N_i} \frac{\alpha_{ik}}{\alpha_{ijk}} \tag{3.27}$$

L'indice k se rapporte aux différents utilisateurs qui sont connectés à l'antenne de la cellule i. Nous allons dans un premier temps nous intéresser au comportement des moyennes des puissances P_i. En prenant les moyennes dans les expressions ci-dessus, nous arrivons aux relations suivantes :

$$P_{i_{seul}} = \frac{1}{1 - \frac{N_i \gamma}{1+\gamma}} \left(P_{pilote} + \frac{\gamma}{1+\gamma} \mathcal{N}_{therm} N_i \overline{\alpha_i} \right) \tag{3.28}$$

$$\Delta_{ij}(N_i) = \frac{\gamma N_i}{1 - (N_i - 1)\gamma} \overline{\left(\frac{\alpha_i}{\alpha_{ij}} \right)} \tag{3.29}$$

Les termes $\overline{\alpha_i}$ et $\overline{\left(\frac{\alpha_i}{\alpha_{ij}}\right)}$ se rapporte respectivement à la moyenne des facteurs d'atténuation pour un mobile se trouvant dans la cellule i, et la moyenne des rapports des facteurs d'atténuations des puissances provenant des cellules i et j sur un mobile présent dans la cellule i.

Ces différentes relations doivent être vérifiées pour toutes les cellules, mais en particulier pour la cellule centrale "0" qui nous intéresse. Nous obtenons donc un système d'équations à résoudre. Nous limitons ce système à un petit réseau comprenant notre cellule principale et les 2 anneaux de cellules voisines, soit 19 cellules en tout (comme sur la figure 2.1). Ce système s'écrit sous forme matricielle de la manière suivante :

$$[\Delta] . [P] = [P_{seul}] \tag{3.30}$$

où

$$[\Delta] = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta_{01}(N_0) & -\Delta_{02}(N_0) & \cdots & -\Delta_{0M}(N_0) \\ -\Delta_{10}(N_1) & 1 & -\Delta_{12}(N_1) & \cdots & -\Delta_{1M}(N_1) \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ -\Delta_{M0}(N_M) & \cdots & \cdots & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{3.31}$$

$$[P] = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ P_M \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

$$[P_{seul}] = \begin{bmatrix} P_{0_{seul}} \\ P_{1_{seul}} \\ \vdots \\ \vdots \\ P_{M_{seul}} \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

Nous pouvons résoudre ce système et extraire la valeur de la moyenne de P_0 en fonction de N_0 le nombre d'utilisateurs dans la cellule principale et des N_i, nombre d'usagers dans les cellules voisines. Dans un souci de simplification, nous prendrons tous les N_i égaux dans les cellules voisines.

Nous obtenons ainsi une certaine expression de la puissance émise par la cellule principale en fonction du nombre d'usagers, qui va nous permettre de calculer les probabilités de dépasser le seuil de puissance en fonction du nombre d'usagers dans la cellule principale et dans les cellules voisines, et donc la probabilité de déficit de puissance.

Dans notre méthode générale, nous essayons toujours de nous ramener à l'étude de $\sum \alpha_i$ que nous représentons par une gaussienne. Ici, le calcul via la matrice nous permet d'obtenir la valeur moyenne de la puissance et donc à un coefficient multiplicateur près, celui de la somme. Pour la variance, il suffit de prendre la variance de l'expression $P_{0_{seul}}(N_0)+\sum_j \Delta_{0j}(N_0)$. Compte tenu du fait que les termes $\Delta_{0j}(N_0)$ ont toujours été pris comme des paramètres déterministes, la variance de l'expression est égale à la variance de $P_{0_{seul}}(N_0)$ soit :

$$Var[P_0] = \frac{\gamma N_{therm}}{1+\gamma(N_0-1)} \cdot Var\left[\sum \alpha_i\right] \tag{3.34}$$

Il faut noter que contrairement aux autres méthodes, nous nous intéressons ici seulement à des cellules non sectorisées. Pour des cellules sectorisées, il faudrait écrire la matrice pour chaque secteur, soit en tout 3 x 18 secteurs.

3.6 Probabilité de blocage

3.6.1 Probabilité de dépassement du seuil

Comme dans le cas d'une cellule isolée, on peut dire que :

$$Prob[P_T > P_{seuil}|N_0] = Prob[\sum_{i=1}^{N_0} \alpha_i > \Omega(N_0)|N_0] \tag{3.35}$$

mais cette fois ci, $\Omega(N_0)$ prend la forme suivante :

$$\Omega(N_0) = \frac{1+\gamma}{\gamma\left(\mathcal{N}_{therm} + \sum_{j=1}^{M} \frac{I_0(N_j)}{\overline{\alpha_j}}\right)} \left[P_{seuil}\left(1 - \frac{N_0\gamma}{1+\gamma}\left(1 + \sum_{j=1}^{L} \frac{\overline{\alpha_{i0}}}{\alpha_{ij}}\Delta(N_j)\right)\right) - P_{pilote}\right] \tag{3.36}$$

3.6.2 Probabilité d'avoir N_0 usagers dans une cellule

La probabilité d'avoir N_0 utilisateurs dans le système est toujours donnée par la théorie des files d'attente, avec un nombre de serveurs limités :

$$Prob[N_0] = \frac{\rho^{N_0}/N_0!}{\sum_{j=0}^{m} \rho^j/j!} \tag{3.37}$$

Ici aussi, de nouvelles limites apparaissent dans l'équation (3.36) donnant les seuils pour une cellule non isolée. Cette limite s'écrit :

$$N_0 < \frac{1+\gamma}{\gamma\left(1 + \sum_{j=1}^{L} \frac{\overline{\alpha_{i0}}}{\alpha_{ij}}\Delta(N_j)\right)} \tag{3.38}$$

Dans ce dernier cas, on voit que le nombre d'usagers maximal dépend du nombre d'usagers actifs dans les cellules voisines. La probabilité d'avoir N_0 usagers dans la cellule centrale dépendra donc du nombre d'usagers dans les cellules voisines. Le nombre d'usagers dans les cellules voisines sera aussi donnée par la théorie des files d'attente. Par contre, ces cellules voisines seront traitées comme étant isolées. C'est-à-dire que par exemple, le nombre limite de serveurs dans ces cellules sera le même que pour une cellule isolée alors que pour la cellule principale, nous tiendrons compte des cellules voisines.

Pour avoir des ordres de grandeurs, pour des valeurs de $P_{pilote} = 2W$ et $P_{seuil} = 9,6W$, le nombre max d'usagers actifs en même temps est de l'ordre de 34 dans le cas d'une cellule isolée, et varie entre 29 et 34 pour une cellule non isolée, selon le nombre d'usagers actifs dans les cellules avoisinantes.

3.6.3 Probabilité totale

Nous supposons qu'il y a le même nombre d'usagers dans toutes les cellules voisines, ceci pour simplifier les calculs. La probabilité totale s'écrira donc :

$$P = \sum_{N_0} \sum_{N_j} Prob\left[\sum_{i=1}^{N_0} \alpha_i > \Omega(N_0)|N_0, N_j\right] .Prob[N_0|N_j].Prob[N_j] \qquad (3.39)$$

3.6.4 Probabilité totale pour la méthode symétrique

Dans le cas de la méthode symétrique, on suppose qu'il y a le même nombre d'usagers partout. Le seuil $\Omega(N_0)$ s'écrit cette fois :

$$\Omega(N_0) = \frac{1+\gamma}{\gamma N_{therm}}\left[P_{seuil}\left(1 - \frac{N_0\gamma}{1+\gamma}\left(1 + \sum_{j=1}^{L}\frac{\overline{\alpha_{i0}}}{\alpha_{ij}}\right)\right) - P_{pilote}\right] \qquad (3.40)$$

Il apparaît la limite suivante sur N_0 :

$$N_0 \leq \frac{1+\gamma}{\gamma\left(1+\sum_{j=1}^{L}\frac{\overline{\alpha_{ij}}}{\alpha_{ij}}\right)} \tag{3.41}$$

Et la probabilité totale s'écrit :

$$P = \sum_{N_0} Prob\left[\sum_{i=1}^{N_0}\alpha_i > \Omega(N_0)|N_0\right].Prob[N_0] \tag{3.42}$$

3.7 Intégration du facteur de voix

Nous allons maintenant voir comment s'intègre le facteur de voix dans les équations concernant un réseau de plusieurs cellules. Nous pourrions refaire le calcul en intégrant le facteur ν_i pour chaque mobile, comme cela a été fait dans le cas de la cellule isolée.

Cependant, on s'est rendu compte qu'en conditionnant sur le nombre K de mobiles actifs parmi le nombre total N_0 de mobiles ayant un lien avec la station de base, on retombe sur l'expression de la puissance émise pour K mobiles actifs en même temps tout simplement.

Nous allons utiliser cette propriété ici. Les formules donnant les seuils sont les mêmes, mais il faut changer la manière de les utiliser dans le calcul de la probabilité totale. C'est-à-dire que l'expression du seuil $\Omega(N_0)$ ne donne pas le seuil pour N_0 usagers ayant un lien avec la station de base, mais seulement pour N_0 usagers actifs parmi un nombre plus grand d'usagers ayant un lien avec la station de base.

3.8 Résultats pour le cas d'une cellule non isolée

Nous allons maintenant regarder ce que nous donnent les différentes formules établies. Nous considérons une réseau de cellules hexagonales de rayon R. Pour pouvoir appliquer les formules établies dans la théorie, nous devons au préalable effectuer les calculs des valeurs des différents coefficients $\overline{\alpha_j}$ ou $\overline{\frac{alpha_{i0}}{alpha_{ij}}}$ se rapportant aux pertes entre cellules voisines... (voir la section 3.3 donnant la formule finale pour la puissance émise)

3.8.1 Calcul du $\overline{\alpha_j}$

Le terme $\overline{\alpha_j}$ qui avait été introduit dans la formule donnant la puissance émise pour une cellule non isolée, représentait les pertes moyennes que subissent les signaux émises par la cellule voisine j lorsqu'elles arrivent à un mobile présent dans la cellule principale.

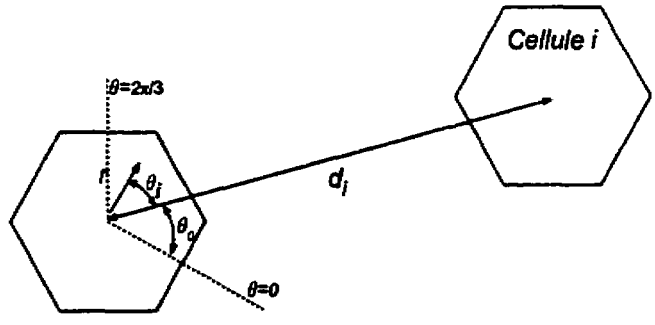


Figure 3.4: Notations

Nous allons donc calculer la moyenne des pertes, pour les répartitions de mobiles que nous considérons ici, c'est-à-dire une uniforme suivant le rayon r, et une uniforme dans l'espace. En prenant la notation de la figure 3.4, les pertes entre la station de base de la cellule voisine i et un mobile se trouvant en (r, θ) s'expriment

de la manière suivante :

$$pertes(r,\theta) = (\sqrt{r^2 + d_i^2 - 2rd_i\cos\theta_i})^4 \quad (3.43)$$

$$= (r^2 + d_i^2 - 2rd_i\cos\theta_i)^2 \quad (3.44)$$

Pour effectuer nos calculs nous supposerons que la cellule voisine interférente est située à un angle θ_0. Dans ce cas, $\theta_i = \theta - \theta_0$.

Il faut maintenant intégrer sur la surface du secteur c'est-à-dire :

$$\int_{\theta=0}^{\theta=2\pi/3}\int_{r=0}^{r=R} pertes(r,\theta)p(r,\theta)drd\theta \quad (3.45)$$

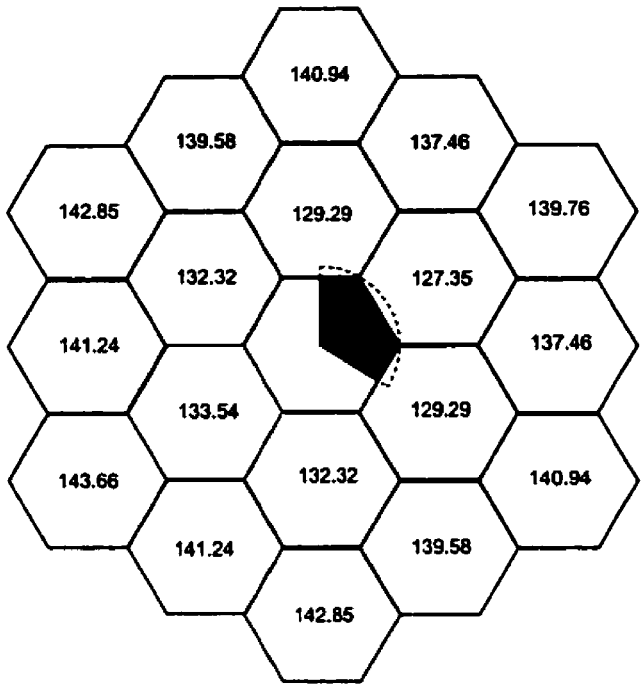
La figure 3.6 donne la moyenne des pertes pour différents angles θ_0 d'une cellule voisine du premier anneau de cellules voisines. On voit que le pire cas se situe pour $\theta_0 = 60^o$, c'est-à-dire que la cellule se trouve vraiment en face du secteur. Nous effectuons ces mêmes calculs pour les cellules se trouvant dans les 2 premiers cercles de cellules voisines, les résultats en dB sont donnés sur la figure 3.5 pour une répartition uniforme suivant r, et pour une répartition uniforme dans l'espace. La zone ombrag/e sur la figure indique le secteur qu'on a considéré dans les calculs.

3.8.2 Calcul du $\overline{\frac{alpha_{i0}}{alpha_{ij}}}$

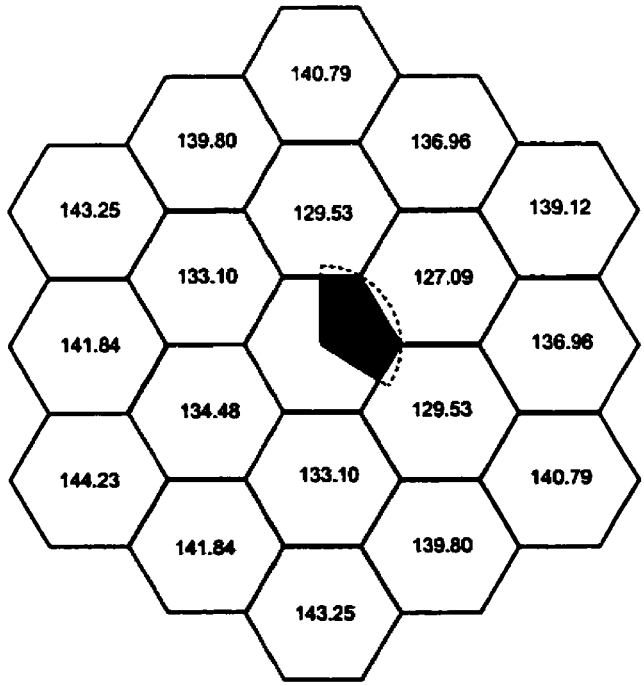
Nous devons calculer l'intégrale du rapport entre les pertes de la cellule principale et les pertes provenant d'une cellule avoisinante :

$$\int_{\theta=0}^{\theta=2\pi/3}\int_{r=0}^{r=R} \frac{r^4}{r^2 + d^2 - 2rd\cos(\theta - \theta_0)} p(r,\theta)drd\theta \quad (3.46)$$

La notation est la même que sur la figure 2.2.



Moyenne des pertes en dB
pour une distribution uniforme suivant la distance



Moyenne des pertes en dB
pour une distribution uniforme dans l'espace

Figure 3.5: Moyenne des pertes en dB, R=1 km

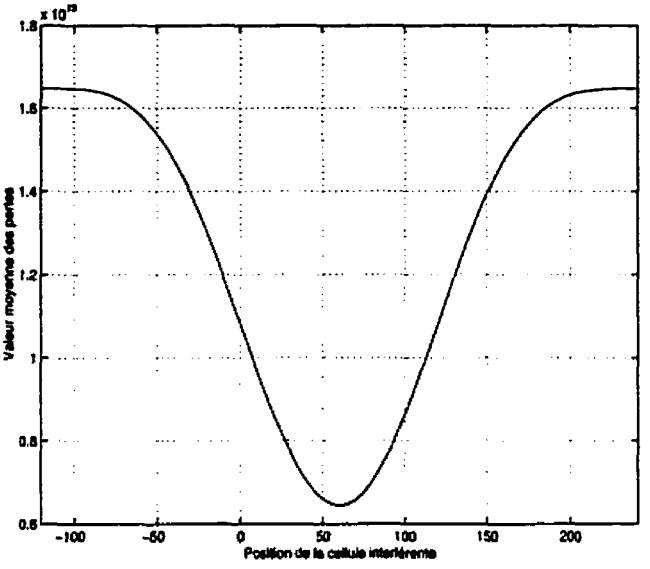


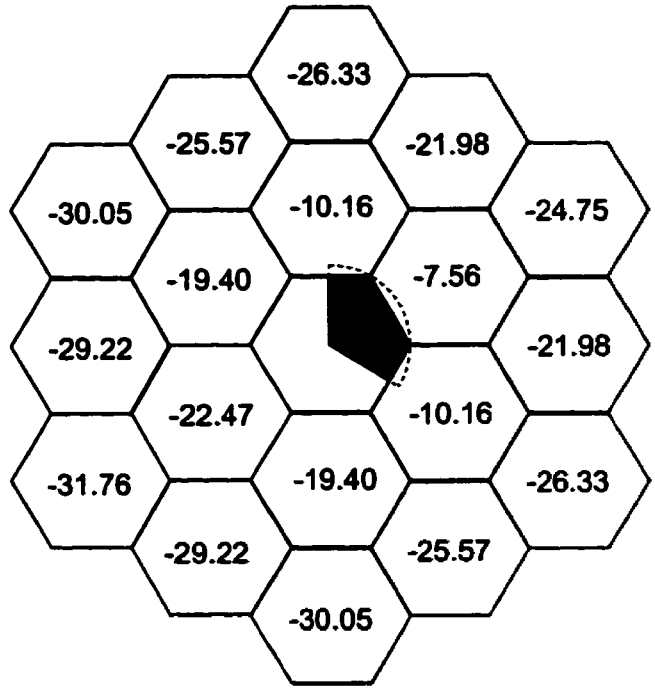
Figure 3.6: Moyenne des pertes pour un rayon de cellule de 1 km et une cellule du premier anneau voisin

Nous utiliserons le pire cas qui correspond au cas où le mobile est aligné avec la station de base de la cellule principale et une des antennes des cellules du premier anneau de cellule (*i.e.* un des θ_0 vaut $\frac{\pi}{3}$ pour une des cellules du premier anneau).

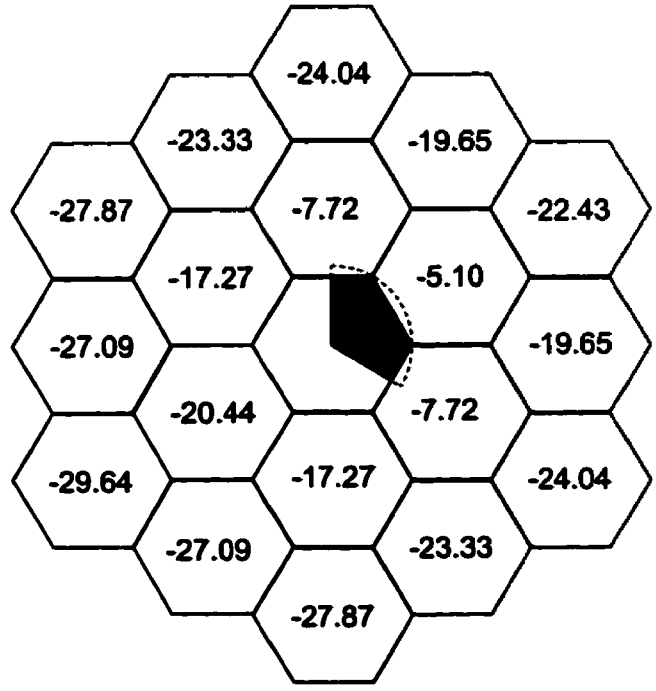
Nous devons donc intégrer une fraction rationnelle et utilisons pour cela la méthode classique de décomposition en éléments simples dans l'espace complexe, puisque le dénominateur de la fraction rationnelle n'admet pas de racines réelles. Pour information, les résultats après la première intégration (sur r) sont :

- pour la répartition uniforme suivant la distance :

$$\int_{r=0}^{r=R} \frac{\alpha_{i0}}{\alpha_{ij}} p(r,\theta)dr = \frac{1}{R}\left[R - A\left(\frac{1}{R-z}+\frac{1}{z}\right) - A^*\left(\frac{1}{R-z^*}+\frac{1}{z^*}\right) B\ln\left(\frac{z-R}{z}\right) + B^*\ln\left(\frac{z^*-R}{z^*}\right)\right] \quad (3.47)$$



Moyennes des rapports en dB
pour une distribution uniforme suivant la distance



Moyennes des rapports en dB
pour une distribution uniforme dans l'espace

Figure 3.7: Moyenne des rapports des pertes en dB

- pour la répartition uniforme dans l'espace :

$$\begin{aligned}
\int_{r=0}^{r=R} \frac{\alpha_{i0}}{\alpha_{ij}} p(r,\theta)dr &= \frac{2}{R^2}\left[\frac{R^2}{2} + (B+B^*)R\right. \\
&\quad -Az\left(\frac{1}{R-z}+\frac{1}{z}\right) \\
&\quad -A^*z^*\left(\frac{1}{R-z^*}+\frac{1}{z^*}\right) \\
&\quad +(A+Bz)\ln\left(\frac{z-R}{z}\right) \\
&\quad \left.+(A^*+B^*z^*)\ln\left(\frac{z^*-R}{z^*}\right)\right] \qquad (3.48)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{avec } z &= d_i e^{j\theta_0} \\
A &= \frac{z^4}{(z-z^*)^2} \\
B &= \frac{2z^4 - 4z^3z^*}{(z-z^*)^3} \\
\text{et } X^* &\quad \text{leurs conjugués}
\end{aligned}$$

L'intégration sur θ se fait, elle, moins facilement de manière analytique et a du être calculé numériquement. Les résultats sont regroupés sur les schémas de la figure 3.7 pour une répartition uniforme suivant la distance et une répartition uniforme dans l'espace. On pourra remarquer que les formules obtenues ne dépendent pas de R en fait (un simple développement permet de voir que tous les R se simplifient avec les d_i).

3.8.3 Courbes de résultats

3.8.3.1 Sans tenir compte du facteur de voix

Nous allons maintenant appliquer les formules obtenues dans la partie théorique aux mêmes cas, étudiés pour une cellule isolée, à savoir :

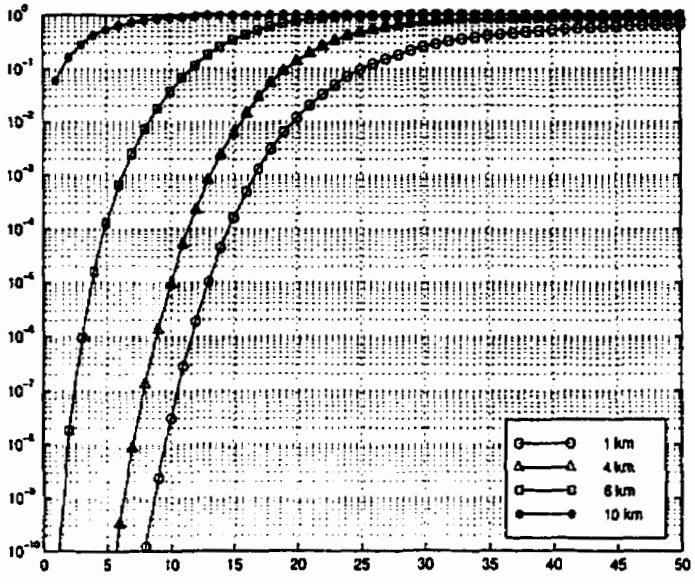


Figure 3.8: Méthode 1, répartition uniforme suivant la distance, cellule non isolée, sans facteur de voix

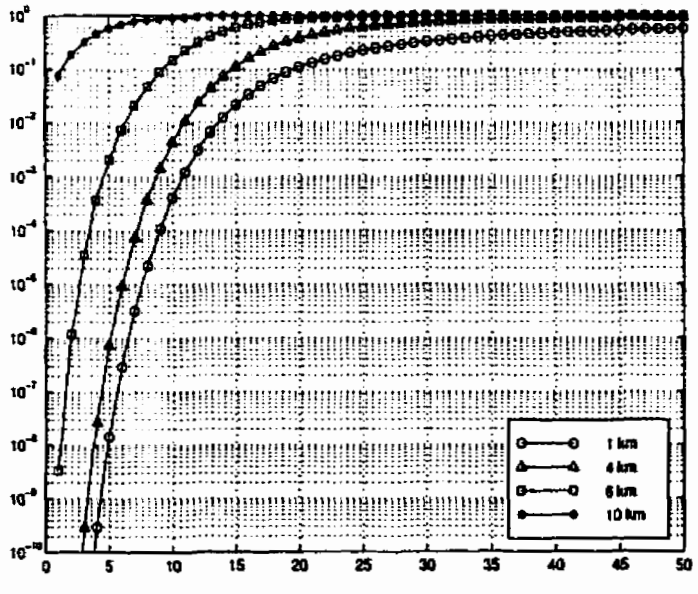


Figure 3.9: Méthode symétrique, cellule non isolée, répartition uniforme suivant la distance, sans facteur de voix

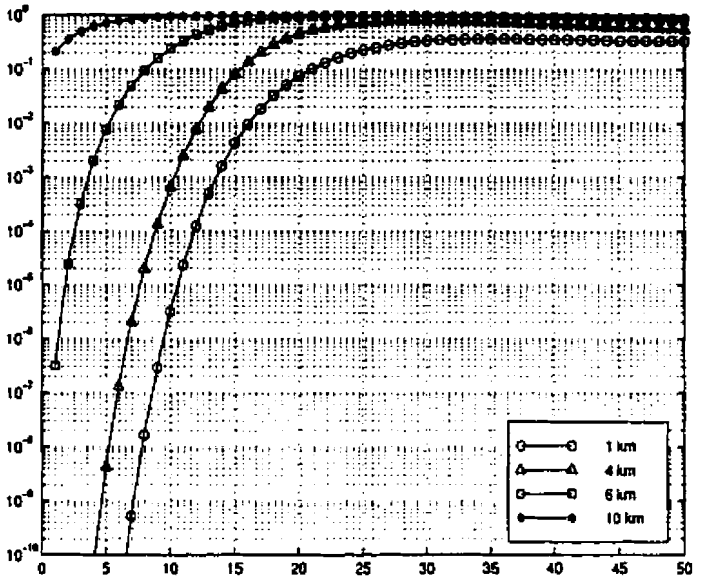


Figure 3.10: Méthode 1, cellule non isolée, distribution uniforme dans l'espace, sans facteur de voix

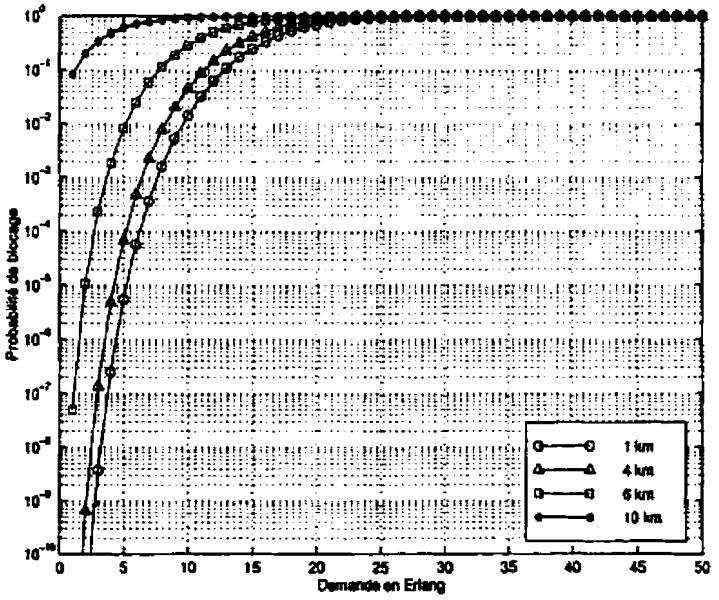


Figure 3.11: Méthode symétrique, cellule non isolée, distribution uniforme dans l'espace, sans facteur de voix

- répartition uniforme suivant la distance, avec et sans facteur de voix,
- répartition uniforme dans l'espace, avec et sans facteur de voix.

Toutes les figures se trouvent à la fin de ce chapitre. De plus, puisque nous avons vu deux méthodes pour évaluer la probabilité de dépasser le seuil (méthode 1 et méthode symétrique), nous donnons les résultats pour chacune de ces méthodes.

Les figures 3.8 et 3.10 nous donne les probabilités de manque de puissance pour différents rayons de cellule, dans les deux distributions considérées.

Si l'on compare ces courbes à celles obtenues pour des cellules isolées, nous pouvons voir que les cellules voisines réduisent considérablement la capacité en Erlang de la cellule *si les cellules sont de petite tailles (quelques km).* Pour un réseau de cellules de 1 km, on perd 5 Erl si l'on veut garder une probabilité de manque de puissance de 1%. Par contre, l'effet se fait moins sentir lorsque les cellules deviennent plus grosses. Pour des rayons de 6 km ou 10 km, on voit que la courbe pour une cellule isolée est sensiblement la même que pour une cellule non isolée.

Cela semble normal étant donné que pour des grosses cellules, les antennes des stations de base sont très éloignées les unes des autres et ne créent pas beaucoup d'interférences pour les mobiles (sauf pour ceux en bordures de cellules). Par contre, dans le cas de petites cellules, par exemple dans une configuration type centre-ville, les interférences générées par les cellules voisines diminuent de manière significative la capacité de la cellule. Notamment, puisque les antennes des stations de base émettent constamment un canal pilote, cela veut dire que ces stations de base créent continuellement des interférences pour les usagers des cellules voisines. D'où l'importance de bien réguler la puissance que l'on alloue au canal pilote, pour veiller

à ce que ce dernier ne crée pas trop d'interférences pour les cellules avoisinantes.

Pour les résultats de la méthode symétrique (figures 3.9 et 3.11), nous pouvons faire les mêmes constatations que pour la méthode 1, sauf qu'ici la capacité est diminuée encore plus. On perd ici a peu près 10 Erlangs pour une probabilité de 1%. Nous avions déjà vu que cette méthode donnait des résultats plus pessimistes que la méthode 1 qui avait tendance à sous-estimer la puissance émise par la station de base pour un grand nombre d'usagers. Cette tendance se confirme naturellement ici. La méthode symétrique est d'autant plus pessimiste qu'elle suppose que toutes les cellules ont le même nombre d'utilisateurs à chaque fois. Cela veut dire que lorsque la cellule principale est très chargée, toutes les cellules avoisinantes le sont aussi et créent donc beaucoup d'interférences.

3.8.3.2 Prise en compte du facteur de voix

L'effet du facteur de voix se fait toujours autant sentir (figures 3.12 et 3.14). La capacité est encore une fois, un peu plus que doublée par rapport au cas où le facteur de voix n'est pas considéré. Si nous comparons les courbes avec celles obtenues pour une cellule isolée en tenant compte du facteur de voix aussi (figure 2.12), nous pouvons faire les mêmes constatations que précédemment concernant l'influence des interférences en fonction de la taille de la cellule. À savoir que les interférences inter-cellulaires ont de moins en moins d'influence pour des cellules de grandes tailles. Cependant, dans le cas multi-cellulaire, nous remarquons que même pour une cellule petite (1 km de rayon), la probabilité de se retrouver en déficit de puissance atteint très rapidement 1, alors qu'elle restait aux alentours de 10%, dans le cas d'une cellule isolée même pour des demandes de trafic de 80 Erlangs.

En ce qui concerne la méthode symétrique, les écarts de capacité sont encore

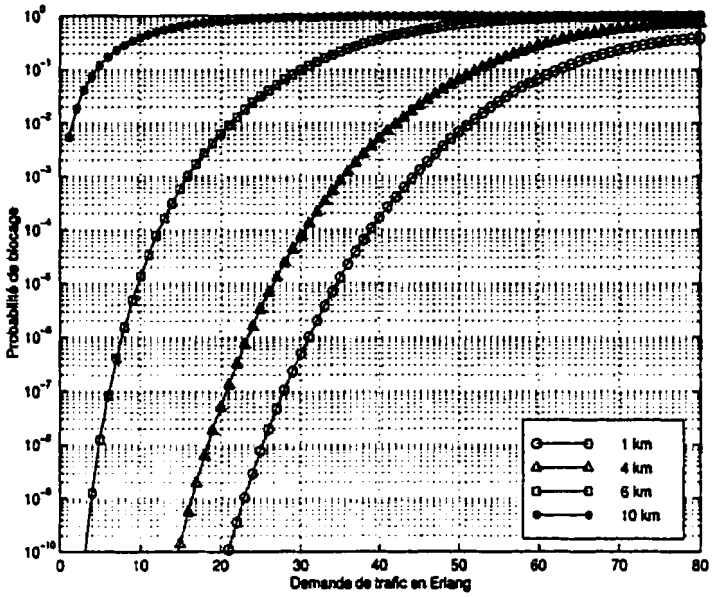


Figure 3.12: Méthode 1, cellule non isolée, distribution uniforme suivant la distance, facteur de voix de 40%

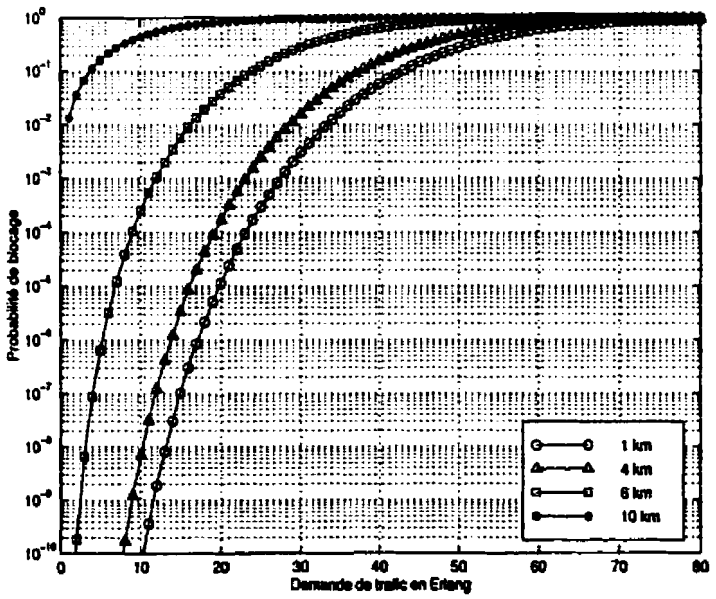


Figure 3.13: Méthode symétrique, cellule non isolée, distribution uniforme suivant la distance, facteur de voix de 40%

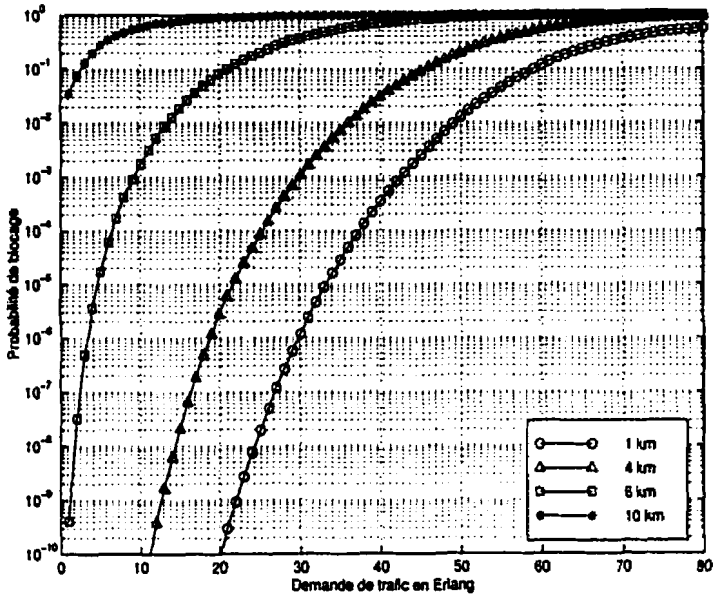


Figure 3.14: Méthode 1, cellule non isolée, distribution uniforme dans l'espace, facteur de voix de 40%

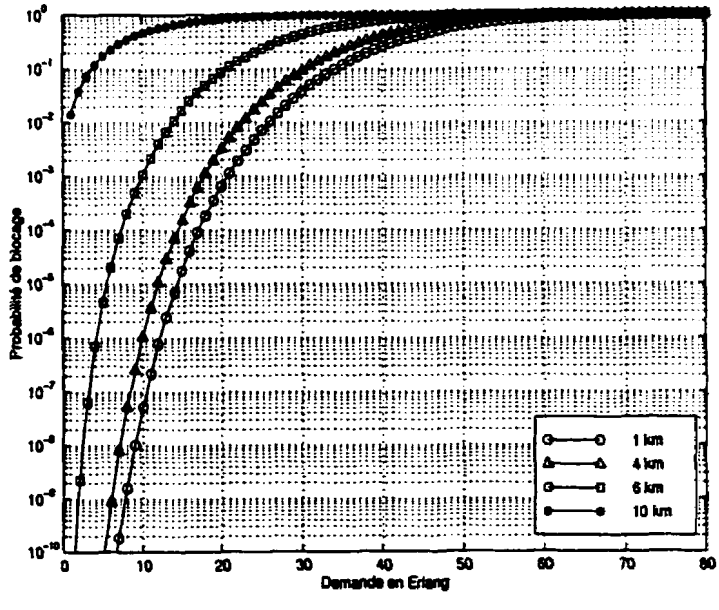


Figure 3.15: Méthode symétrique, cellule non isolée, distribution uniforme dans l'espace, facteur de voix de 40%

plus accentués. On passe d'un écart de 5 Erl dans le cas où l'on ne considère pas le facteur de voix, à un écart de 10 Erl sur les courbes 3.13 et 3.15.

Les figures 3.13 et 3.15 présentent les résultats en utilisant la méthode symétrique. Là encore, nous observons une grande disparité avec les résultats obtenus en utilisant la première méthode.

3.8.4 Cas particulier de la méthode matricielle

Nous étudions à part les courbes obtenues pour la méthode matricielle. En effet, les résultats sont obtenues pour des cellules non sectorisées, alors que les cellules étaient supposées tri-sectorisées dans les deux autres méthodes étudiées auparavant. Nous avons donc appliqué aussi la méthode 1 dans le cas de cellules non sectorisées, de manière à pouvoir comparer les deux méthodes. Les résultats sont donnés sur les figures 3.16 et 3.17. Les courbes en pointillé représentent les courbes obtenues avec la méthode matricielle.

Nous pouvons remarquer que conformément à ce qu'on pouvait penser, la méthode matricielle est plus pessimiste que la méthode 1 qui ne tient pas compte des interactions entre les cellules voisines. La différence est même très importante pour les cellules de petite taille. Dans le cas de cellules de 1 km de rayon, nous avons des pertes de capacité de 10 Erl dans le cas de la répartition uniforme suivant la distance, et de 15 Erl dans le cas d'une répartition uniforme dans l'espace.

3.9 Comparaison avec la probabilité de blocage dans le sens montant

Comme dans le cas de la cellule isolée nous allons comparer les probabilités de déficit de puissance obtenues avec la probabilité de blocage dans le sens montant.

Nous constatons que sur les courbes obtenues grâce à la méthode 1, la probabilité

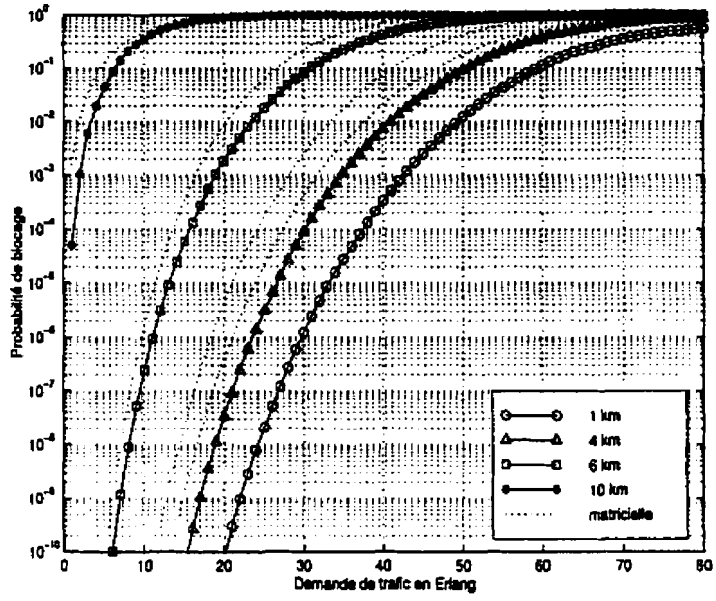


Figure 3.16: Comparaison des deux méthodes pour une distribution uniforme suivant la distance, avec facteur de voix

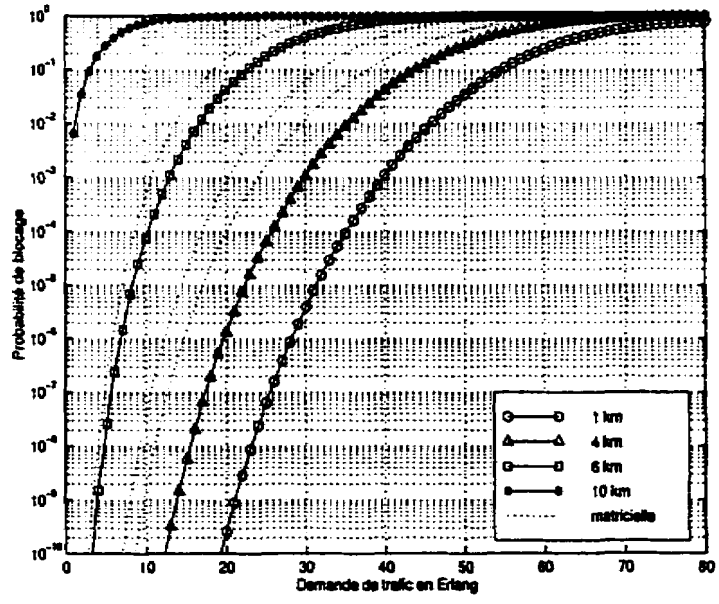


Figure 3.17: Comparaison des deux méthodes pour une distribution uniforme dans l'espace, avec facteur de voix

de déficit de puissance n'est supérieure à la probabilité de blocage que pour de grosses cellules (rayon supérieur à 5 km). Par contre, les courbes tracées avec la méthode symétrique montrent que *la probabilité de déficit de puissance peut être supérieure à la probabilité de blocage dans le sens montant même pour de petites cellules*, spécialement pour le cas de la distribution uniforme dans l'espace.

Sur la figure 3.21, on constate que le déficit de puissance est prépondérant pour des demandes de trafic inférieures à 18 Erl environ pour une cellule de 1 km de rayon. Pour une cellule de 4 km de rayon, les probabilités sont égales pour une demande de 21 Erl et valent 1%, ce qui n'est plus négligeable, contrairement au cas de la cellule isolée où les probabilités se rejoignaient pour des valeurs de 10^{-7}. Cela veut dire qu'*il y a autant de chance que la station de base se retrouve en défaut à cause de sa puissance insuffisante ou à cause du trop grand nombre d'interférences générées par les mobiles.*

Comme nous l'avons déjà dit auparavant, la méthode symétrique est une méthode pessimiste alors que la méthode 1 serait plutôt optimiste. La véritable capacité se situe sûrement entre les résultats donnés par les deux méthodes. Cela veut dire que même pour des petites cellules, il y a risque que le déficit de puissance survienne, si l'on en juge par la figure 3.21. Mais cette probabilité reste faible, de l'ordre du 1 pour mille.

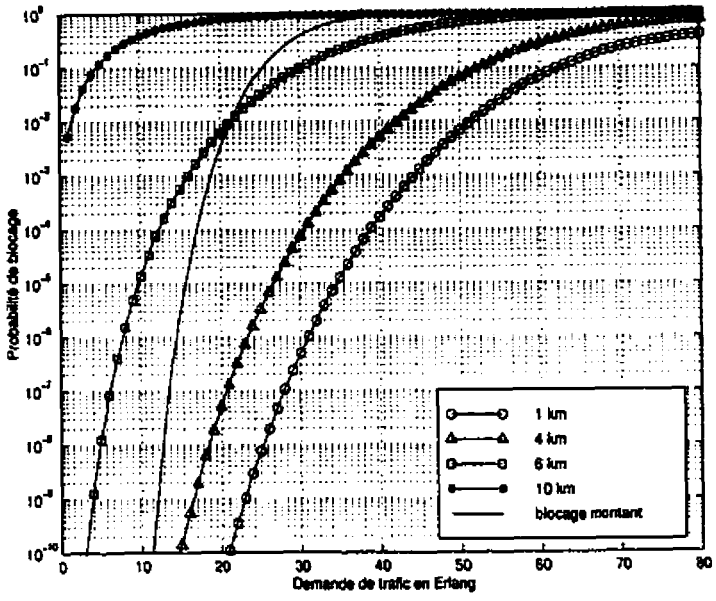


Figure 3.18: Comparaison des probabilités de blocage pour une distribution uniforme suivant la distance - Méthode 1

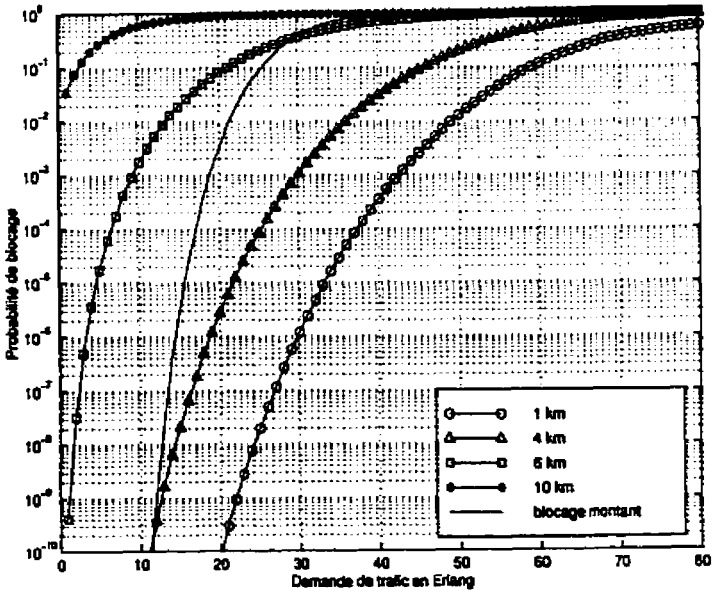


Figure 3.19: Comparaison des probabilités de blocage pour une distribution uniforme dans l'espace - Méthode 1

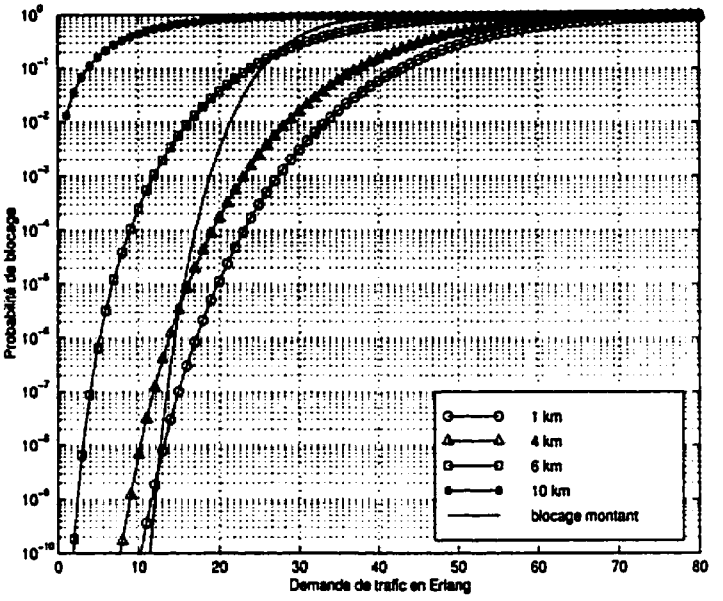


Figure 3.20: Comparaison des probabilités de blocage pour une distribution uniforme suivant la distance - Méthode symétrique

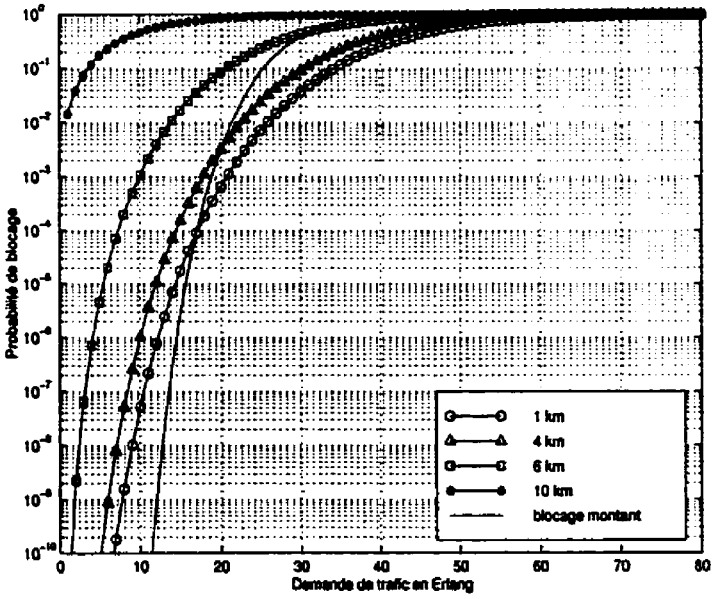


Figure 3.21: Comparaison des probabilités de blocage pour une distribution uniforme dans l'espace - Méthode symétrique

CONCLUSION

Après avoir défini ce qu'était le déficit de puissance, nous avons proposé une manière d'évaluer la probabilité qu'un tel phénomène se produise dans une cellule.

Après une introduction sur différentes notions sur le CDMA, et le fonctionnement d'un réseau type IS-95 dans le chapitre 1, nous avons commencé, par faire l'étude d'une cellule isolée pour se fixer les idées et avoir une évaluation préliminaire des performances d'une cellule dans le second chapitre. Dans un premier temps, nous avons développé la théorie sans tenir compte du facteur de voix. Cette première phase nous a permis de trouver certains résultats intéressants comme l'apparition d'un nombre maximal limite d'usagers que le système peut physiquement administrer. Pour un plus grand nombre de mobiles actifs en même temps, le contrôle de puissance n'arrive plus à jouer son rôle et la puissance qu'exige chaque mobile devient infinie. L'intégration du facteur de voix dans un deuxième temps nous a permis de constater le gain sur la capacité qu'apporte cette technique. Grossièrement, le gain dans la capacité est inversement proportionnel au facteur de voix. Un facteur de voix de 50% double quasiment la capacité de la cellule.

Dans le chapitre 3, nous nous sommes intéressés à une cellule non isolée, mais intégrée dans un réseau de plusieurs cellules. Ce qui est une vision plus réaliste de ce qui se passe dans un réseau réel. Nous avons considéré alors un réseau de cellules hexagonales, qui est le réseau parfait théorique (cellules formant un pavage complet de la surface). Nous avons entrepris d'étendre les résultats du chapitre 2 pour une cellules subissant des interférences de la part de cellules voisines. Nous avons alors proposé trois méthodes de calculs, une ayant tendance à sous estimer la probabilité de déficit de puissance, une supposant une certaine symétrie du réseau

(correspondant plus à une situation de pire cas), et enfin une troisième méthode originale que l'on a appelée méthode matricielle et qui était une sorte d'extension de la première méthode. Cette troisième méthode introduit une nouvelle manière de tenir compte des interférences des cellules externes et permet en outre de prendre en compte des configurations du réseau plus générale que la méthode symétrique. Nous pouvons en effet avoir des comportements totalement différents pour chaque cellule du réseau.

Dans les deux chapitres, nous avons terminé en comparant les courbes de probabilité de déficit de puissance aux courbes de probabilités de blocage dans le sens montant. De manière générale nous avons vu que le blocage dans le sens montant reste le phénomène prépondérant. Le déficit de puissance semble être le problème le plus important lorsque les tailles de cellules sont grandes. Mais dans le cas de très grosses cellules, il se peut que les mobiles eux-mêmes n'aient pas suffisamment de puissance pour rejoindre la station de base, alors que nos calculs supposent que tous les usagers souhaitant avoir une communication, l'obtiennent forcément, si toutefois la station de base est capable d'accueillir le nouvel usager. Dans le cas de petites cellules, le seul cas où des problèmes apparaissaient correspondait à une situation de cellule non isolée, se basant sur l'hypothèse de symétrie.

Le déficit de puissance, même s'il semble poser moins de problèmes à l'heure actuelle que le blocage dans le sens montant, est un problème qui va prendre plus d'importance avec l'arrivée des systèmes de troisième génération. Ces nouveaux systèmes comptent en effet offrir de nouveaux services tels qu'internet, le courrier électronique... Ces derniers vont augmenter surtout la quantité de données envoyées sur le lien descendant et pas trop sur le lien montant. En effet, le mobile n'enverra que peu d'informations (requêtes de pages web,...), alors que la station de base

devra envoyer des pages web, du son, de la vidéo... Et plus de données à envoyer veut dire plus de puissance utilisée par la station de base. Le problème de déficit de puissance risque donc de survenir plus souvent.

Bien sûr, des améliorations peuvent être apportées à la méthode développée ici. Les formules théoriques ont été obtenues souvent en faisant des approximations sur certaines variables. Cela a été le cas dans l'établissement de la formule donnant la puissance émise dans le cas de la cellule isolée. Des améliorations peuvent être apportées à ce niveau, en cherchant à garder les variables qui ont été remplacées par leur moyenne comme des variables aléatoires. On pourrait donc aboutir à un calcul plus précis. De plus, la difficulté dans le cas d'un réseau multi-cellulaire est de tenir compte des interférences inter-cellulaires et de leur influence sur chacune des cellules.

Une autre amélioration possible est de tenir compte du terme log-normal dans l'expression des pertes. Nous avons dans ce mémoire considéré uniquement une expression des pertes dépendant la distance, parce que c'est ce qui nous semblait le facteur le plus important pour le déficit de puissance. Cependant, on pourra tenir compte du terme log-normal qui traduit les effets d'ombrage et voir les variations des résultats dues à ce terme. De même, les imperfections du contrôle de puissance pourrait être prises en compte.

BIBLIOGRAPHIE

[Cad00] Loïc Cadoret. *Évaluation de la capacité en Erlangs d'un réseau CDMA non homogène pour le lien montant.* Thèse de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Décembre 2000.

[eIJ65] J.M. Wozencraft et I.M. Jacobs. *Principles of Communications Engineering.* Wiley, New-York, 1965.

[Gib96] Jerry D. Gibson. *The Mobile Communications Handbook.* CRC Press published in cooperation with IEEE Press, 1996.

[GJP+91] Klein S. Gilhousen, Irwin M. Jacobs, Roberto Padovani, Andrew J. Viterbi, Lindsay A. Weaver, and Charles E. Wheatley III. On the Capacity of a Cellular CDMA System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 40(2):p 303–312, May 1991.

[Hat80] Masaharu Hata. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. *IEEE Transactions on Vehicular Technologies*, 29(3):p 317–325, August 1980.

[HB00] Kimmo Hiltunen and Riccardo De Bernardi. "wcdma downlink capacity estimation". *IEEE 51st Vehicular Technology Conference*, 2:p 992–996, May 15-May 18 2000.

[HY96] Ching Yao Huang and Roy D. Yates. Call Admission in Power Controlled CDMA System. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 3:p 1665–1669, 1996.

[Ken97] Martin Kendall. CDMA RF Performance Maintenance Guidelines Issue 0.2. Technical report, Nortel Wireless Networks, August 1997.

[KK98] Dongwoo Kim and Kyunam Kim. Improving Idle Handoff in CDMA Mobile Systems. *IEEE Communications Letters*, 2(11):p 304–306, November 1998.

[LM98] Jhong Sam Lee and Leonard Sam Miller. *CDMA Systems Engineering Handbook*. Artech House Publishers, 1998.

[R.94] Padovani R. "Reverse Link Performance of IS-95 Based Cellular Systems". *IEEE Personal Communications Magazine*, 4:p 28–34, 1994.

[Ros] Sheldon M. Ross. *Introduction to Probability Models*. Academic Press, 5^{me} edition.

[VV93] Audrey M. Viterbi and Andrew J. Viterbi. Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 11(6):p 892–900, August 1993.

[VVGZ94] A.J. Viterbi, A.M. Viterbi, Klein S. Gilhousen, and Ephraim Zehavi. Soft Handoff Extends CDMA Cell coverage and Increases Reverse Link Capacity. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 12(8):p 1281–1287, 1994.

[WL97] Daniel Wong and Teng Joon Lim. Soft Handoffs in CDMA Mobile Systems. *IEEE Personal Communications*, 4(6):p 6–17, December 1997.