



**HAL**  
open science

## Allocation de ressources radios dans les réseaux radiomobiles

Xavier Lagrange

► **To cite this version:**

Xavier Lagrange. Allocation de ressources radios dans les réseaux radiomobiles. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Paris 13, 2000. tel-02467000

**HAL Id: tel-02467000**

**<https://imt-atlantique.hal.science/tel-02467000>**

Submitted on 5 Feb 2020

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

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

Université Paris XIII

# **Allocation de ressources radios dans les réseaux radiomobiles**

rapport présenté le 3 juillet 2000  
en vue de l'obtention

de l'habilitation à diriger des recherches

**Xavier Lagrange**

(Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications)

devant le jury composé de

Ken Chen	Rapporteur
Bernard Fino	Rapporteur
Armand Lévy	Rapporteur
Philippe Godlewski	Examineur
Bijan Jabbari	Examineur
Guy Pujolle	Examineur
Jean-Pierre Schermann	Examineur



## Sommaire

1. Introduction.....	1
2. Présentation du domaine.....	3
2.1. Réseaux de 1ère génération.....	3
2.2. Réseaux de 2ème génération.....	3
2.3. Réseaux de 3ème génération.....	5
3. Allocation de ressources radios dans les réseaux radiomobiles.....	7
3.1. Analyse d'interférence.....	7
3.1.1. Présentation du modèle.....	7
3.1.2. Calcul de C/I sur la voie descendante.....	8
3.1.3. Calcul de C/I sur la voie montante.....	11
3.1.4. Voie montante avec contrôle de puissance.....	12
3.2. Gestion des ressources radios.....	13
3.3. Systèmes avec une composante TDMA.....	14
3.1.2. Allocation fixe de fréquences.....	14
3.1.2. Allocation dynamique de fréquences.....	16
3.4. Systèmes CDMA.....	17
4. Résumé des activités de recherche.....	21
4.1. Planification cellulaire.....	21
4.1.1. Répartition de l'interférence dans un réseau régulier.....	21
4.1.2. Impact des antennes adaptatives.....	21
4.1.3. Modélisation de la planification cellulaire.....	23
4.2. Analyse de performances.....	24
4.2.1. Réseaux hiérarchiques.....	24
4.2.2. Redirection d'appel et équité.....	24
4.3. Allocation dynamique de ressources.....	27
4.4. Gestion multi-service dans les réseaux CDMA.....	31
4.5. Etude du soft-handover dans les réseaux CDMA.....	31
5. Publications.....	35
5.1. Ouvrages.....	35
5.2. Ouvrages coordonnées.....	35
5.3. Revues internationales.....	35
5.4. Congrès internationaux avec actes.....	36
5.5. Congrès avec diffusion restreinte.....	37
5.6. Rapports internes.....	38

6. Encadrement .....	39
6.1. Thèses .....	39
6.2. Thèse professionnelle de mastère de l'ENST .....	39
6.3. Mémoires de DEA .....	39
6.4. Mémoires de Diplomarbeit .....	39
7. Activités d'enseignement.....	41
7.1. Formation initiale ENST.....	41
7.1.1. Troisième année et mastère.....	41
7.1.2. Deuxième année.....	42
7.1.3. Bases de connaissance indispensables .....	42
7.2. Formation continue .....	43
7.2.1. Sessions catalogue.....	43
7.2.2. Sessions sur mesure.....	43
7.2.3. Consultance.....	44
8. Activités annexes.....	45
8.1. Organisation de congrès.....	45
8.2. Tutoriels Invités .....	45
8.3. Supports pédagogiques hypermédia.....	45
8.4. Contrat de recherche .....	46
8.5. Cours hors ENST .....	47
8.6. Direction de Collection .....	47
9. Conclusions et perspectives.....	49
Références .....	51
Annexe A1 : Curriculum vitae .....	55
Annexe A2 : Reproductions de publications.....	57

## 1. Introduction

Ce rapport présente mes activités de recherche et d'enseignement au sein du département Informatique et Réseaux de l'ENST de fin 1991 à 2000. Ces activités ont trait majoritairement au domaine des couches basses des réseaux radiomobiles. La montée en charge des réseaux GSM de 1995 à 2000 et la nécessité d'augmenter considérablement leur capacité, l'apparition des services de données dans les réseaux ont posé et posent encore de nombreux problèmes.

Du point de vue de la recherche, mes travaux ont visé d'une part à l'évaluation des performances des réseaux cellulaires en terme de télétrafic et d'autre part à l'étude de la gestion des ressources radio.

En terme d'enseignement, mes activités recouvrent un spectre plus large. J'assure un enseignement de base des réseaux (architecture en couches, fonctionnement d'un protocole, réseaux de données, réseaux téléphoniques) pour une partie des élèves de l'ENST et des cours plus spécialisés sur les réseaux radiomobiles, y compris les protocoles et concepts liés au sous-réseau fixe. Une partie importante de mon enseignement dans le domaine des réseaux radiomobiles se place dans le cadre de la formation continue de l'ENST.

Après un rappel du contexte de développement des réseaux radiomobiles dans la partie 2, je présente le modèle de calcul d'interférences dans les réseaux cellulaires dans la partie 3. Ce modèle de référence permet de mettre en évidence plusieurs phénomènes intervenant dans les réseaux cellulaires et sert de support à la présentation de la gestion des ressources radio. Les parties 4 à 8 font le bilan de mes activités : principaux travaux de recherche dans la partie 4, publications dans la partie 5, encadrement de travaux de recherche dans la partie 6, enseignement dans la partie 7 et activités diverses dans la partie 8. La partie 9 conclut ce document et ouvre quelques perspectives. L'annexe 1 contient mon *curriculum vitae* et l'annexe 2 reproduit quelques unes de mes publications.



## 2. Présentation du domaine

Le domaine des réseaux radiomobiles qui permettent des communications bilatérales était scindé traditionnellement en deux :

- la téléphonie sans fil qui offre un service sur des zones restreintes ou sur un ensemble de zones isolées (couverture par « îlots ») à laquelle on peut adjoindre les réseaux locaux sans fils,
- les réseaux cellulaires qui offrent une couverture continue sur un très large territoire et qui mettent en œuvre le « concept cellulaire ». Nous nous focalisons, dans cette présentation, sur ce type de réseaux.

Le concept cellulaire consiste à diviser un territoire en cellules dont chacune est couverte par une station de base du réseau. La réutilisation des mêmes fréquences sur des cellules différentes génère de l'interférence sur le signal utile reçu par le terminal mobile ou la station de base. Pour assurer une qualité de communication acceptable, le rapport entre le signal utile et l'interférence, appelé couramment  $C/I$ , doit être maintenu au-dessus d'un seuil donné. Ce seuil est une caractéristique essentielle de l'interface radio. La gestion des interférences est un des problèmes clés des réseaux radiomobiles.

### 2.1. Réseaux de 1ère génération

Les premiers réseaux cellulaires ont été déployés aux Etats-Unis à partir de 1978 et en Europe à partir de 1981. Ces réseaux utilisaient une transmission analogique et un multiplexage fréquentiel (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*) ; ils sont dits de première génération. Le seuil  $C/I$  est typiquement de 18 dB. Les fréquences doivent alors être affectées suivant un motif de réutilisation de grande taille, par exemple 21.

La densité d'abonnés pour les réseaux de première génération restait relativement modeste. Les cellules étaient de grande taille (macro-cellules de quelques dizaines de kilomètres de rayon) et la mobilité était relativement facile à gérer. On pouvait considérer qu'un mobile restait dans la même cellule pendant toute la durée d'une communication. Le transfert inter-cellulaire (*handover*) était assuré dans certains réseaux et sous certaines conditions mais il était relativement rare.

### 2.2. Réseaux de 2ème génération

Les réseaux de deuxième génération ont été conçus au milieu des années 80. Ils utilisent une transmission numérique qui a l'avantage de permettre de baisser le seuil  $C/I$  de fonctionnement grâce aux codes correcteurs d'erreurs. Le principal système de deuxième génération est le GSM (*Global System for Mobile Communications*) qui permet un

fonctionnement avec un C/I égal à 9 dB. Le GSM est un système FDMA/TDMA (*Frequency Division Multiple Access / Time Division Multiple Access*) sur lequel on peut activer le saut de fréquence lent. L'allocation est réalisée en mode circuit, c'est-à-dire qu'un intervalle de temps sur une fréquence déterminée (ou une séquence de saut déterminée sur plusieurs fréquences) est alloué pendant la durée totale d'une communication indépendamment de l'utilisation réelle de la ressource allouée.

Aux Etats-Unis, le GSM est également présent dans une bande de fréquence spécifique mais il y a d'autres systèmes : le système IS-136 qui utilise également le TDMA et le système IS-95 qui est basé sur le CDMA (*Code Division Multiple Access*). Dans le domaine de la téléphonie sans fils, le standard le plus répandu est le DECT, *Digital Enhanced Cordless Telecommunications*, qui utilise le TDMA et offre un débit nominal par utilisateur de 32 kbit/s. Il est basé sur l'allocation dynamique de canal.

En France, le nombre d'abonnés aux réseaux mobiles est passé de moins de 500 000 en 1992 à 20 millions au 1er janvier 2000. Il a été nécessaire d'augmenter considérablement la capacité des réseaux cellulaires en nombre d'abonnés par km<sup>2</sup>. Cette augmentation a été rendue possible par l'allocation de bandes de fréquences supplémentaires et surtout par la densification des réseaux. La multiplication des stations de base conduit à une réduction notable de la taille des cellules dans les zones fortement peuplées. En région parisienne, certaines cellules ont des rayons de quelques centaines de mètres et sont appelées micro-cellules. Un abonné est conduit à fréquemment changer de cellules en cours de communication. L'opérateur doit dimensionner le réseau pour garantir une qualité de service acceptable, y compris en déplacement.

A la fin de 1999, les services utilisés dans les réseaux GSM sont majoritairement des appels téléphoniques. La transmission de données reste marginale, en partie car elle est peu performante : les débits sont limités à 9,6 kbit/s (14,4 kbit/s dans certains cas) et l'allocation se fait en mode circuit. De plus, un circuit de données met en œuvre des formats différents entre les interfaces du réseau (interface radio, interface Abis entre la BTS, *Base Transceiver Station*, et le BSC, *Base Station Controller*, etc.). Les conversions de format nécessitent des équipements d'interfonctionnement et imposent quelques contraintes de synchronisation, pénalisantes en délai à la connexion. Dans la pratique, il faut 30 secondes entre le début de l'appel et l'établissement réel du circuit de données. La consultation de serveurs d'information (serveur web) n'est pas aisée sur GSM. Elle se fait à faible débit et elle est facturée à la durée.

Le service GPRS, *General Packet Radio Service*, est une évolution de GSM pour l'adapter aux besoins de la transmission de données. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- développement d'un réseau de transport à commutation par paquets constitué de routeurs IP (*Internet Protocol*) gérant des fonctions spécifiques de mobilité,
- adaptation du réseau d'accès GSM pour permettre une allocation des ressources radio par paquets et connexion du réseau d'accès au réseau de transport nouvellement développé,

- développement de terminaux capables de recevoir sur plusieurs intervalles de temps par trame TDMA (terminaux multi-slots).

Le réseau de transport est appelé réseau fédérateur GPRS. Il est basé sur le protocole IP mais permet la compatibilité avec d'autres protocoles (par exemple X.25). Le mode paquet sur la voie radio nécessite le développement de nouveaux protocoles de partage du canal radio et de liaison de données. L'existence de terminaux multi-slots permet d'augmenter les débits instantanés par utilisateur et de les porter à environ 30 kbit/s vers 2000-2001.

La spécificité du médium radio (multitrajét entraînant des évanouissements soudains du signal, fluctuation due à la mobilité des émetteurs, des récepteurs et des obstacles,...) et la mobilité des usagers nécessitent le développement de protocoles spécifiques à GPRS. Il n'est pas possible de réutiliser tels quels les protocoles TCP/IP. De plus, des mécanismes adaptés de gestion de la ressource radio doivent être mis en œuvre.

### 2.3. Réseaux de 3ème génération

La norme GSM est en évolution constante : avec le GPRS, il sera possible d'atteindre à terme des débits de 115 kbit/s (voire 170 kbit/s) ; avec l'utilisation d'une modulation 8 DPSK au lieu de la modulation GMSK, des débits de 384 kbit/s sont envisagés sur des zones restreintes. Cette évolution est connue sous le nom d'EDGE (*Enhanced Data Rates for the GSM Evolution*). Il est cependant hors de question de dépasser 384 kbit/s sans une modification profonde de l'interface radio. Les réseaux dits de 3ème génération ont pour principales caractéristiques d'offrir des débits allant jusqu'à 2 Mbit/s.

Les principaux services attendus sont les suivants :

- hauts débits (2 Mbit/s en fixe, plusieurs centaines kbit/s en déplacement),
- convergence entre les réseaux fixes et les réseaux mobiles, les réseaux téléphoniques et les réseaux de données, les réseaux publics et les réseaux privés,
- services paquet et circuit (y compris sur voie radio),
- facturation au volume et au temps,
- réseaux de forte capacité,
- sessions multiples simultanées (appel téléphonique et consultation du web).

L'UIT (Union Internationale des Télécommunications) désigne les systèmes de 3ème génération sous le vocable IMT 2000 (*International Mobile Telecommunications*). En Europe, on parle d'UMTS, *Universal Mobile Telecommunication Systems*, dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- transmission de la voix à 8 kbit/s,

- transmission de données jusqu'à 144 kbit/s en rural (voire 384 kbit/s) à au plus 500 km/h, jusqu'à 384 kbit/s en extérieur urbain (voire 512 kbit/s) à au plus 120 km/h, jusqu'à 2 Mbit/s en extérieur avec faible portée ou en intérieur à au plus 10 km/h,
- compatibilité avec les services support ATM,
- compatibilité avec les services GSM, IP et RNIS bande étroite et bande large.

Après une phase de comparaison des différents projets d'interface radio (1997-1998), l'adoption du CDMA a été définitivement entérinée en 1999 par les différentes instances de normalisation. En Europe, l'ETSI (*European Telecommunication Standard Institute*) a sélectionné une interface radio appelée UTRA, *UMTS Terrestrial Radio Access*. Cette interface est basée sur les travaux du projet européen FRAMES (*Future Radio wideband Multiple Access Systems*), dont l'ENST a été partenaire. Elle utilise le CDMA mais qui peut se décliner en 2 modes :

- mode FDD (*Frequency Division Duplex*) qui sépare les voies montantes et descendantes en utilisant deux fréquences différentes ; par ailleurs, ce mode n'a pas de composante TDMA.
- mode TDD (*Time Division Duplex*) qui sépare les voies montantes et descendantes en utilisant deux intervalles de temps différents ; par ailleurs, ce mode a une composante TDMA car chaque période de 10 ms est découpée en 15 intervalles de temps.

Une proposition similaire à UTRA-FDD est faite par l'ANSI (*American National Standards Institute*). L'interface radio est une évolution d'IS-95 appelée cdma2000 qui utilise le FDD et peut supporter une transmission multiporteuse.

Au sein de l'UIT, un accord a été signé le 5 novembre 1999. Cinq systèmes sont retenus comme répondant aux critères requis pour l'IMT 2000 :

- IMT DS (*Direct Spread*) ; interface UTRA de l'ETSI dans son mode FDD
- IMT MC (*Multi-Carrier*) ; cdma2000 (évolution d'IS-95) avec composante mono-porteuse et composante multi-porteuses,
- IMT TC (*Time-Code*) ; interface UTRA de l'ETSI dans son mode TDD,
- IMT SC (*Single Carrier*) ; évolution d'IS 136 vers le GSM appelée UWC-136.
- IMT FT (*Frequency Time*) ; évolution de DECT avec une modulation plus sophistiquée qui permet d'atteindre des débits de 2 Mbit/s.

### 3. Allocation de ressources radios dans les réseaux radiomobiles

L'établissement d'une communication ou d'une session de transmission de données dans un système radiomobile fait intervenir de nombreux équipements et protocoles. La qualité de service dépend d'une multitude de facteurs. Elle est cependant en grande partie influencée par la qualité de l'interface radio. La transmission radio requiert l'utilisation d'une partie du spectre hertzien. La bonne gestion de la ressource radio est donc un élément clé des systèmes radiomobiles. L'objet de cette partie est d'en présenter quelques problématiques.

Dans un premier temps nous analysons les interférences dans un réseau radiomobile. Cette présentation à but pédagogique permet d'exposer les notions classiques en radiomobiles et de préciser les notations. Nous en déduisons les différents paramètres sur lesquels il est possible d'agir. Nous présentons ensuite quelques mécanismes d'allocation des ressources radio dans des réseaux TDMA puis dans des réseaux CDMA.

#### 3.1. Analyse d'interférence

Les premiers calculs d'interférence ont été faits à la fin des années 60 pour des réseaux hexagonaux réguliers utilisant le FDMA avec une propagation uniforme [Eng 69]. L'effet de masque dans le calcul d'interférence est prise en compte dans [MuG 82]. Les auteurs de [YeS 84] adoptent une approche similaire pour le calcul du rapport C/I entre le signal utile et les interférences. Dans [Ste 85] l'auteur présente une étude du C/I basée sur des simulations. Le calcul de C/I a été fait pour un réseau CDMA régulier par Andrew Viterbi et d'autres personnes de la société Qualcomm [Gil 91]. Cette publication a donné lieu ensuite à de nombreux travaux de recherches [Ché 95] [ChG 92] [Zor 97]. Dans ce paragraphe, nous exposons le modèle utilisé. Nous nous attacherons à analyser l'impact de l'effet de masque et les différences entre les voies montantes et descendantes.

Nous considérons un réseau cellulaire quelconque (FDMA, TDMA ou CDMA) mais en tenant seulement compte des interférences co-canal. Les interférences venant des canaux adjacents sont supposées négligeables.

##### 3.1.1. Présentation du modèle

Soit  $H=(h_{i,k})$  la matrice représentant les atténuations entre le mobile  $MS_i$  et la station de base  $BS_k$ , hors effet de masque. Lorsqu'on considère des antennes omnidirectionnelles, le paramètre  $h_{i,k}$  est l'atténuation de parcours. On considère habituellement que  $h_{i,k} = l/r_{i,k}^\gamma$  où  $l$  un coefficient de proportionnalité dépendant des conditions de propagation,  $r_{i,k}$  est la distance entre le mobile  $i$  et la station de base  $k$  et  $\gamma$  est un exposant dépendant de l'environnement et typiquement compris entre 2 et 4. Dans un réseau tri-sectorisé, le paramètre  $h_{i,k}$  peut intégrer le gain de l'antenne de la station de base dans la direction considérée.

L'effet de masque est modélisé à l'aide d'une loi log-normale. On introduit le coefficient  $a_{i,k}$  désignant le masque entre le mobile  $i$  et la station de base  $k$ . Le coefficient est exprimé en échelle linéaire mais on caractérise la loi de probabilité en utilisant la moyenne et l'écart-type de la valeur en dB de  $a_{i,k}$  (i.e.  $10\log a_{i,k}$ ). Pour prendre en compte les obstacles proches du mobile, on considère une corrélation entre les masques pour un même mobile et différentes stations de base [ACM 88]. Le coefficient  $a_{i,k}$  est donc décomposé en deux coefficients indépendants :

$$a_{i,k} = b_i a'_{i,k}, \quad (3.0)$$

où  $b_i$  et  $a'_{i,k}$  suivent des lois log-normales indépendantes. Le paramètre  $b_i$  représente la partie du masque commune à toutes les stations de base pour le mobile  $i$ . On considère habituellement un coefficient de corrélation de 0,5. Si  $\sigma$  désigne l'écart-type en dB de  $10\log a_{i,k}$ , alors l'écart type  $\sigma'$  de  $10\log a'_{i,k}$  et de  $10\log b_i$  est  $\sigma' = \sigma/\sqrt{2}$ .

L'équation de base liant la puissance  $C_i$  reçue sur un récepteur  $i$  et venant d'un émetteur  $k$  est donc :

$$C_i = P_k h_{i,k} a_{i,k}. \quad (3.0a)$$

Nous considérons dans les calculs le contrôle de puissance et la transmission discontinue (uniquement sur la voie montante). En CDMA, il est important d'avoir un contrôle précis de la puissance des mobiles pour assurer que tous les mobiles d'une cellule sont reçus avec le même niveau  $C_{\text{cible}}$ . Ce contrôle de puissance peut être aussi effectué dans un système TDMA. On a donc pour un mobile  $i$  relié à la station de base  $k$  :

$$P_{M,i} = \frac{C_{\text{cible}}}{h_{i,k} a_{i,k}} \quad (3.1)$$

où  $P_{M,i}$  désigne la puissance d'émission du mobile  $i$ .

De nombreux systèmes utilisent la transmission discontinue qui consiste à suspendre la transmission pendant les silences de parole. Pour la modélisation, on considère une variable aléatoire binomiale  $\delta_i$  à valeur 0 ou 1. La valeur moyenne  $\delta$  de cette variable représente le facteur d'activité, typiquement égal à 0,5.

### 3.1.2. Calcul de C/I sur la voie descendante

On calcule le C/I d'un mobile de référence  $MS_0$  connecté à la station de référence  $BS_0$  dans une configuration donnée, c'est-à-dire en supposant connue la localisation de tous les interféreurs. On désigne par  $K$  l'ensemble des stations de base réutilisant la même fréquence (y compris la  $BS_0$ ) et par  $BS_k$  l'ensemble des mobiles connectés à la station de base  $k$ . L'ensemble des notations est rappelé dans le tableau 3.1.

Sur la voie descendante (appelée aussi *downlink* ou *forward link*), le mobile de référence 0 reçoit le signal utile  $C_0$  de station de base  $BS_0$  :

$$C_0 = P_{e,0,0} a_{0,0} h_{0,0} \quad (3.2)$$

où  $P_{e,0,0}$  désigne la puissance d'émission de la station de base  $BS_0$  de référence vers le mobile de référence. En TDMA, à un instant donné, la puissance est entièrement dédiée à un utilisateur :  $P_{e,0,0} = P_{tot,0}$  où  $P_{tot,k}$  est la puissance nominale de la station de base  $k$ . En CDMA, la puissance est répartie entre plusieurs utilisateurs.

De façon générale pour un mobile  $i$ , le signal est perturbé par le bruit propre du récepteur  $N_0$ , l'interférence interne à la cellule  $I_{int,i}$  et les interférences provoquées par la réutilisation de la fréquence dans d'autres cellules  $I_{ext,i}$  :

$$I_{tot,i} = I_{int,i} + I_{ext,i} + N_0. \quad (3.3)$$

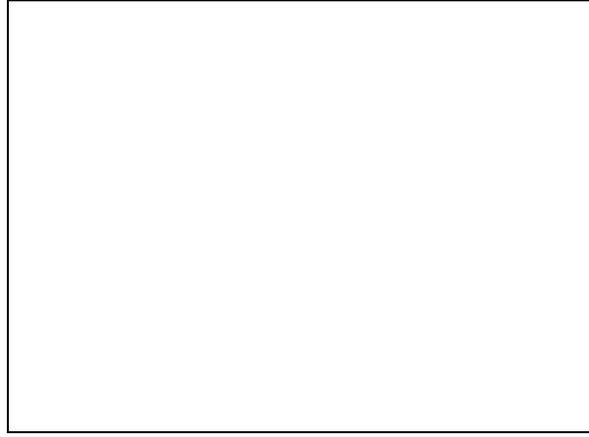


Figure 3.0a. Interférences sur la voie descendante pour le mobile de référence

Dans un système TDMA, il n'y a pas d'interférence interne. En revanche dans un système CDMA, du fait des multitrajets, les différents canaux d'une même station de base ne sont pas parfaitement orthogonaux à la réception du mobile. Soit  $\alpha$  le facteur d'orthogonalité ( $\alpha=0$  en cas d'orthogonalité parfaite). L'interférence intra-cellulaire pour le mobile de référence est due à toutes les transmissions de la station de base 0 vers les autres mobiles. On peut établir (pour un système CDMA) :

$$I_{int,0} = \alpha \sum_{j \in BS_0, j \neq 0} \delta_j P_{e,j,0} a_{0,0} h_{0,0} \quad (3.4)$$

Le mobile de référence reçoit des interférences de chacune des stations de base réutilisant la ou les mêmes ressources radio (défini par l'ensemble  $K$ ) :

$$I_{ext,0} = \sum_{k \in K, k \neq 0} P_{tot,k} a_{0,k} h_{0,k}. \quad (3.5)$$

On peut donc calculer si on néglige le bruit de fond :

$$C_0/I_{tot,0} = \left[ \alpha \sum_{j \in BS_0, j \neq 0} \delta_j \frac{P_{e,j,0}}{P_{e,0,0}} + \sum_{k \in K, k \neq 0} \frac{P_{tot,k}}{P_{e,0,0}} \frac{a_{0,k}}{a_{0,0}} \frac{h_{0,k}}{h_{0,0}} \right]^{-1}. \quad (3.6)$$

$i$	indice de mobile (0 pour le mobile de référence) (placé en premier)
$j$	indice de mobile dans les autres cellules que la cellule de référence
$k$	indice de station de base (0 pour la station de base de référence) (placé en second)
$K$	ensemble des cellules utilisant la même fréquence
$a_{i,k}$	masque entre le mobile $i$ et la station de base $k$
$a'_{i,k}$	partie du masque spécifique entre le mobile $i$ et la station de base $k$
$b_i$	masque pour le mobile $i$ commun à toutes les stations de base
$h_{i,k}$	atténuation de parcours entre le mobile $i$ et la station de base $k$
$\alpha$	facteur d'orthogonalité sur la voie descendante ( $\alpha=0$ en TDMA)
$\beta$	facteur d'orthogonalité sur la voie montante ( $\alpha=0$ en TDMA, $\alpha=1$ en CDMA)
$\delta_i$	état d'activité d'un émetteur (0 ou 1)
$\delta$	facteur d'activité
$\gamma$	exposant de l'atténuation (atténuation en $1/r^\gamma$ )
$\sigma$	écart-type du masque (écart-type de $10\log a_{i,k}$ )
$C_i$ ( $C_k$ )	signal utile reçu par le mobile $i$ (la station de base $k$ )
$I_{ext,i}$	interférence provoquée par les mobiles dans les cellules autres que celle où se trouve le mobile $i$
$I_{ext,k}$	interférence externe à la cellule $k$
$I_{int,i}$	interférence provoquée par les mobiles dans la cellule où se trouve le mobile $i$
$I_{int,k}$	interférence interne à la cellule $k$
$P_{e,i,k}$	puissance sur la station de base $k$ dédiée à la transmission vers le mobile $i$
$P_{tot,k}$	puissance totale utilisée par la station de base $k$
$P_{M,i}$	puissance de transmission du mobile $i$

Tableau 3.1. Notations et conventions utilisées

En utilisant l'équation (3.0) qui met en évidence la corrélation des masques, on en déduit

$$C_0/I_{tot,0} = \left[ \alpha \sum_{j \in BS_0, j \neq 0} \delta_j \frac{P_{e,j,0}}{P_{e,0,0}} + \sum_{k \in K, k \neq 0} \frac{P_{tot,k}}{P_{e,0,0}} \frac{a'_{0,k}}{a'_{0,0}} \frac{h_{0,k}}{h_{0,0}} \right]^{-1} \quad (3.7)$$

Dans le cas d'un système TDMA, il n'y a pas d'interférence interne et, en l'absence de contrôle de puissance, toutes les puissances sont égales, on a donc :

$$C_0/I_{tot,0} = \left[ \sum_{k \in K, k \neq 0} \frac{a'_{0,k}}{a'_{0,0}} \frac{h_{0,k}}{h_{0,0}} \right]^{-1} \quad (3.7a)$$

Lorsqu'on considère un système hexagonal régulier et un motif de réutilisation (cas d'un système TDMA classique), on peut restreindre l'ensemble  $K$  à la première couronne

d'interférence. Le facteur  $h_{0,k}$  dépend alors faiblement de  $k$  [Lag 00a] :  $h_{0,k} \propto 1/D^\gamma$  où  $D$  est la distance de réutilisation. On a donc

$$C_0/I_{\text{tot},0} = \left( \frac{D}{r_{0,0}} \right)^\gamma \left[ \sum_{k \in K, k \neq 0} \frac{a'_{0,k}}{a'_{0,0}} \right]^{-1}. \quad (3.7b)$$

Pour un mobile de référence, seul le facteur  $a'_{0,k}/a'_{0,0}$  intervient dans la variation du C/I. Tous les facteurs  $a'_{i,k}$  sont indépendants. L'écart-type du C/I est d'autant plus faible que l'écart-type des facteurs  $a'_{i,k}$  est faible, ce dernier étant d'autant plus faible que la corrélation entre les masques est importante. La corrélation des masques a donc un impact bénéfique sur le C/I sur la voie descendante car elle diminue son écart-type. Cet effet, explicité dans le cas d'un système TDMA, est également vrai pour un système CDMA.

### 3.1.3. Calcul de C/I sur la voie montante

Considérons le mobile de référence 0 émettant à la puissance  $P_{M,0}$  vers la station de base 0. Comme sur la voie descendante, on peut établir

$$C_0 = P_{M,0} a_{0,0} h_{0,0}. \quad (3.8)$$

L'interférence est provoquée par tous les mobiles transmettant sur la même fréquence. Certains mobiles se trouvent sur la même cellule que celle de référence, d'autres mobiles se trouvent dans les cellules voisines. L'écriture formelle de l'interférence interne et externe est la même :

$$I_{\text{tot},0} = \sum_{k \in K} \sum_{j \in BS, k, j \neq 0} \delta_j P_{M,j} a_{j,0} h_{j,0}. \quad (3.9)$$

Sans contrôle de puissance, toutes les stations mobiles transmettent à la même puissance nominale. On peut donc calculer le C/I en négligeant le bruit de fond :

$$C_0/I_{\text{tot},0} = \left[ \sum_{k \in K} \sum_{j \in BS, k, j \neq 0} \delta_j \frac{a_{j,0}}{a_{0,0}} \frac{h_{j,0}}{h_{0,0}} \right]^{-1}. \quad (3.10)$$



Figure 3.0b. Interférences sur la voie montante pour la station de base de référence

Dans le cas d'un système CDMA, un mobile  $j$  qui interfère peut se trouver dans la cellule de référence et éventuellement très près de la station de base 0. La valeur de  $h_{j,0}$  est alors largement supérieure à  $h_{0,0}$  et par conséquent le  $C/I$  est très faible. Ce raisonnement illustre la nécessité du contrôle de puissance sur la voie montante dans un système CDMA.

De plus, contrairement à l'équation (3.6), l'équation (3.10) fait apparaître un rapport entre des masques affectant différents mobiles. En conséquence, la corrélation des masques n'améliore pas le  $C/I$  sur la voie montante. La voie descendante est d'autant plus « favorisée » par rapport à la voie montante que les masques sont corrélés.

### 3.1.4. Voie montante avec contrôle de puissance

On suppose maintenant un contrôle de puissance parfait. Tous les mobiles d'une cellule sont reçus avec le même niveau. On a donc, en tenant compte de la transmission discontinue :

$$P_{M,j} = \delta_j \frac{C_{\text{cible}}}{a_{j,k} h_{j,k}}. \quad (3.11)$$

Dans un système TDMA, l'interférence intra-cellulaire est nulle. Dans un système CDMA, on établit en combinant (3.9) et (3.11) :

$$I_{\text{int},0} = C_{\text{cible}} \sum_{j \in BS_0, j \neq 0} \delta_j. \quad (3.12)$$

L'interférence externe s'exprime comme

$$I_{\text{ext},0} = C_{\text{cible}} \sum_{k \in K, k \neq 0} \sum_{j \in BS_k} \delta_j \frac{a_{j,0}}{a_{j,k}} \frac{h_{j,0}}{h_{j,k}} \quad (3.13)$$

En tenant compte de la corrélation des masques (équation 3.0):

$$I_{\text{ext},0} = C_{\text{cible}} \sum_{k \in K, k \neq 0} \sum_{j \in BS_k} \delta_j \frac{a'_{j,0}}{a'_{j,k}} \frac{h_{j,0}}{h_{j,k}} \quad (3.14)$$

Le contrôle de puissance assure que le niveau reçu du mobile de référence est égal à  $C_{\text{cible}}$ . Pour disposer d'une formule commune aux cas TDMA et CDMA, on introduit un facteur  $\beta$  qui vaut 0 en TDMA (par d'interférence intra-cellulaire) et 1 en CDMA. On peut en déduire :

$$C_0/I_{\text{tot},0} = \left[ \beta \sum_{j \in BS_0, j \neq 0} \delta_j + \sum_{k \in K, k \neq 0} \sum_{j \in BS_k} \delta_j \frac{a'_{j,0}}{a'_{j,k}} \frac{h_{j,0}}{h_{j,k}} \right]^{-1}. \quad (3.15)$$

Dans le cas d'un système TDMA, l'expression se simplifie en :

$$C_0/I_{\text{tot},0} = \left[ \sum_{k \in K, k \neq 0} \sum_{j \in BS_k} \delta_j \frac{a'_{j,0}}{a'_{j,k}} \frac{h_{j,0}}{h_{j,k}} \right]^{-1}. \quad (3.15b)$$

Comme sur la voie descendante, la corrélation des masques réduit l'écart-type du C/I avec le contrôle de puissance. Cet effet n'apparaît pas lorsque le contrôle de puissance n'est pas activé. La généralisation des terminaux mobiles portatifs a augmenté l'usage de ceux-ci à l'intérieur des bâtiments, qui correspond à une forte corrélation des masques. Le contrôle de puissance sur la voie montante est donc indispensable pour compenser le désavantage sur le C/I entraîné de la corrélation des masques.

### 3.2. Gestion des ressources radios

L'objectif d'un système radiomobile est d'assurer, pour toutes les communications, un C/I supérieur au seuil de fonctionnement. Ce seuil peut dépendre du service demandé et surtout du débit requis. Il n'est évidemment pas possible de garantir à 100% ce seuil. On tolère habituellement que, dans 5 à 10%, des cas ce seuil ne soit pas atteint.

En étudiant les différents paramètres intervenant dans les formules (3.7) et (3.15), on peut distinguer plusieurs stratégies pour assurer le fonctionnement du réseau :

- planifier *a priori* les fréquences sur les cellules (FCA, *Fixed Channel Allocation*), c'est-à-dire choisir l'ensemble  $K$  des cellules co-canal de façon à garantir dans 90 à 95% des cas que le C/I est supérieur au seuil quelle que soit la configuration (pour toutes les positions des mobiles  $j$ ),
- affecter dynamiquement les canaux radio (DCA, *Dynamic Channel Allocation*), c'est-à-dire choisir, pour une configuration de mobiles données (mobiles  $j$  fixés), l'ensemble  $K$ ,
- utiliser le saut de fréquence pour profiter d'une diversité d'interfereurs, c'est-à-dire augmenter l'ensemble  $K$  des cellules co-canal et l'ensemble des mobiles interférents pour minimiser les variations du C/I suivant la configuration et rapprocher le C/I d'une valeur cible constante. On limite alors la charge du réseau et on utilise généralement le contrôle de puissance et la transmission discontinue.
- utiliser l'étalement de spectre pour abaisser le C/I seuil et relâcher les contraintes sur l'ensemble  $K$  ; ceci est conditionné au contrôle de puissance sur la voie montante.

Les systèmes FDMA/TDMA utilisent principalement les 3 premières stratégies. Les systèmes CDMA utilisent la dernière.

Dans le cas de l'allocation dynamique de fréquence, la transmission discontinue et le contrôle de puissance modifient la configuration d'interférence et peuvent nécessiter de fréquentes réallocations des ressources radio. Ils ne sont généralement pas utilisés dans ce type de système. En revanche, ils ont un effet bénéfique en cas d'allocation fixe.

Pour minimiser les interférences, il est également possible de jouer sur les gains des antennes qui sont inclus dans le facteur  $h_{ij}$ . C'est l'approche utilisée par les antennes adaptatives.

### 3.3. Systèmes avec une composante TDMA

#### 3.1.2. Allocation fixe de fréquences

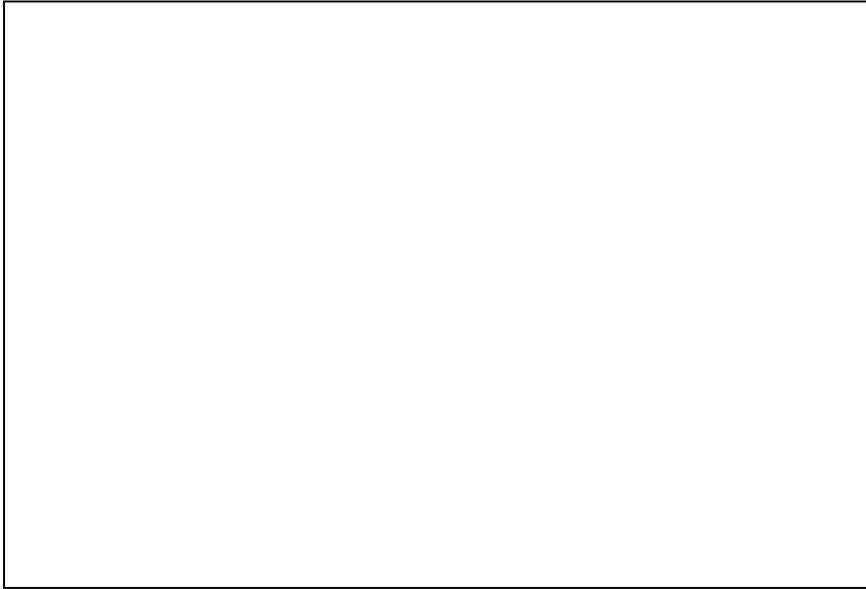
En 2000, les réseaux radiomobiles européens sont de type GSM. Les opérateurs planifient les fréquences à chaque station de base *a priori* (FCA, Fixed Channel Allocation) et doivent s'assurer que le C/I est supérieur au seuil de fonctionnement (9 dB dans le cas de GSM). Dans un réseau régulier les fréquences sont réparties sur un motif cellulaire [McD 79] répété sur l'ensemble de la zone à couvrir. Cet aspect bien connu n'est plus un sujet de recherche actuellement.

Une des principales caractéristiques de l'interface radio de GSM est la possibilité de saut de fréquence [LGT 99]. Ce dernier réalise une diversité des interféreurs et permet de profiter à plein des mécanismes de réduction de l'interférence : transmission discontinue qui exploite les silences dans une conversation et contrôle dynamique de puissance. Nous étudions plus particulièrement ce dernier aspect.

Quand on suppose connue la configuration du réseau (l'ensemble des facteurs  $h_{j,k}$ ), il est possible de définir une stratégie d'affectation des puissances pour maximiser le C/I [Zan 92]. Les auteurs de [NuG 98] ont fait une synthèse des différents algorithmes de contrôle de puissance et présentent une formulation générale du problème. Dans [Lag 00a], on étudie l'influence du contrôle de puissance sur la répartition du C/I dans un réseau régulier. Pour comparer les performances des systèmes on utilise le seuil de C/I à 5%, c'est-à-dire la valeur maximale  $X$  en dB telle que  $\text{probabilité}(C/I \leq X) = 5\%$ .

On suppose un contrôle de puissance parfait sur le signal reçu. L'émetteur adapte sa puissance de façon à ce que la puissance reçue au récepteur soit constante quelle que soit la distance entre émetteur et récepteur et quel que soit le masque. En d'autres termes, le contrôle de puissance compense totalement les variations d'affaiblissement de parcours (*path loss*). La variation de la puissance est cependant limitée à une plage de 30 dB.

La répartition du C/I est représentée dans la figure 3.1 pour un motif à 12 sur la voie montante. Le seuil à 5% passe de 10,5 dB à 18 dB grâce au contrôle de puissance. En effet, du fait du saut de fréquence, une station de base est interférée par un nombre important de mobiles situés à des distances variables. Le contrôle de puissance augmente très peu la variation de l'interférence (l'écart-type du I n'est pas changé). En revanche il réduit considérablement la variation du signal utile C. L'écart-type du C/I est donc diminué : il passe de 9,4 dB à 3,5 dB (cf. [Lag 00a]). On constate que le C/I moyen est réduit : il passe de 23,4 dB à 22,2 dB mais, du fait de la réduction de l'écart-type, le seuil à 5% est sensiblement augmenté.



Cas d'un réseau tri-sectorisé avec un motif à 12. Atténuation en  $1/r^{3,5}$ . Effet de masque d'écart-type 6 dB avec corrélation des masques.

*Figure 3.1. Répartition du C/I avec et sans contrôle de puissance sur la voie montante*

Sur la voie descendante, les effets sont différents. Avec le contrôle de puissance, les stations de base ne transmettent pas à la puissance nominale mais à une puissance dépendant de l'atténuation subie par les mobiles de leur cellule. L'écart-type du C/I est réduit car l'écart-type du signal utile C l'est également mais dans des proportions bien moins grandes que sur la voie montante : il passe de 8,3 dB à 5,7 dB. Comme le C/I moyen est réduit (de 24,5 dB à 21,1 dB), le seuil à 5% est dégradé de 14 à 12 dB. Sur la voie descendante, il ne faut pas compenser totalement l'affaiblissement de parcours et le masque. Un exemple simple permet de l'illustrer : sans contrôle de puissance un mobile proche de la station de base a toujours un fort C/I car le signal reçu C est important ; avec le contrôle de puissance, un mobile proche reçoit un signal voisin de celui qu'il reçoit en bordure de cellule, l'interférence est légèrement réduite mais le C/I est généralement plus faible.

L'auteur de [Whi 93] montre qu'il est judicieux de compenser partiellement l'affaiblissement de parcours de façon à continuer à favoriser les mobiles proches de la station de base. En considérant seulement deux cellules interférantes, il montre qu'il est optimal de compenser la moitié de l'affaiblissement de parcours en dB. En d'autres termes, il faut prendre comme puissance la moyenne géométrique de la puissance nominale et de la puissance obtenue avec une compensation totale de l'affaiblissement de parcours. Un tel algorithme permet de faire passer le seuil à 5% de 14 à 15,5 dB comme on le constate dans la figure 3.2. Dans [Gej 92], on donne une méthode générale d'optimisation dans le cas d'un réseau CDMA.



Lorsqu'il est activé, le contrôle de puissance est supposé parfait.

Figure 3.2. Répartition du C/I avec et sans contrôle de puissance sur la voie descendante

### 3.1.2. Allocation dynamique de fréquences

Une classification des différents algorithmes d'allocation dynamique de puissance est donnée dans [BeP 89] et une revue de l'ensemble des algorithmes proposés dans la littérature est présentée par [KaN 96]. Selon [BeP 89], les mécanismes d'allocation dynamiques de fréquences suivent trois objectifs qui peuvent être combinés mais mettent généralement l'accent sur un seul des trois :

- adaptabilité au trafic ; on retrouve l'ensemble des mécanismes qui, à partir d'une demande en trafic connue sur chaque cellule et d'une matrice d'incompatibilité quasi-statique, affecte les canaux aux cellules,
- adaptabilité à l'interférence ; on retrouve les mécanismes qui, à chaque nouvelle demande, alloue un canal à partir de l'analyse des interférences existantes ; c'est le principe utilisé dans DECT,
- réutilisation des canaux ; cette dernière classe comprend essentiellement le *reuse partitioning* qui consiste à découper une cellule en plusieurs sous-cellules concentriques et à réutiliser plus densément les fréquences sur les sous-cellules de faible rayon.

La première famille de mécanisme repose sur une approche centralisée puisqu'on suppose connue la matrice d'incompatibilité entre toutes les cellules du réseau, c'est-à-dire la possibilité d'utiliser ou non la même fréquence sur deux cellules données. En réallouant l'ensemble des ressources à chaque nouvelle requête, le problème devient identique à l'optimisation d'une planification fixe (problème de coloriage de graphe). Le nombre de handover généré par un tel mécanisme le rend impraticable dans un réseau opérationnel. En revanche, il est possible d'appliquer une stratégie d'allocation basée sur le re-blocage : à

chaque nouvelle allocation dans une cellule, on choisit une fréquence qui bloque le maximum de cellules déjà bloquées pour cette fréquence et qui minimise le blocage de la fréquence sur de nouvelles cellules. Un tel mécanisme a été proposé dans [DrL 95a] (voir partie 4). Il s'applique à la fois aux systèmes FDMA/TDMA et aux systèmes FDMA/TDMA/CDMA.

### 3.4. Systèmes CDMA

La ressource principale dans les réseaux de type CDMA est la puissance allouée à un utilisateur. Les problèmes sont différents suivant le sens de transmission considéré. Dans le sens montant, il faut s'assurer que l'ensemble des mobiles sont reçus avec le même niveau de puissance (en supposant le même débit pour chaque utilisateur) pour disposer d'un taux d'erreur bit acceptable sur chaque liaison. Dans le sens descendant, les puissances allouées à chaque liaison individuelle peuvent varier mais la puissance totale est limitée par les caractéristiques de la station de base.

La capacité des systèmes CDMA a été calculée de manière théorique approchée dans [Gil 91]. Cette publication a donné lieu à de nombreux autres travaux ([ChG 92] [ViV 93] et [Zor 97]). L'ensemble de ces calculs considèrent le sens montant et des communications vocales, c'est-à-dire un ensemble de circuits aux mêmes débits.

Il est communément admis qu'une des applications majeures des systèmes UMTS sera la consultation interactive de bases de données (serveurs *web*). Dans ce cas le trafic dans le sens descendant (réseau vers terminal) sera bien plus important que dans le sens montant. De nombreuses études concernent le sens montant mais peu ont considéré le sens descendant, qui pourrait représenter le principal goulot d'étranglement.

Dans [YaH 95], [SKH 95],[KiR 99] on considère la liaison montante et plusieurs mobiles transmettant à des débits différents. Plusieurs stratégies d'allocation de puissance sont proposées et comparées. Nous nous attachons dans cette partie à la liaison descendante.

Dans un système CDMA offrant des débits utilisateurs différents, le débit en chip/s reste constant mais le facteur d'étalement varie. Il est donc plus simple de raisonner sur le rapport  $\gamma$  entre l'énergie d'un bit utilisateur et la densité spectrale de puissance de l'interférence et du bruit ( $E_b/I_0$ ). De façon générale, pour un mobile  $i$ , on a :

$$\gamma_i = \frac{W}{r_i} \left( \frac{I_{\text{int},i}}{C_i} + \frac{I_{\text{ext},i}}{C_i} + \frac{N}{C_i} \right)^{-1} \quad (3.16)$$

où  $r_i$  désigne le débit utilisateur pour le mobile  $i$ ,  $W$  la largeur de bande du signal.

L'objectif est de maximiser le débit total offert à l'ensemble des utilisateurs. Il faut déterminer l'allocation de puissance à chaque communication qui maximise :

$$\sum_i r_i \quad (3.17)$$

A cette allocation s'attachent plusieurs contraintes : la puissance totale d'une station de base est limitée, il faut garantir un débit minimal  $R_i$  à chaque utilisateur  $i$  et il faut assurer le rapport  $E_b/I_0$  est supérieur au seuil de fonctionnement. Les contraintes s'écrivent respectivement comme :

$$(1) \quad \sum_i P_{e,j,0} \leq P_{\max}$$

$$(2) \quad r_i \geq R_i \text{ pour tout } i$$

$$(3) \quad \gamma_i \geq \Gamma_i \text{ pour tout } i.$$

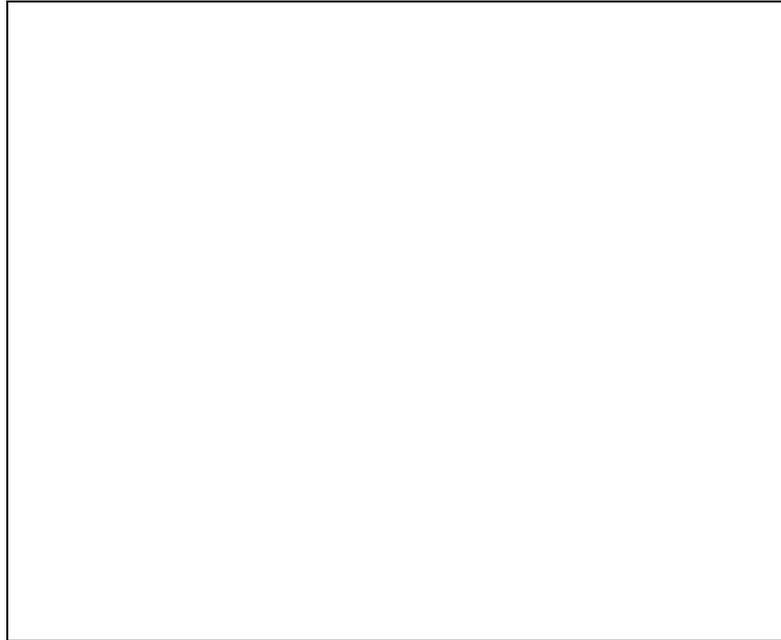
Pour disposer d'un cas de référence, on considère plusieurs utilisateurs qui demandent le débit maximal en exigeant un même débit minimal  $R$ . Plusieurs stratégies peuvent être utilisées :

- offrir à tous les utilisateurs un débit égal et supérieur au débit minimal ( $\forall i, r_j=r$  avec  $r \geq R$ )
- privilégier un utilisateur en restreignant les autres utilisateurs au débit minimal ; on accorde à l'utilisateur privilégié le débit maximal possible en tenant compte des contraintes de puissance (si 0 est l'utilisateur privilégié :  $r_j=R$  pour  $i \neq 0$  et  $\sum_i P_{e,j,0} = P_{\max}$ ).

La première stratégie est appelée « stratégie d'équité » ; la deuxième est appelée « stratégie de privilège ».

On considère, dans un réseau hexagonal régulier, un ensemble d'utilisateurs par cellule. Les utilisateurs sont uniformément répartis dans la cellule de façon aléatoire. Un utilisateur particulier, dont la localisation est paramétrable, est choisi comme utilisateur de référence. Il est placé sur la droite qui relie deux stations de base. On représente dans la figure 3.3, la variation du débit total disponible dans la cellule en fonction de la distance de l'utilisateur de référence à sa station de base. La stratégie de privilège permet de maximiser le débit total dans la plupart des cas. Ce résultat est naturel quand l'utilisateur de référence est proche de la station de base car il requiert une faible puissance. Il est intéressant de constater que ce résultat reste vrai quand l'utilisateur est à moins de 75% de la mi-distance entre les deux stations de base. Au delà, il vaut mieux utiliser une stratégie d'équité.

Il est globalement préférable de choisir à un instant donné un utilisateur particulier, même si celui-ci n'est pas le plus proche, et de lui donner le débit maximal. Pour introduire de l'équité, on peut changer régulièrement l'utilisateur privilégié. On introduit ainsi une composante de multiplexage temporel dans un système CDMA.



100 utilisateurs sont considérés dans la cellule dont un utilisateur de référence

*Figure 3.3. Débit total en fonction des stratégies d'allocation de la puissance*

Si les utilisateurs sont plus concentrés autour de la station de base, le gain apporté par la stratégie de privilège est augmenté. Ce résultat est en accord avec le concept d'*info-stations* qui consiste à servir seulement des utilisateurs proches des stations de base et à leur allouer un très haut débit [GoB 97]



## 4. Résumé des activités de recherche

### 4.1. Planification cellulaire

#### 4.1.1. Répartition de l'interférence dans un réseau régulier

Dans le cadre de mémoires de fin d'étude, de projets d'élèves et de la thèse d'Alexander Bathelt, nous avons étudié la répartition du C/I dans un réseau cellulaire régulier. Les études sont basées principalement sur des simulations. Elles sont faites en reprenant les principaux paramètres de GSM mais peuvent s'appliquer à tout type de système.

Le rapport interne [Lag 00a] analyse également l'impact de la sectorisation, de la corrélation des masques entre un mobile et différentes stations de base, du saut de fréquence et de la transmission discontinue.

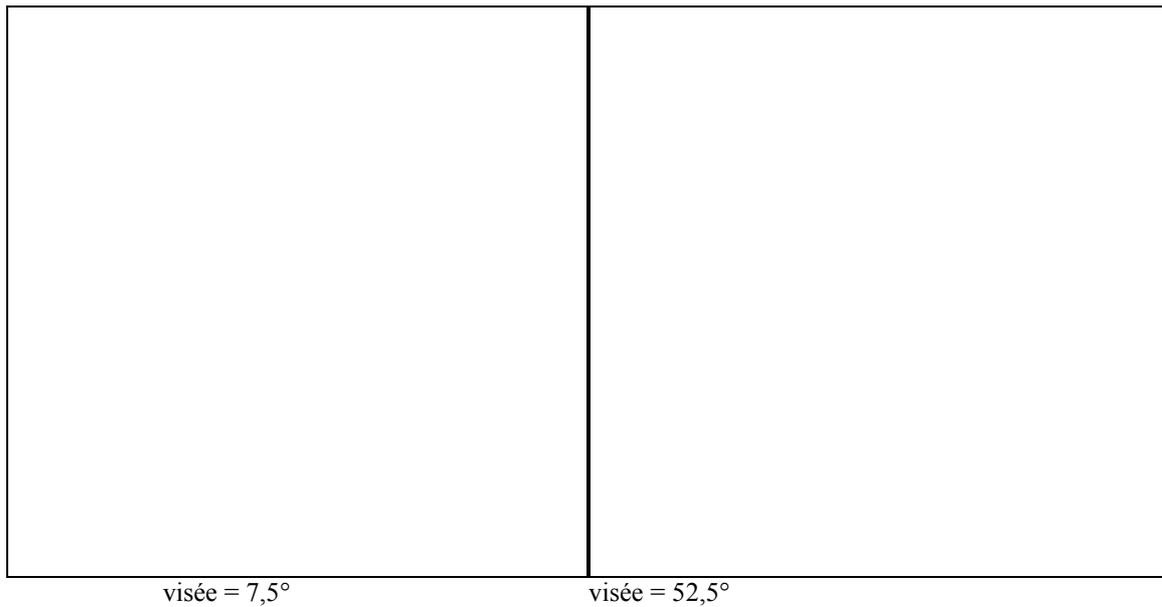
#### 4.1.2. Impact des antennes adaptatives

Pour réduire les interférences dans un réseau cellulaire, il est possible d'utiliser des stations de base avec des antennes adaptatives, appelées également antennes intelligentes ou *smart antennas* [Win 98]. Celles-ci sont constituées de plusieurs antennes, distantes typiquement d'une demi-longueur d'onde. Le signal reçu ou transmis est une moyenne pondérée des signaux reçus sur chaque antenne. En jouant sur les poids respectifs, il est possible de contrôler le diagramme de rayonnement de la station de base (*beam forming*). Avec un réseau de  $N$  éléments alignés et espacés d'une demi-longueur d'onde et pour une direction de visée  $\theta_{in}$ , le gain de l'antenne pour un angle  $\theta$  est donné par la fonction

$$g_{aa}(\theta, \theta_{in}) = \frac{\sin^2\left(N \frac{\pi}{2} (\sin\theta_{in} - \sin\theta)\right)}{N^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} (\sin\theta_{in} - \sin\theta)\right)} g(\theta) \quad (4.1)$$

où  $g$  désigne le gain dans la direction  $\theta$  avec une seule antenne.

On représente dans la figure 4.1, le diagramme de rayonnement de l'antenne pour différents angles et différentes visées avec 4 éléments. Une visée à  $7,5^\circ$  correspond au secteur 4. Les secteurs 3 et 4 se recouvrent largement. Pour  $\theta=0^\circ$  (frontière des secteurs 3 et 4°), le gain de l'antenne est de  $-0,94$  dB.



Ouverture de l'antenne à 3 dB : 90°, 4 éléments,  
 Le diagramme est donné en échelle linéaire d'amplitude du champ (racine carrée de la puissance)

*Figure 4.1 : Diagramme de rayonnement d'une antenne adaptative*

Sur la voie descendante, la station de base peut diriger le faisceau vers le mobile. Les interférences créées sur les cellules co-canal sont ainsi réduites. Sur la voie montante, la station de base peut recevoir les signaux seulement dans la direction où se trouve le mobile. Elle est donc moins sensible aux interférences. On parle alors de SFIR, *Spatial Filtering for Interference Reduction*.

En disposant d'un faisceau plus directionnel, on concentre mieux l'énergie dans une direction particulière et on améliore le gain de l'antenne. Les antennes adaptatives permettent donc d'améliorer la couverture.

Les systèmes cellulaires utilisent majoritairement un duplexage fréquentiel (e.g. GSM). Les différents trajets que subit l'onde électromagnétique sont étroitement liés à la fréquence utilisée. L'azimut du signal reçu à la station de base (voie montante) peut être différent de l'azimut à choisir pour émettre vers le mobile considéré (voie descendante). Il est donc difficile de diriger précisément le faisceau vers le mobile. On considère donc généralement des faisceaux dont la direction est prédéfinie mais ne suit pas à la trace un mobile. Par exemple on découpe une cellule en 8 sous-secteurs. Suivant la position du mobile, on sélectionne le faisceau dans le sous-secteur où il se trouve. Les sous-secteurs se recouvrent largement ce qui permet de gérer correctement des terminaux rapides. Notons qu'un secteur ne correspond pas ici à une cellule mais seulement à une direction d'émission privilégiée.

La distribution du  $C/I$  est représentée à la figure 4.2 lorsqu'on utilise un découpage en 8 sous-secteurs de chaque cellule. On constate une nette amélioration du  $C/I$  : le seuil à 5% est augmenté de 4,5 dB sur la voie descendante avec 4 éléments et approche les 9 dB. L'utilisation de 8 éléments améliore les performances mais peut poser des problèmes d'encombrement. Avec l'utilisation de la transmission discontinue et du contrôle de puissance

couplés avec le saut de fréquence, le seuil à 5% peut être portée à 10 dB sur les voies montantes et descendantes. Il est donc envisageable d'utiliser un motif à 3 avec des antennes adaptatives. L'intérêt de ce motif est de simplifier la planification car toutes les fréquences sont utilisées.



Motif à 3, pas de contrôle de puissance ni de transmission discontinue

Figure 4.2 : Influence du nombre d'éléments sur la voie descendante

Dans le cadre du projet Tsunami II on a étudié l'impact des antennes adaptatives sur la capacité du réseau. Ce travail a fait l'objet d'un mémoire de *diplomarbeit*. Les travaux ont été poursuivis ensuite dans le cadre d'un stage de DEA. J'ai approfondi personnellement ces travaux et en ai rédigé un rapport interne début 2000.

#### 4.1.3. Modélisation de la planification cellulaire

L'analyse des conditions de couverture et d'interférence est une des premières étapes de la planification cellulaire. A partir d'équation de propagation et d'un déploiement de station de base sur la zone de service, on peut prévoir le signal moyen reçu en un point venant d'une station de base  $j$ . Si le signal reçu est supérieur au seuil de couverture fixé par l'opérateur, le point est dans la zone de couverture de  $j$ . Si le signal reçu est supérieur à un seuil d'interférence, inférieur au seuil de couverture, le point considéré peut être brouillé par la station de base  $j$ . Pour toute station de base on peut déterminer la zone de couverture et la zone de brouillage.

Si l'intersection de la zone de couverture d'une station de base  $i$  et de la zone de brouillage d'une station de base  $j$  est non nulle, alors les deux stations de base ne peuvent réutiliser les mêmes fréquences. De la même façon si la zone de brouillage de  $i$  intersecte la zone de couverture de  $j$ , les fréquences affectées aux stations de base  $i$  et  $j$  doivent être différentes. Il est possible d'associer, à un déploiement donné, un graphe d'incompatibilité.

Les noeuds de ce graphe sont les stations de base du réseau, un arc relie deux stations de base si deux stations ne peuvent pas réutiliser les mêmes fréquences. L'allocation de fréquences aux stations de base se réduit alors à un problème de coloriage de graphe.

L'approche par graphe d'incompatibilité prend seulement en compte des couples de stations de base. Dans un réseau opérationnel, l'interférence subie est la somme des interférences provoquée par l'ensemble des stations de base qui réutilisent les mêmes fréquences. Dans la modélisation par graphe d'incompatibilité, on considère seulement une seule station de base interférente. Il est donc nécessaire d'inclure une marge sur le seuil C/I adopté.

Dans la thèse d'Alexander Bathelt [Bat 98], on propose d'utiliser un hypergraphe pour la modélisation des contraintes de réutilisation de fréquences. L'hypergraphe permet de prendre en compte plus finement les interférences en considérant plusieurs stations de base interférentes.

Le coloriage de graphe est un problème complexe. Il est sujet d'étude depuis de nombreuses années et sa résolution ne rentre pas dans le cadre de mes travaux. Nous nous sommes en revanche attachés à la détermination d'hyper-graphes d'incompatibilité à partir d'une analyse des interférences. Les travaux ont été faits dans le cadre d'un contrat avec TDF/C2R. Plusieurs modules logiciels ont été développés et ont été intégrés dans l'outil de planification de TDF/C2R. Une partie du travail a été également l'estimation de la qualité de service d'un réseau cellulaire non régulier sur le plan des interférences et du télétrafic.

## **4.2. Analyse de performances**

### *4.2.1. Réseaux hiérarchiques*

La densité très importante d'utilisateurs dans les centres urbains obligent les opérateurs à déployer des micro-cellules tout en gardant une couverture macro-cellulaire pour gérer les terminaux se déplaçant rapidement (utilisateurs dans leur véhicule). Les réseaux combinant micro-cellules et macro-cellules sont appelés réseaux hiérarchiques.

Dans le cadre de ma thèse, j'ai étudié les performances des réseaux cellulaires hiérarchiques à l'aide d'un modèle analytique et de simulations. Suivant les stratégies de transfert entre la couche macro cellulaire et la couche micro-cellulaire, les modèles analytiques s'appuient soit sur les processus de Poisson modulés par une chaîne de Markov ou sur les formes produits. Mon travail de thèse a donné lieu à des publications, y compris postérieurement à la soutenance [Lag 99a] [Lag 99b].

#### 4.2.2. Redirection d'appel et équité

Le recouvrement des cellules peut être exploité pour une meilleure répartition des communications dans le système. Lorsqu'un mobile se trouve dans une zone couverte par 2 stations de base ou plus, il choisit préférentiellement la station de base dont il reçoit le signal le plus fort. Si tous les canaux sont occupés dans la meilleure cellule, le réseau peut allouer un canal sur une autre station de base. Ce mécanisme est connu sous le nom de *directed retry*.

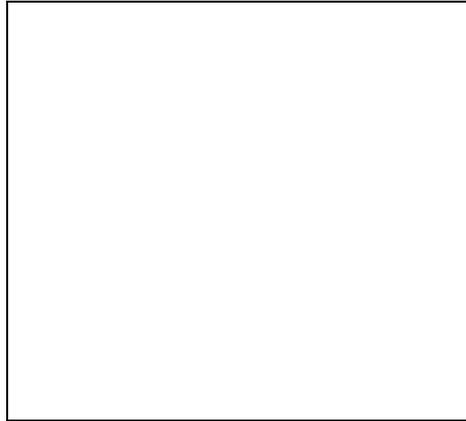


Figure 4.3. Couverture cellulaire avec recouvrement

Le mécanisme *directed retry* est un processus de débordement : on essaye d'allouer un canal sur une autre station de base que la meilleure, seulement lorsque tous les canaux sont occupés dans cette dernière. Un processus de débordement n'est pas un processus de Poisson. La loi d'Erlang ne s'applique plus pour calculer la probabilité de perte d'appel. Il est possible d'appliquer l'approximation de Wilkinson [Wilk 56] ou les processus de Poisson modulés. Les performances du *directed retry* sont étudiées dans [Ekl 86]. Les terminaux couverts par plus d'une station de base voient leur niveau de service amélioré tandis que les autres terminaux voient leur niveau de service se dégrader.

Une politique d'admission des appels permet d'équilibrer les niveaux de service sur les différentes zones [Lag 98]. On restreint le nombre de canaux auxquels peuvent accéder les mobiles dans la zone de recouvrement d'une valeur  $r$  : un appel fait dans la zone de recouvrement peut accéder à  $C-r$  canaux où  $C$  désigne le nombre de canaux par cellule ; un appel fait dans la zone propre à une seule station de base peut accéder à l'ensemble des canaux (i.e. les  $C$  canaux). Ce mécanisme reprend les principes des canaux de garde qui consiste à limiter le nombre de canaux accessibles aux nouveaux appels à  $C-g$  tout en autorisant  $C$  *handover*. Le paramètre  $g$  représente le nombre de canaux de garde et il est fixé par l'opérateur.

On considère un système hexagonal régulier, une durée moyenne des communications de 100 secondes (sans prendre en compte la mobilité) et 18 canaux dans chaque cellule, une durée de séjour des mobiles dans une cellule donnée de 67 secondes. On présente dans le tableau 4.4, les performances pour différentes configurations et pour une charge de référence de 10 Erlangs. On constate que la restriction des canaux sur la zone de recouvrement permet

d'équilibrer les probabilités d'échec d'appel dans les deux zones. De plus, pour une faible valeur de  $r$ , la probabilité moyenne d'échec et la probabilité d'échec de handover sont réduites.

$g$	$r$	<i>échec d'appel dans la zone de recouvrement</i>	<i>échec d'appel dans la zone propre à une cellule</i>	<i>échec moyen</i>	<i>échec de handover</i>
2	0	0,10 %	3,10 %	1,55 %	0,24 %
2	1	0,40 %	2,55 %	1,43 %	0,20 %
2	2	1,19 %	2,08 %	1,62 %	0,16 %
3	0	0,29 %	5,26 %	2,68 %	0,14 %
3	1	1,01 %	4,33 %	2,61 %	0,11 %
3	2	2,70 %	3,51 %	3,09 %	0,09 %

Figure 4.4. : Probabilités d'échec d'appel et de handover pour différentes configurations

Si on se fixe un seuil maximal de probabilité d'échec de handover de 0,2%, il est nécessaire de mettre 3 canaux de garde dans le cas normal mais seulement 2 canaux de garde avec une restriction de deux canaux. Dans le premier cas, la probabilité d'échec d'appel est de 2,7%, dans le second cas elle est réduite à 1,6%.

Dans la figure 4.5, on étudie un système à 30 canaux dans chaque cellule. On représente la charge maximale supportable pour une probabilité d'échec de nouvel appel de 2% en ajustant le nombre de canaux de garde pour garantir une probabilité d'interruption de communication (due aux échecs de handover) de moins de 0,2%. On introduit un paramètre d'équité qui est défini comme le rapport entre les probabilités d'échec d'appel dans les 2 zones. L'équité est maximale pour une restriction de 3 canaux. Cependant la charge est maximale lorsqu'on tolère une légère iniquité. On atteint alors 20 erlangs avec une restriction de 4 canaux et 4 canaux de garde. Sans aucune restriction, la charge est limitée à 18,9 erlangs. On profite d'un gain de 5% en capacité avec une meilleure équité entre les utilisateurs.



Figure 4.5. : Evolution de l'équité et de la capacité

### 4.3. Allocation dynamique de ressources

L'allocation de fréquences aux cellules dans les systèmes de deuxième génération est fixe. L'opérateur affecte à chaque cellule un nombre de fréquences qui détermine le nombre maximal de communications simultanées possibles dans la cellule. De tels systèmes s'accommodent mal d'une surcharge locale de trafic.

Les systèmes de troisième génération doivent s'adapter rapidement aux variations de trafic. Dans un contexte pico ou micro-cellulaire (par exemple un réseau d'entreprise local), cette variation peut être importante. Pour répondre aux contraintes de réactivité, nous avons proposé le concept de *bunch* ou bouquet de cellules. Ce concept a été étudié en interne à l'ENST en 1995-1996 [Dro 95] puis proposé dans le cadre du projet Frames à partir de 1997.

Il s'appuie sur l'exploitation des zones de recouvrement existant fréquemment dans un environnement pico et micro-cellulaire.

Dans les PABX sans fils, les réseaux locaux sans fil et les systèmes GSM, il y a un généralement un groupe de stations de base connectées à une unité centrale, souvent appelée BSC (*Base Station Controller*). Une telle architecture n'a pas été complétement exploitée du point de vue de l'allocation dynamique des ressources. Les systèmes actuels sont basés, soit sur des algorithmes de gestion de ressources totalement décentralisés (systèmes DECT), soit sur une planification fixe des fréquences effectuée par l'opérateur (cas du GSM).

Un *bunch* est un groupe de cellules dont les bornes radios sont commandées par une unité centrale et pour lesquelles l'allocation des ressources radio est contrôlée par cette unité

centrale. L'unité centrale joue le rôle de RNC, *Radio Network Controller*, défini dans la normalisation de l'UMTS. Les bornes radio peuvent être des stations de bases ou de simples émetteurs-récepteurs reliés par fibre optique à l'unité centrale. Elles sont appelées RAU, *Remote Antenna Units*. Un *bunch* peut être utilisé par exemple pour couvrir un étage, un centre commercial ou un ensemble de rues proches.

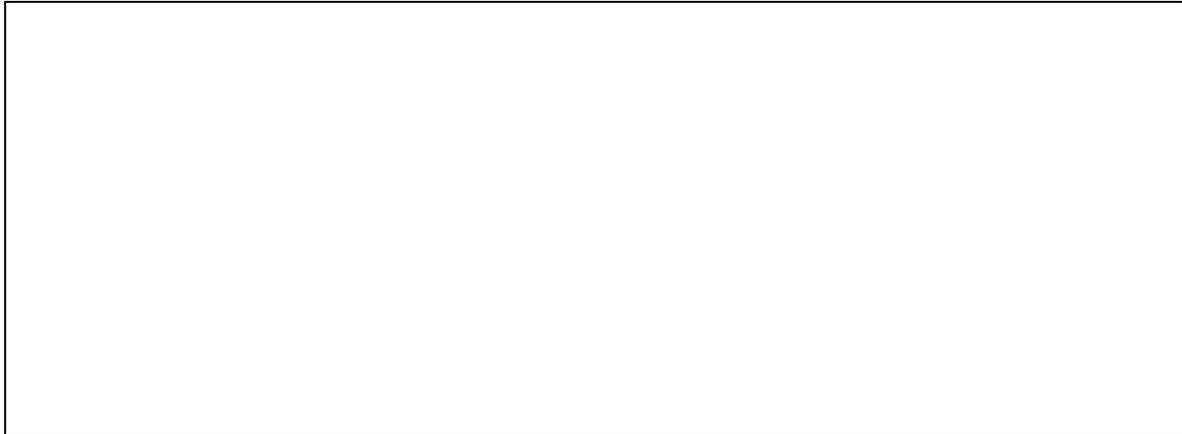


Figure 4.6.. Principe du bunch

Dans les systèmes classiques, la cellule est vue comme une entité. Cependant, les cellules se recouvrent largement, particulièrement dans les zones où il est nécessaire d'offrir un très bon niveau de couverture (zones urbaines denses, intérieurs des bâtiments). La planification cellulaire devient alors une tâche très ardue et il est préférable d'utiliser une allocation dynamique des ressources radio.

Nous avons essayé de tirer partie des recouvrements de cellules en définissant le concept de zone [DrL 95a]. Une zone est une partie de l'espace couverte de façon *homogène* par un ensemble de RAUs. Homogène signifie que toute la zone est couverte par le même nombre de RAUs. Il est possible d'affiner la définition d'une zone en considérant plusieurs niveaux de puissance [DrL 95a].

L'allocation de ressources est faite par l'unité centrale et s'appuie principalement sur trois matrices : une matrice de structure et deux matrices d'état des ressources.

La matrice de structure est une matrice de compatibilité  $Z \times N$  où  $Z$  est le nombre de zones et  $N$  est le nombre de RAUs du bunch. L'élément  $(z, n)$  indique si la zone  $z$  est couverte par la RAU  $n$ , interférée ou en dehors de toute influence. La matrice de structure peut être construite par le RNC à l'aide des mesures effectuées par les mobiles sur les niveaux reçus des voies balises et remontées vers le réseau.

La matrice d'état des ressources donne en fonction de la charge courante du réseau l'état de chaque ressource. Sur la liaison montante, la matrice est de dimension  $R \times N$  où  $R$  désigne le nombre de ressources radio disponibles dans le système. L'élément  $(r, n)$  indique si la ressource  $r$  peut être utilisée par le RAU  $n$ . Sur la liaison descendante, la matrice est de

dimension  $R \times Z$  où  $R$  désigne le nombre de ressources radio disponibles dans le système. L'élément  $(r,z)$  indique si la ressource  $r$  peut être utilisée sur la zone  $z$ .

L'allocation se fait suivant le principe de la meilleure compacité : on essaye d'allouer une ressource sur une zone donnée qui interfère des zones déjà brouillées en vérifiant que l'allocation ne brouille pas une communication en cours ou ne génère pas de brouillage sur la nouvelle communication.

Le concept de bunch s'applique à tout système ayant une composante TDMA. Dans un système FDMA/TDMA, une ressource radio est un intervalle de temps (*slot*) sur une fréquence. Dans un système FDMA/TDMA/CDMA, une ressource radio est un code pendant un intervalle de temps sur une fréquence.

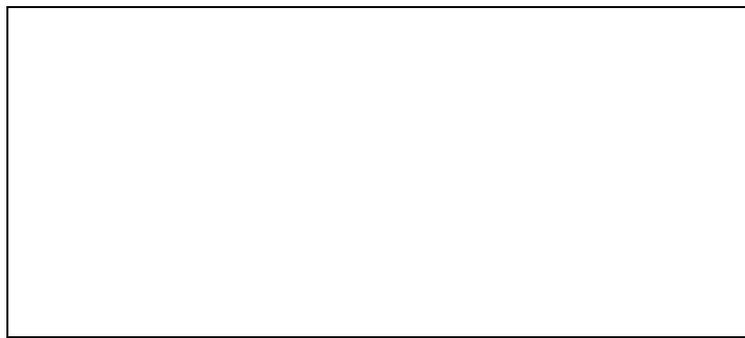


Figure 4.7. Matrice de ressource dans un système TDMA/CDMA

Dans le cadre du projet Frames, les études ont porté sur les performances du bunch dans un environnement Manhattan, pour des sources de trafic mêlant voix et données. On a d'abord considéré un système TDMA pur puis un système TDMA/CDMA. On a de plus comparé les différentes stratégies de gestion de ressource pour des services qui requièrent plus d'une ressource radio : utilisation de plusieurs codes sur le même intervalle de temps ou utilisation de plusieurs intervalles de temps.

#### *Performance du bunch pour un système TDMA*

Sur la figure 4.8, on compare dans un système à allocation de circuit les performances de l'allocation dynamique dans un bunch à celle de l'allocation fixe de fréquences. Les simulations sont faites dans une configuration de rues orthogonales (modèle de Manhattan) avec des stations de base dans les rues. On considère un motif de réutilisation de taille 6 qui donne un C/I seuil à 10% de 10 dB. Ce seuil est utilisé comme minimum à respecter pour allouer une ressource dans l'algorithme d'allocation dynamique. Le nombre total de canaux est fixé à 50. L'allocation dynamique permet d'augmenter sensiblement les performances du système et d'atteindre 5,5 erlangs à 2% de blocage contre 4,3 erlangs en allocation fixe.

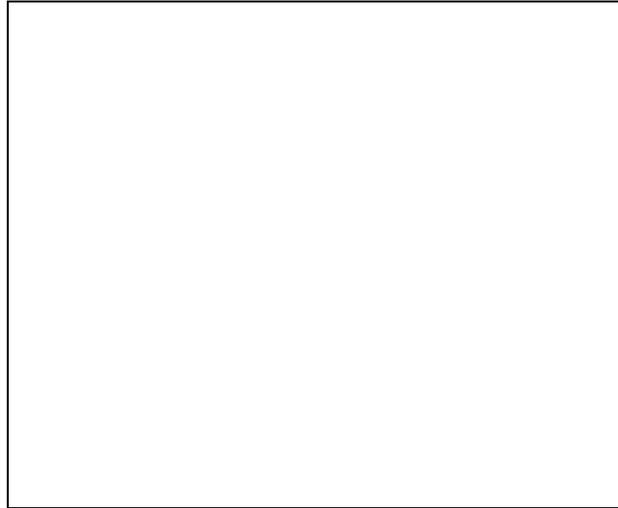


Figure 4.8. Performances de l'allocation dynamique dans un bunch

#### *Performance du bunch pour un système CDMA*

Dans le cadre de l'UMTS, certains services nécessiteront des débits élevés et vont requérir des circuits multi-ressources. Il est possible d'allouer plusieurs codes à un même utilisateur pendant le même intervalle de temps ou bien plusieurs intervalles de temps avec le même code.

On prend l'hypothèse d'une détection conjointe des utilisateurs transmettant dans le même intervalle de temps et dans la même cellule. On considère donc que l'interférence n'est due qu'aux transmissions dans les cellules voisines. Le  $C/I$  ne prend en compte que l'interférence externe. Pour maximiser le  $C/I$ , il est donc préférable de répartir les transmissions sur l'ensemble des intervalles de temps, c'est-à-dire de choisir une allocation multi-slot plutôt que multi-code. Cependant, lorsqu'un intervalle de temps est utilisé par un RAU, il ne peut être utilisé par les RAUs voisins car l'interférence est trop importante et la détection conjointe n'est pas possible. Pour minimiser la probabilité de blocage, il est préférable d'utiliser une allocation multicode.

Dans le cadre du projet FRAMES, on a étudié les performances de l'algorithme dans différentes configurations. On a par exemple considéré des services mixtes : données (par exemple une session web) et voix. Le premier type est géré suivant une allocation par paquets, le second est géré en mode circuit. On considère un seuil  $C/I$  de  $-6$  dB [ScH98] pour les données. On suppose que les demandes sont également réparties entre communications vocales et sessions web ; il y a 0,13 appels par seconde et par RAU de chaque type. Pour éviter une accumulation des paquets dans les files d'attente, on élimine tout paquet en attente de transmission par manque de ressource pendant plus de 200 ms.

La répartition du  $C/I$  est montrée dans la figure 4.9. On remarque que les services de données (allocation en mode paquet) ont un  $C/I$  plus faible que les services de voix (allocation en mode circuit). En effet, dans le premier cas, l'allocation est beaucoup plus fréquente.

Comme l'algorithme d'allocation est conçu pour réutiliser au maximum la même ressource, l'interférence est plus importante pour les données.

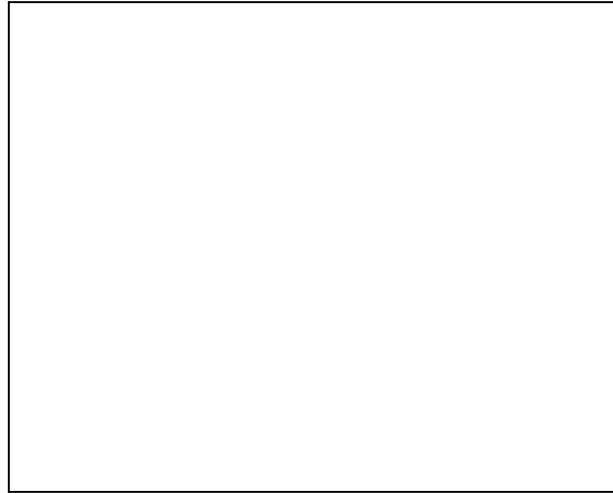


Figure 4.9. Performance de l'allocation avec des services circuits et paquets

Les performances du *bunch* et de l'allocation de ressources ont été étudiés pour diverses configurations dans le cadre du projet Frames. Les dernières études, non encore publiées, portent sur l'exploitation du duplexage temporel (TDD) et les performances lorsque les intervalles de temps sont utilisés indifféremment dans le sens montant et le sens descendant. Ce concept est limité aux systèmes TDMA. L'évolution de la normalisation marginalise la solution CDMA/TDMA de l'UMTS. L'accent est mis sur un système CDMA pur. J'ai donc ré-orienté mes recherches dans cette direction.

#### 4.4. Gestion multi-service dans les réseaux CDMA

Dans le cadre de la thèse de Claudiu Mihailescu, nous avons étudié la gestion de la puissance d'une station de base qui transmet simultanément à différents utilisateurs. Le principe et les résultats principaux sont expliqués dans le paragraphe 3.3. Cette étude a été publiée dans [MLG 99].

#### 4.5. Etude du soft-handover dans les réseaux CDMA

Une des caractéristiques essentielles des systèmes CDMA est la possibilité du *soft handover* : un mobile peut être en connexion simultanée avec plusieurs stations de base différentes. Il transmet un signal unique qui est reçu par les stations de base et combiné au sein du sous-réseau d'accès (par exemple le BSC ou le RNC). Les stations de base transmettent chacune un signal. Les différents signaux sont combinés par le récepteur du mobile (*maximum ratio combining*). Un exemple est donné à la figure 4.10. Soient  $C_1$  et  $C_2$  les signaux reçus respectivement des stations de base 1 et 2 et  $I_1$  et  $I_2$  l'interférence s'appliquant à ses signaux, le  $C/I$  global à considérer pour le récepteur mobile est

$$C/I = C_1/I_1 + C_2/I_2. \quad (4.2)$$

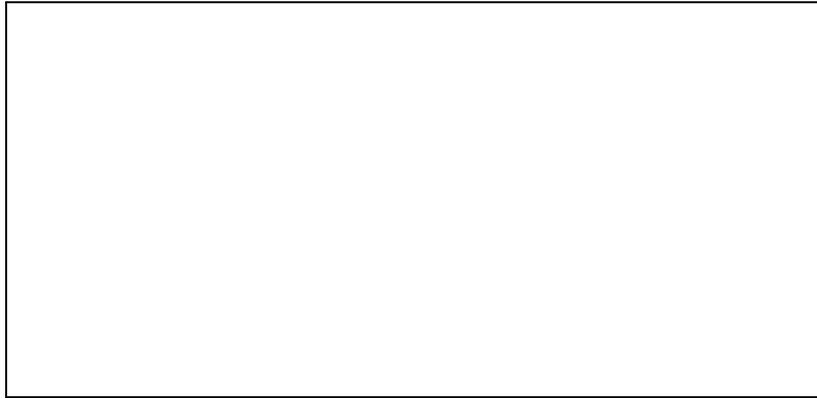


Figure 4.10. Principe du soft-handover

Le soft-handover permet d'améliorer le  $C/I$ . Cependant, il augmente la puissance totale consommée dans le système. Si on considère une puissance maximale sur chaque station de base, le soft-handover appliqué à un utilisateur réduit la puissance disponible pour les autres utilisateurs.

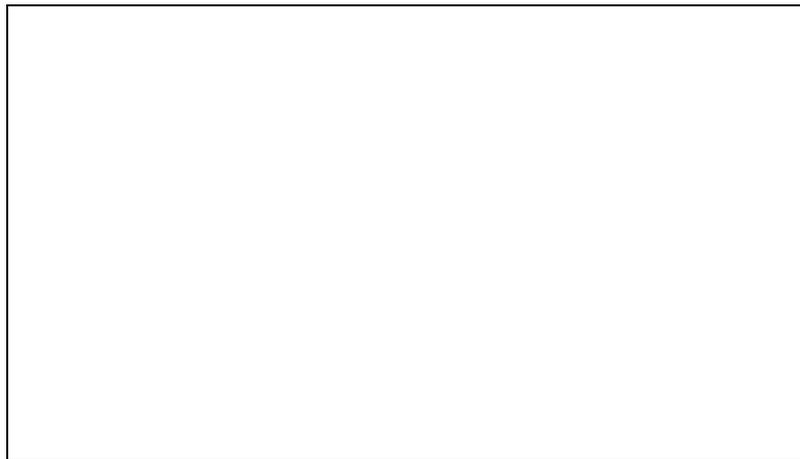


Figure 4.11. Zone de soft-handover

L'étude considère un réseau régulier de cellules hexagonales, une propagation régulière mais qui prend en compte l'effet de masque sous la forme d'un facteur aléatoire log-normal. On étudie la zone formée par un losange entre les stations de base BS0 et BS1 comme indiqué dans la figure 4.11. On suppose que seuls les mobiles dans ce losange peuvent être connectés à BS0 et BS1. Un mobile est connecté à une seule station si la puissance reçue de cette station dépasse les niveaux reçus de toutes les autres avec une marge  $M_{SH}$  qui représente la marge de soft-handover. En revanche, si un mobile reçoit deux stations avec des niveaux dont la différence est inférieure à  $M_{SH}$ , il sera « mis en *soft-handover* ». La probabilité pour un mobile dans le losange de référence d'être connecté à la fois aux stations de base 0 et 1 peut s'écrire sous la forme

$$p_{0,1} = \Pr(P_{r1} - M_{SH} < P_{r0} < P_{r1} + M_{SH}) \quad (4.3)$$

où  $P_{r0}$  et  $P_{r1}$  désignent les puissances reçues des stations de base 0 et 1 respectivement.

Du fait de l'effet de masque, les puissances reçues ne sont pas fonctions uniquement de la distance. Il est possible de calculer la probabilité  $p_{0,1}$  :

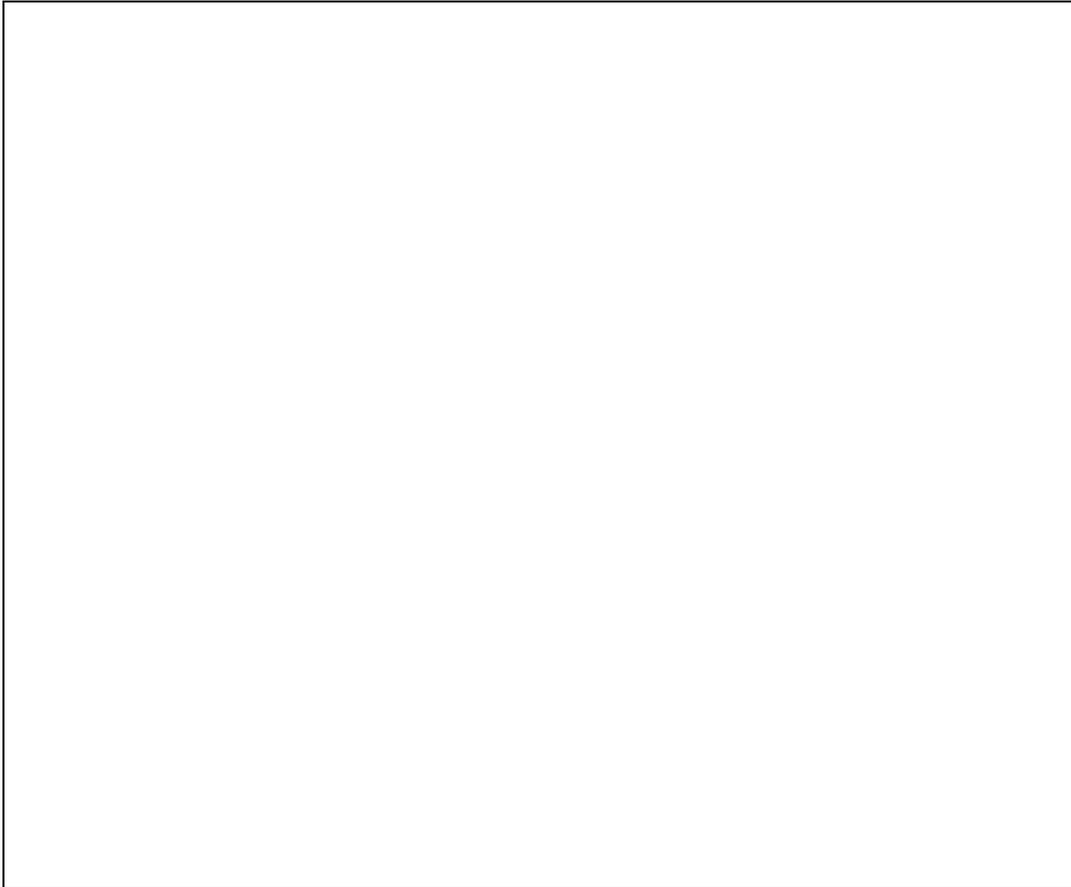
$$p_{0,1} = Q\left(\frac{10\gamma \log(r_{0,0}/r_{0,1}) - M_{SH}}{\sigma}\right) - Q\left(\frac{10\gamma \log(r_{0,0}/r_{0,1}) + M_{SH}}{\sigma}\right). \quad (4.4)$$

où  $Q$  est défini par :

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du$$

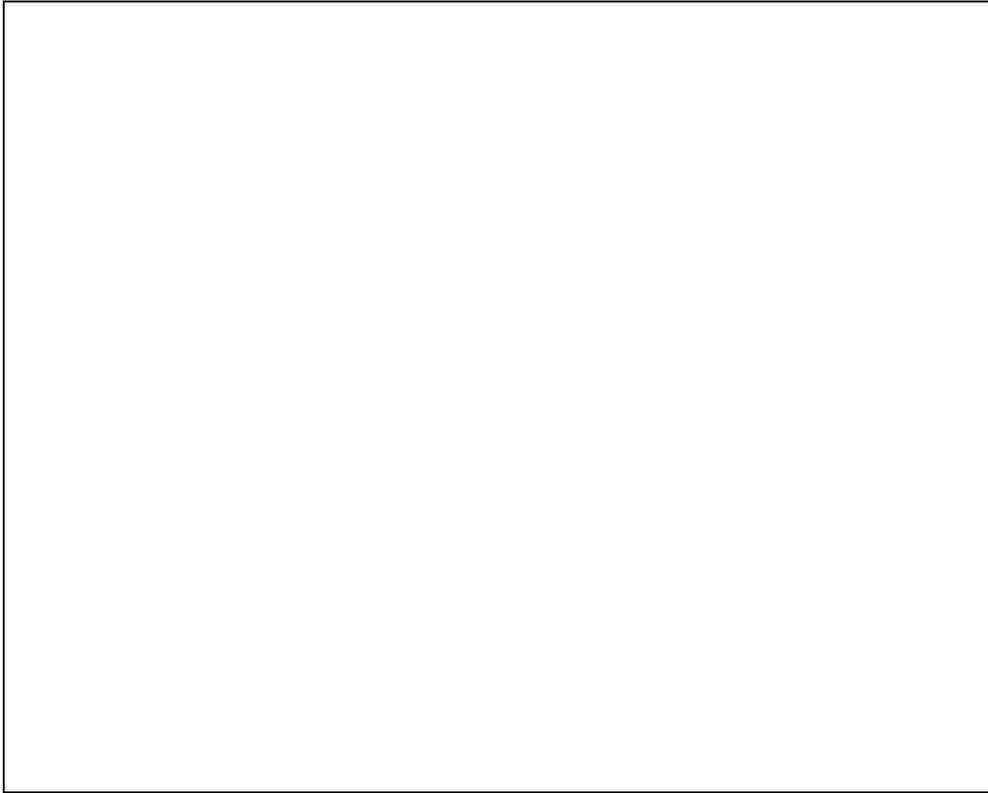
Il est possible de calculer en intégrant l'équation (4.3) le nombre moyen de mobiles en soft-handover. A partir d'une densité d'abonné fixé, le nombre de mobiles par station de base est connu. En supposant la puissance répartie uniformément entre les utilisateurs, on peut alors faire une étude d'interférence. Celle-ci se décompose en une interférence intra-cellulaire et une interférence extra-cellulaire. Le premier terme provient d'un défaut d'orthogonalité apporté par les trajets multiples, le second terme est dû, comme dans tout réseau cellulaire, à la réutilisation des fréquences sur les cellules voisines (calcul détaillé dans [Mih 00]).

Dans la figure 4.12, on représente le C/I pour un mobile sur la droite (BS0,BS1) en fonction de sa distance à la station de base BS0. On considère un facteur d'orthogonalité de 0,06 et 100 utilisateurs par unité de surface en supposant des cellules de rayon unitaire. Le C/I le plus bas est toujours obtenu pour un mobile à mi-distance des deux stations de base. La valeur  $M_{SH}=0$  correspond à du hard-handover. Le C/I minimum est alors de 4,5 dB. Il monte à plus de 7,5 dB pour une marge de 4 dB mais redescend à 5,5 dB pour une marge de 10 dB. Il n'est pas judicieux, en terme de bilan de puissance, d'avoir trop de mobiles en soft-handover. Toutefois, dans cette étude, nous avons supposé que le mobile est connecté toujours sur la meilleure station de base. Cette hypothèse n'est pas réaliste en cas de hard-handover car, pour éviter les effets ping-pong, il est nécessaire d'inclure des hystérésis qui conduisent à avoir des mobiles non connectés à la meilleure station de base. Le gain apporté par le soft-handover est donc légèrement sous-estimé dans cette étude.



*Figure 4.12. Variation du C/I en fonction de la distance à la station de base*

Dans la figure 4.13, on représente le C/I d'un mobile à mi-distance entre BS0 et BS1 (pire cas) pour différentes charges et en fonction de la marge de soft-handover. Toutes les courbes présentent un maximum. Plus la charge est importante, plus le maximum est obtenu pour une faible valeur de  $M_{SH}$ . D'après la figure, il semble peu judicieux de prendre une marge supérieure à 5dB.



Le paramètre  $\rho$  désigne le nombre d'utilisateur par unité de surface (1 hexagone = 2,6 unités de surface)

*Figure 4.13. Variation du C/I pour un mobile à mi-distance de 2 stations de base en fonction de la densité d'utilisateurs et de la marge de handover*



## 5. Publications

### 5.1. Ouvrages

Je suis premier co-auteur d'un livre sur le GSM. Cet ouvrage a donné lieu à 4 éditions en 5 ans. J'ai entièrement rédigé les chapitres 2 à 4, 6, 9 et 11 à 14 et participé à l'écriture des autres chapitres (sauf le chapitre 7). Au 1er janvier 2000, environ 8 000 exemplaires ont été vendus.

1. X. Lagrange, Ph. Godlewski et S. Tabbane, *Réseaux GSM-DCS*, Hermès, Paris, 1995, 1996, 1997, 1999 (quatrième édition revue et augmentée).

Le polycopié réalisé dans le cadre du cours de base des réseaux à l'ENST a donné lieu à la publication d'un livre avec Dominique Seret. J'en ai assumé la maîtrise d'œuvre.

2. X. Lagrange, D. Seret, *Introduction aux réseaux*, Collection pédagogique de télécommunications, Hermès, Paris, 1998.

### 5.2. Ouvrages coordonnés

Le congrès MMT'96 a donné lieu à la publication des actes sous forme de livre éditée par Kluwer. D'autre part, j'assume la coordination de deux ouvrages dans le domaine Réseaux et télécoms de la collection « Information, Commande, Communication ». Le premier tome paraît en mars 2000. J'y ai écrit 3 chapitres. Le second tome sur l'UMTS est en préparation.

1. Bijan Jabbari, Philippe Godlewski, Xavier Lagrange (Editors), *Multiaccess, Mobility and Teletraffic for Personal Communications*, Kluwer Academic 1996.
2. Xavier Lagrange (coordinateur), *Mise en œuvre des réseaux radiomobiles*, Hermès Science, parution en mars 2000.

### 5.3. Revues internationales

1. X. Lagrange, "Multi-tier Cell Design," *IEEE Communications Magazine*, Vol 35, n°8, pp. 60-64, 1997 (copie de l'article en A1.1).
2. X. Lagrange, B. Jabbari, "Admission Policy in Wireless Systems with Overlapping Coverage" in *Multiaccess, Mobility and Teletraffic*, D. Everitt, M. Rumsewicz Eds. (Kluwer Academic Publisher, 1997), pp. 315-326.
3. X. Lagrange, B. Jabbari, "Fairness in Wireless Microcellular Networks" in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol 47, n°2, May 1998 (copie de l'article en A1.3).

4. X. Lagrange, "Teletraffic analysis of reversible hierarchical cellular networks" in *Multiaccess, Mobility and Teletraffic, Vol 3*, K. Leung and B. Vojcic (Editors), Kluwer Academic Publisher, 1999 (copie de l'article en A1.2).
5. C. Mihailescu, X. Lagrange, P. Godlewski, "Resource Allocation for Integrated Voice/WWW Traffic in UMTS/TDD Systems" in *Multiaccess, Mobility and Teletraffic, Vol 4*, E. Biglieri, L. Fratta and B. Jabbari (Editors), Kluwer Academic Publisher, 1999 (copie de l'article en A1.4).

#### **5.4. Congrès internationaux avec actes**

1. X. Lagrange, P. Godlewski, "Autonomous inter Base Station synchronisation via a common broadcast control channel", in *Proceedings 44th IEEE Vehicular Technology Conference*, Stockholm, Sweden, June 1994.
2. Ulrich Dropmann, Xavier Lagrange, Philippe Godlewski, "Modeling of Resources for a Third Generation Cellular Communication System: An Object Oriented Approach", *Proceedings IEEE International Conference on Universal Personal Communications*, San Diego, CA, USA, 27.9.-1.10.1994, pp 382 - 386
3. X. Lagrange, P. Godlewski, "Teletraffic analysis of a hierarchical cellular network," *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference*, Chicago, USA, 1995,
4. U. Dropmann, X. Lagrange, P. Godlewski, "Fine-Localization in a Multicell Centralised Packet Access System", in *Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Toronto, Canada, September 1995.
5. X. Lagrange, P. Godlewski, "Performance of a Hierarchical Cellular Network with Mobility-Dependent Hand-Over Strategies," *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference*, Atlanta, 1996, p. 1868-1872.
6. C. Mihailescu, X. Lagrange, D. Zeghlache, "Analysis of a Two-Layer Cellular Mobile Communication System", *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, Arizona, USA, 1997, pp. 954-959.
7. A. Bathelt, X. Lagrange, P. Godlewski, "Teletraffic Analysis in a Cellular System with Guard Channels and Two Classes of Users," *Proceedings of the European Personal Mobile Communication Conference*, Bonn, 1997.
8. C. Mihailescu, X. Lagrange, Ph. Godlewski, "Dynamic Resource Allocation in Locally Centralized Cellular Systems", *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, Ottawa, Canada, 1998, pp. 1695-1700.
9. C. Mihailescu, X. Lagrange, Ph. Godlewski, "Locally Centralized Dynamic Resource Allocation Algorithm for the UMTS in Manhattan Environment", in *Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Boston, USA, 1998.

10. X. Lagrange, "Performance of reversible and non reversible hierarchical cellular networks", *Proceedings of the 3rd European Personal Mobile Communications Conference*, Paris, France, Mars 1999.
11. C. Mihailescu, X. Lagrange, Ph. Godlewski, "Dynamic Resource Allocation for UMTS TDD TD-CDMA Systems", *Proceedings of the 3rd European Personal Mobile Communications Conference*, Paris, France, Mars 1999 pp. 179-184.
12. C. Mihailescu, X. Lagrange, Ph. Godlewski, "Dynamic Resource Allocation for Packet Transmission in UMTS TDD TD-CDMA Systems", *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, Houston, USA, May 1999 pp. 1695-1670.
13. C. Mihailescu, X. Lagrange, Ph. Godlewski, "Radio Resource Management for Packet Transmission in UMTS WCDMA Systems", *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, Amsterdam, The Netherlands, Sept. 1999, pp. 573-577 (copie de l'article en A1.5).
14. C. Mihailescu, X. Lagrange, Ph. Godlewski, "Soft Handover Analysis in Downlink UMTS WCDMA Systems", *IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications*, San Diego, USA, Nov. 1999 (copie de l'article en A1.6).

## 5.5. Congrès avec diffusion restreinte

1. X. Lagrange, P. Godlewski, "Control channel structures in a third generation ATDMA system" in *Proceedings RACE Mobile Telecommunications Workshop*, Amsterdam, The Netherlands, May 1994.
2. P. Godlewski, X. Lagrange, "A Hybrid Error Control Scheme for Short Block Transmission" in *Proceedings RACE Mobile Telecommunications Workshop*, Amsterdam, The Netherlands, May 1994.
3. U. Dropmann, Xavier Lagrange, "Slot allocation schemes for voice and data services in a radio-mobile packet access system", in *Second IEEE Communications an Vehicular Technology Symposium in the Benelux*, Louvain-la-Neuve, Belgium, November 2-3, 1994.
4. U. Dropmann, C. Lamare, X. Lagrange, P. Godlewski, "Dynamic Channel Allocation for a Micro- and Picocellular System with Overlapping Coverage", in *2nd ITG-Fachtagung Mobile Kommunikation*, Neu Ulm, Germany, September 1995
5. J.-M. Traynard, et al.(dont X. Lagrange), "Radio Resource Management Algorithms and Interactions with RLC/MAC Protocols for Frames Multiple Access Scheme," *Proceedings of the ACTS Mobile Telecommunications Summit*, Aalborg, 1997, vol. 2, p. 684-689.

6. X. Lagrange, "Analysis of hierarchical cellular networks" in *the proceedings of the First International Workshop On Mobile and Wireless Communications Networks*, (MWCN'97), Paris, 1997, pp. 197-202.

## **5.6. Rapports internes**

X. Lagrange, P. Godlewski, "Etude de performance d'un réseau cellulaire hiérarchique" (Teletraffic analysis of a hierarchical cellular network), rapport interne ENST 95D01, Paris, 1995.

X. Lagrange, "Etude de performance d'un réseau cellulaire hiérarchique avec réversibilité" (Teletraffic analysis of a hierarchical cellular network with reversibility), rapport interne ENST 96D10, Paris, 1996.

X. Lagrange, J. Schwarplies, "Use of smart antennas in GSM/DCS 1800", rapport interne ENST 97D004, Paris, 1997.

X. Lagrange, "Distribution du rapport signal-interférence dans un réseau cellulaire régulier" (Cumulative distribution of the Carrier-to-Interference ratio in regular cellular networks), rapport interne ENST 2000D001, Paris, 2000.

## 6. Encadrement

### 6.1. Thèses

U. Dropmann - « Allocation de ressources dans des systèmes radiomobiles à réservation par paquets », Thèse ENST (96E012), soutenue le 23 mai 1996. Jury : B. Jabbari, M. Frullone, A. Levy, S. Tabbane, P. Godlewski, X. Lagrange, R. Mathar.

A. Bathelt - « Modèles graphiques pour l'analyse et la planification de réseaux radiomobiles », Thèse ENST (98E005) soutenue le 14 mai 1998. Jury : P. Kühn, A. Levy, S. Tabbane, B. Jabbari, X. Lagrange, J. Rodriguez Guisantes, W. Sami, P. Godlewski.

C. Mihailescu, « Gestion des ressources radio pour les systèmes radio-mobiles de troisième génération », soutenue le 17 mars 2000. Jury : B. Jabbari, J. Zander, S. Tabbane, D. Fauconnier, D. Zeglache, P. Godlewski, X. Lagrange.

### 6.2. Thèse professionnelle de mastère de l'ENST

- Directeur de la thèse professionnelle de Mr Dan Rusu (1996) sur la « réalisation d'un outil pédagogique mettant en évidence le fonctionnement de l'interface radio GSM ».
- Directeur de la thèse professionnelle de Mr Jaroslaw Kulacz (1997) sur les « caractéristiques et performances des systèmes de boucle locale radio ».

### 6.3. Mémoires de DEA

- Encadrant du stage de Claudiu Mihailescu (1997) sur les « réseaux cellulaires hiérarchiques »
- Encadrant du stage de Samir Azza (1999) sur les « performances d'un Aloha avec capture pour le relevé de compteurs » (dans le cadre d'un contrat industriel).
- Encadrant du stage de Rosana Elizalde (1999) sur « l'utilisation des antennes adaptatives dans les réseaux radiomobiles ».

### 6.4. Mémoires de *Diplomarbeit*

J'ai encadré des mémoire de fin d'étude d'étudiants allemands effectuant un stage de 6 mois à l'ENST (équivalent d'un mémoire de *Master of Science*). Leurs rapports de stage ont été publiés comme rapport interne :

- Christian Lamare, *Performance evaluation od dynamic channel allocation and admission control in picocellular networks*, (rapport interne ENST 95D010 ), 1995
- Jochen Schwarplies (et X. Lagrange), *Use of smart antennas in GSM/DCS 1800*, (rapport interne ENST 97D004), 1997.

## 7. Activités d'enseignement

Cette partie décrit sommairement le contenu des différents cours que je donne, en premier lieu les cours ayant trait à mon domaine de spécialité, les réseaux radiomobiles, en deuxième lieu les cours généralistes sur les réseaux.

### 7.1. Formation initiale ENST

#### 7.1.1. Troisième année et mastère

##### *MRR : Mise en œuvre des Réseaux Radiomobiles*

Le module MRR créé en 1995 a pour objet de faire assimiler aux étudiants les concepts de déploiement d'un réseau cellulaire en s'appuyant au maximum sur des exercices et des exemples. La partie centrale en est une étude de cas, proposée en collaboration avec Monsieur Bernard Fino, professeur au CNAM. Les étudiants répondent à un appel d'offre réel et doivent soumettre une réponse intégrant les aspects techniques, financiers et le suivi du projet. Ils sont mis dans des conditions proches du travail au sein d'une entreprise.

Le module MRR s'étend sur 8 demi-journées. J'assure directement 75% de ce volume horaire :

- Planification cellulaire théorique,
- Introduction à l'ingénierie radio (méthodologie, bilan de liaison),
- Etude de cas sur un appel d'offre de réseaux d'entreprise radios,
- Planification de réseaux cellulaires non réguliers,
- Modélisation du trafic avec prise en compte de la mobilité,
- Bureau d'étude : dimensionnement d'un système GSM,
- Le déploiement du sous-réseau fixe de GSM.

##### *RMOB : Réseau Radiomobile*

Je participe avec Philippe Godlewski à l'enseignement du module RMOB depuis sa création en 1992. J'assure les conférences suivantes :

- Services et architecture de GSM
- Procédures d'accès dans le sous-réseau radio GSM
- Présentation des réseaux radio privés.
- Système IS-95

### *Mastère Radiomobile*

J'ai participé avec Philippe Godlewski au montage du mastère radiomobile en 1993. J'interviens pour diverses conférences données spécifiquement aux mastères (architectures des réseaux privés, signalisation sémaphore pour les mobiles).

Le programme du premier trimestre du mastère comporte une part importante dédiée au projet. J'encadre plusieurs binômes d'étudiant sur ces projets.

#### *7.1.2. Deuxième année*

J'ai mis en place un module dans le cadre de la dominante réseau destinée aux élèves suivant le cursus Eurécom (école commune à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et l'ENST). Ce module appelé PCB, protocole couches basses, est axé sur les réseaux locaux et leur interconnexion. Il s'étend sur 6 demi-journées et comprend les points suivants :

- Rappels sur l'architecture en couches : cas général, cas des LAN (*Local Area Networks*)
- Techniques de partages du support de transmission (Aloha, CSMA, jeton,...)
- Les réseaux locaux de type CSMA/CD (IEEE 802.3)
- L'anneau à jeton (IEEE 802.5)
- Principes des codes cycliques
- Interconnexion de réseaux (pont, routeur)
- Protocoles réseaux X25 et IP.

#### *7.1.3. Bases de connaissance indispensables*

L'enseignement du domaine des réseaux à l'ENST comprend un tronc commun appelé Base de Connaissances Indispensables. La définition du contenu a été réalisée en 1992 après une concertation au sein du département Réseaux de l'époque, à laquelle j'ai largement participé. Ce contenu a été révisé en 1998. J'assure depuis 1992, la coordination et la quasi-totalité des cours dans cette BCI (8 demi-journées avant 1998, 10 demi-journées depuis 1998) pour les élèves titulaires de maîtrise qui rentrent sur dossier à l'ENST (entre 50 et 70 étudiants).

- Introduction aux réseaux (services, historiques, types de réseaux, notion de qualité de service)
- Le circuit de données
- Les protocoles de liaisons de données
- Les concepts généraux des réseaux
- Un exemple d'accès au réseau, le protocole X25
- Le modèle de référence à sept couches

- Les réseaux locaux d'entreprise et leur interconnexion
- Introduction à Internet
- Le Réseau Téléphonique Commuté (commutation de circuits, réseau de distribution)
- L'offre de télécommunications en France
- Etude de cas sur l'exemple du réseau européen d'Europcar
- Evolution des réseaux vers le haut-débit
- Introduction aux files d'attente.

## 7.2. Formation continue

Une partie importante de mes activités est dédiée à la formation continue. Depuis 1992, date de mon arrivée à l'ENST, le nombre de sessions sur les réseaux radiomobiles a régulièrement augmenté, tant les sessions catalogues inter-entreprises que les sessions montées spécifiquement pour une entreprise donnée.

### 7.2.1. Sessions catalogue

J'ai mis en place depuis 1993, trois nouvelles sessions de 2 à 4 jours :

- 1993 : création de la session *la norme GSM* (2 sessions par an sur 3 jours, étendues à 4 jours en 1995)
- 1998 : création de la session *planification et dimensionnement des réseaux radio-mobiles* (1 session par an de 2 jours)
- 1999 : création de la session *du GSM à l'UMTS* (2 sessions par an de 2 jours)

J'effectue directement un peu plus de 40% des cours de chaque session. Les attentes et les centres d'intérêt du public de formation continue sont différents de ceux des élèves. J'ai donc été amené à développer, en grande partie, des supports de cours spécifiques aux sessions de formation continue.

Je donne des conférences régulièrement dans les sessions coordonnées par P. Godlewski : *Systèmes radio-numériques cellulaires* (depuis 1992) et *Boucle locale radio* (depuis 1998).

### 7.2.2. Sessions sur mesure

Je suis amené à organiser des formations sur mesure pour des entreprises intervenant dans les domaines des systèmes radiomobiles. Depuis 1998, les demandes sont de plus en plus nombreuses en ce qui concerne le GSM. Pour ce type de session, j'assure environ 70% des cours. Les sessions, classées par thèmes et par ordre chronologique depuis 1995, sont les suivantes :

- Cellulaire numérique : JS Telecom (7 au 10 mars 95), TRT (26 au 29 septembre 95), Alcatel-CIT (10 et 11 septembre 96), Alcatel (25 au 27 novembre 96).
- GSM : Philips Le Mans (10 et 11 avril 95 et 9 au 10 avril 1997), Alcatel CIT (9 et 10 janvier 1996), Sagem (4 au 3 mars 1996), Motorola Toulouse (11 au 15 mars 96), Philips Cartes et Systèmes (28 au 30 octobre 1997), Cap Gemini (6 au 9 juillet 1998), Alcatel Business System (17 décembre 1998 et 9 décembre 1999), Schlumberger (11 au 14 janvier 1999 et 16 au 19 février 1999), Sagem Cergy (5 au 7 juillet 1999), IBM La Gaude (15 et 16 septembre 1999), Cap Gemini (18 et 19 janvier 2000)
- GSM GPRS : IBM La Gaude (24 septembre 1999), Cap Gemini (20 janvier 2000)
- Réseaux radio d'entreprise : Société TSA (Suisse) (2 mars 1999)
- UMTS : CGTI (Conseil Général des Technologies de l'Information) (15 avril 1998), journée de formation hors catalogue (octobre 1998)

### 7.2.3. *Consultance*

J'effectue, pour le compte de l'ENST, de la consultance dans le domaine des réseaux radiomobiles. Dans ce cadre j'ai expertisé un brevet sur la numérotation téléphonique dans les mobiles pour la société Sambar International en 1998. J'ai également conseillé Alcatel Research Center sur l'UMTS et plus particulièrement sur la simulation d'un réseau CDMA et les modèles de trafic.

## 8. Activités annexes

### 8.1. Organisation de congrès

En 1996, j'ai organisé le colloque MMT, *Multiaccess, Mobility and Teletraffic for Personal Communications*, qui s'est déroulé les 20-22 mai. Ce colloque, sous la présidence du professeur Bijan Jabbari de George Mason University, avait pour objectif d'identifier, de présenter et de discuter les questions majeures tant théoriques que pratiques liées à la conception et au déploiement des différents types de réseaux radiomobiles : micro-cellulaires, macro-cellulaires, satellites ou de données. Il a rassemblé de nombreux chercheurs du domaine des réseaux et des communications mobiles et notamment R. Gallager (MIT, Cambridge USA), N. Abramson (ALOHA Networks, San Francisco, CA, USA), R. Pickholtz (Georges Washington University, W.DC), J. L. Massey (ETH, Zurich, Suisse).

### 8.2. Tutoriels Invités

Dans le cadre de conférences, j'ai été invité à donner des tutoriels :

- "Panorama des technologies utilisables dans les bandes de fréquences 3,4-3,6 GHz et 27,5-29,5 GHz", *Séminaire IIR sur la boucle locale*, 13 octobre 1998.
- "Les évolutions du GSM en terme de réseau et de services", *Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP)*, 26 avril 1999.
- "GSM et ses évolutions", 13ème Congrès DNAC : *De Nouvelles Architectures pour les Communications*, 29 novembre 1999.

### 8.3. Supports pédagogiques hypermédia

Le CRIPT (Centre de Ressources en Innovation Pédagogique et Technologie) est né de la volonté des écoles du GET (Groupement des Ecoles des Télécommunications) de développer une expertise commune quant à l'usage et la pratique des technologies de l'information et de la communication dans l'enseignement. Dans ce cadre, un cédérom sur le réseau GSM est en cours de développement. Ce cédérom comporte un ensemble d'articles-liens détaillant les mécanismes mis en œuvre pour répondre à des problèmes (par exemple, la gestion de la mobilité des usagers qui n'existe pas dans un réseau téléphonique) et une étude de cas.

J'ai participé activement à la définition du contenu et de l'organisation du cédérom GSM, en particulier de l'étude de cas ; celle-ci a pour objet de mettre l'élève dans le rôle d'un opérateur GSM qui déploie un réseau et qui doit choisir les paramètres du réseau : densité de station de base, puissances de transmission, types d'antennes utilisées, etc. J'assume la

maîtrise d'œuvre du développement de 9 articles-liens (sur 53) dans le cadre de projets d'élèves.

Pour la formation continue et la formation initiale, j'ai développé un outil pédagogique permettant de visualiser les échanges sur l'interface radio GSM entre un mobile et le réseau. Cet outil est développé sur PC. Il a vocation à s'interfacer avec un terminal de trace de type Orbitel ou Sagem mais peut être utilisé en autonome sur des traces pré-enregistrées. Il permet de mettre en évidence :

- les échanges au niveau 3 (*Connection Management, Mobility Management et Radio Resource Management*),
- les échanges au niveau 2 (protocole LAPDm)
- la configuration de la station de base courante (nombre de fréquences, fréquences des voies balise voisines, seuils de réception, options de transmission, identités de cellule et de zone de localisation, etc.),
- les niveaux de puissance reçue sur la cellule courante et les 6 meilleurs voisins sous forme de tableau et de courbes,
- Les canaux logiques utilisés au cours du temps,
- les identités statiques et les identités temporaires affectées au mobile.

## 8.4. Contrat de recherche

La plupart des travaux de recherches présentés dans ce rapport ont été effectuées dans le cadre de contrats avec des organismes extérieurs. J'ai participé à plusieurs contrats européens en étant responsable du suivi technique à l'ENST.

- Projet ATDMA (*Advanced TDMA for Mobile Access*) de 1992 à 1995 dans le cadre de RACE II (*Research and development of Advanced Communication technologies in Europe*). Contrat de 334 kEuro (2,2 millions de francs). Travail sur l'allocation de ressources radio et la simulation système d'un réseau radiomobile.
- Projet FRAMES (*Future Radio wideband Multiple Access Systems*) de 1996 à 1999 dans le cadre de ACTS (*Advanced Communications Technologies and Services*). Contrat de 132 kEuro (0,9 million de francs). Travail sur l'allocation de ressources radios dans les systèmes CDMA/TDMA.
- Projet TSUNAMI II (*Technology in smart Antennas for Universal Advanced Mobile Infrastructure*) de 1996 à 1999 dans le cadre de ACTS. Contrat de 48 kEuro (310 kF). Etude de l'impact de l'utilisation des antennes adaptatives sur un réseau cellulaire.

D'autres travaux ont été financés par des contrats industriels :

- Contrat avec TDF C2R Metz. Contrat de 1995 à 1998 (350 kF) en accompagnement d'une thèse CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche avec

l'Association Nationale de la Recherche Technique) sur la planification et l'évaluation des performances des réseaux de radiocommunications avec les mobiles.

- Contrat avec Bouygues Télécom. Contrat de 1999 à 2002 (300 kF) en accompagnement d'une thèse CIFRE sur la qualité de service dans un réseau paquets mobile.

## **8.5. Cours hors ENST**

Dans le cadre du Groupement des Ecoles des Télécommunications, j'interviens de façon régulière à l'ENST Bretagne, site de Rennes. Je suis vacataire à l'institut Eriee de Nimes (filiale de l'Ecole des Mines d'Alès), à l'Esigetel (Ecole supérieure d'ingénieurs en informatique et génie des télécommunications à Avon-Fontainebleau). J'ai assuré également un module d'enseignement des réseaux radiomobiles à l'Ecole franco-polonaise de Poznan (filiale de l'ENST-Bretagne) de 1994 à 1996, date de sa fermeture.

## **8.6. Direction de Collection**

Sur la demande du directeur d'Hermès Sciences, j'assume la responsabilité de la collection Réseaux et Télécoms depuis décembre 1999. Dans ce cadre, je suis amené à relire les ouvrages ayant trait aux réseaux proposés chez Hermès et à donner mon accord sur leur publication.



## 9. Conclusions et perspectives

Mes travaux de recherche durant ces huit dernières années m'ont donné l'occasion d'étudier tant le domaine de l'analyse des performances en télétrafic que celui de l'analyse des interférences, plus proche du domaine des communications numériques.

La densification des réseaux, du fait de la réduction de la taille des cellules qu'elle entraîne, augmente l'impact de la mobilité. Les modèles de dimensionnement établis pour le réseau téléphonique sont certes encore largement utilisés par les opérateurs mais ils ne permettent pas de garantir une bonne qualité de service quand le taux de transferts inter-cellulaires des communications est important. Dans certains contextes comme celui des réseaux cellulaires hiérarchiques, les modèles du réseau téléphonique doivent être adaptés. Ce sujet a fait l'objet de ma thèse.

La troisième génération sera probablement celle de « l'Internet mobile ». Il est nécessaire de développer des modèles permettant le dimensionnement et l'analyse de performances en considérant des applications de transmission de données dont les flux sont hautement sporadiques. Des modèles de trafic prenant en compte cette sporadicité sont proposés dans le cadre du réseau fixe ; il faut les adapter et regarder leur application aux réseaux mobiles.

De plus, le développement de l'accès paquet avec l'introduction du GPRS pose de nombreux problèmes : gestion coordonnée des demandes de services circuits et de services paquets, paramétrisation des protocoles de liaison de données, garantie d'une qualité de service en mode paquet. Ce dernier point est l'objet d'une thèse en collaboration avec Bouygues Télécom qui a commencé en décembre 1999.

Nous avons essayé de souligner dans ce rapport l'importance de l'analyse des interférences dans les réseaux cellulaires. La capacité d'un réseau est liée au niveau d'interférences qu'il peut supporter. Des fonctionnalités telles que le contrôle de puissance et le soft handover permettent d'augmenter la capacité du réseau si elles sont bien paramétrées.

L'adoption de la technique CDMA pour l'UMTS pose également de nouveaux problèmes. En effet, il faut servir sur une même cellule de nombreux utilisateurs demandant des services différents. Il est nécessaire d'étudier les politiques de gestion de la ressource : approche plus centrée sur le CDMA consistant à donner des débits différents mais continus aux utilisateurs, ou approche plus centrée sur l'accès paquet consistant à servir des utilisateurs à tour de rôle mais en leur donnant des débits instantanés importants. La seconde approche, d'après les études que j'ai présentées, semble préférable. Les analyses réalisées peuvent être approfondies et complétées par l'étude du contrôle d'admission.

En effet, dans une approche paquet, le réseau doit, pour accepter une nouvelle session, vérifier la possibilité de garantir une bonne qualité de service. Il doit prévoir le niveau d'interférence qui serait générée par la nouvelle session (valeur moyenne, valeur maximale,...

). La définition de bons mécanismes de contrôle d'admission requiert une prise en compte tant des modèles de trafic que de l'interférence. C'est un domaine dans lequel je pense investir dans les années qui viennent.

## Références

- [ACM 88] H.W. Arnold, D.C. Cox, R.R. Murray, "Macroscopic diversity performance measured in the 800-MHz portable radio communications environment", *IEEE Transactions on antenna and propagation*, Vol 36 n°2, February 1988.
- [Bat 98] A. Bathelt - « Modèles graphiques pour l'analyse et la planification de réseaux radiomobiles », Thèse ENST (98E005) soutenue le 14 mai 1998. Jury : P. Kühn, A. Levy, S. Tabbane, B. Jabbari, X. Lagrange, J. Rodriguez Guisantes, W. Sami, P. Godlewski.
- [BeP 89] Beck R., Panzer H., "Strategies for Handover and Dynamic Channel Allocation in Micro-cellular Mobile Radio Systems", *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference*, San Francisco, 1989, p. 178-185.
- [Ché 95] Chébaro T., « Statistiques d'interférences et capacité dans les systèmes radiomobiles cellulaires », Thèse de l'ENST, Paris 95E013, Juin 1995.
- [ChG 92] Chébaro T., Godlewski P., "About the CDMA Capacity Derivation", *Proceedings of the ISSSE*, Paris, 1992, p. 36-39.
- [DrL 95a] U. Dropmann, X. Lagrange, P. Godlewski, "Architecture of a Multi-Cell Centralized Packet Access System", *Proceedings of IEEE PIMRC Symposium*, 1995, pp. 279-283.
- [DrL 95b] U. Dropmann, C. Lamare, X. Lagrange, P. Godlewski, "Dynamic Channel Allocation for a Micro-and Pico-cellular System with Overlapping Coverage", *Proceedings of Mobile Kommunikation (ITC-Fachtagung)*, 1995, pp. 173-180.
- [Dro 95] U. Dropmann, C. Lamare, X. Lagrange, P. Godlewski, "Dynamic Channel Allocation for a Micro- and Pico-cellular System with Overlapping Coverage", in *2nd ITC-Fachtagung Mobile Kommunikation*, Neu Ulm, Germany, September 1995
- [Dro 96] U. Dropmann - « Allocation de ressources dans des systèmes radiomobiles à réservation par paquets », Thèse ENST (96E012), soutenue le 23 mai 1996. Jury : B. Jabbari, M. Frullone, A. Levy, S. Tabbane, P. Godlewski, X. Lagrange, R. Mathar.
- [Ekl 86] B. Eklundh, "Channel Utilization and Blocking Probability in a Cellular Mobile Telephone System with Directed Retry", *IEEE Transactions on Communications*, Vol 34, n°4, pp. 329-337, 1986.

- [Eng 69] J.S. Engel, "The effects of cochannel interference on the parameters of a small-cell mobile telephone system", *IEEE Vehicular Technology*, vol VT-18, pp. 110-116, Nov 1969.
- [Gil 91] Gilhousen K.S., et al., "On the Capacity of a Cellular CDMA System", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol 40, n°2, pp. 303-311, 1991.
- [GoB 97] D. J. Goodman, J. Borras, N. B. Mandayam, R. D. Yates, "INFOSTATIONS: A New System Model for Data and Messaging Services", *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, Phoenix, USA, May 1997, pp. 969-973.
- [KaN 96] Katzela I., Naghshineh M., "Channel Assignment Schemes for Cellular Mobile Telecommunications Systems: A Comprehensive Survey", *IEEE Personal Communications*, Vol 3, n°3, pp. 10-31, 1996.
- [Lag 98] X. Lagrange, B. Jabbari, "Fairness in Wireless Microcellular Networks" in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol 47, n°2, May 1998.
- [Lag 99a] X. Lagrange, "Performance of reversible and non reversible hierarchical cellular networks", *Proceedings of the 3rd European Personal Mobile Communications Conference*, Paris, France, Mars 1999.
- [Lag 99b] X. Lagrange, "Teletraffic analysis of reversible hierarchical cellular networks" in *Multiaccess, Mobility and Teletraffic*, Vol 3, K. Leung and B. Vojcic (Editors), Kluwer Academic Publisher, 1999.
- [Lag 00a] X. Lagrange, "Distribution du rapport signal-interférence dans un réseau cellulaire régulier" (Cumulative distribution of the Carrier-to-Interference ratio in regular cellular networks), rapport interne ENST 2000D001, Paris, 2000.
- [Lag 00b] Xavier Lagrange, Claudiu Mihailescu, « Capacité cellulaire des systèmes radiomobiles », *Mise en œuvre des réseaux radiomobiles*, ouvrage coordonné par Xavier Lagrange, Hermès Science, parution en mars 2000.
- [McD 79] MacDonald V.H., "The Cellular Concept", *The Bell System Technical Journal*, Vol 58, n°1, pp. 15-41, 1979.
- [Mih 00] C. Mihailescu, « Gestion des ressources radio pour les systèmes radio-mobiles de troisième génération », Soutenance prévue le 17 mars 2000. Jury : B. Jabbari, J. Zander, S. Tabbane, D. Fauconnier, D. Zeghlache, P. Godlewski, X. Lagrange.
- [MuG 82] Mummar R., Gupta S.C., "Cochannel Interference in High-Capacity Mobile Radio Systems", *IEEE Transactions on Communications*, Vol 30, n°8, pp. 1973-1982, 1982.

- 
- [NuG 98] Nuaymi L., Godlewski P., "Power Control in Cellular Networks, a Review", *Network and Information Systems Journal*, Vol 1, n°6, pp. 1998.
- [Sch 98] J. Schindler, G. Herbster, A. Klein, M. Haardt, "Overview of the UTRA/TDD Performance Evaluation", *Proceedings of 1st International Symposium on Wireless Multimedia Communications*, Yokosuka, Japan, Nov. 1998
- [SKH 95] Sampath A., Kumar P.S., Holtzmann J.M., "Power Control and Resource Management for a Multimedia CDMA Wireless System", *Proceedings of the Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1995,
- [Ste 85] Stjernvall J.-E., "Calculation of Capacity and Co-Channel Interference in a Cellular System", *Proceedings of the Nordic Seminar on Digital Land Mobile Radio Communications*, Espoo, Finland, 1985, p. 209-217.
- [ViV 93] Viterbi A.J., Viterbi A.M., "Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol 11, n°6, pp. 892-900, 1993.
- [Whi 93] Whitehead J.F., "Signal-Level-Based Dynamic Power Control for Co-channel Interference Management", *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference*, 1993, p. 499-502.
- [Wilk 56] R. I. Wilkinson, "Theories of Toll Traffic Engineering in the U.S.A.," *Bell System Technical Journal*, Vol 35 n°2, Mars 1956, pp. 421-514.
- [Win 98] Winters J.H., "Smart Antennas for Wireless Systems", *IEEE Personal Communications*, Vol 5, n°1, pp. 23-27, 1998.
- [YeS 84] Yeh Y.-S., Schwartz S.C., "Outage Probability in Mobile Telephony Due to Multiple Log-Normal Interferers", *IEEE Transactions on Communications*, Vol 32, n°4, pp. 380-388, 1984.
- [Zor 97] Zorzi M., "On the analytical computation of the interference statistics with applications to the performance evaluation of mobile radio systems", *IEEE Transactions on Communications*, Vol 45, n°1, pp. 1-6, 1997.



Xavier Lagrange  
28 rue du Charolais  
75012 PARIS  
né le 09/04/1962  
Tel prof : 01 45 81 74 57  
mel : lagrange@enst.fr

## EXPERIENCE PROFESSIONNELLE

depuis 1991 *Enseignant-Chercheur au département réseaux de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications (ENST) :*

- responsabilité d'enseignement sur les réseaux informatiques et les réseaux radiomobiles,
- domaines de recherche : performances des réseaux cellulaires, planification cellulaire, gestion de ressources radio dans les réseaux de 3ème génération (plus de 25 publications dans des revues ou congrès internationaux),
- organisation de sessions de formation continue sur la norme GSM, la planification cellulaire, les systèmes radiomobiles universels UMTS (*Universal Mobile Telephone System*),
- consultance dans le domaine des réseaux radiomobiles,
- rédaction des livres *Réseaux GSM-DCS* et *Introduction aux réseaux* aux Editions Hermès (avec des co-auteurs),
- participation aux projets européens de recherche RACE II ATDMA et ACTS FRAMES sur la spécification d'une interface radio pour les systèmes radiomobiles universels UMTS,
- responsable de cours à l'Esigetel (Fontainebleau-Avon), l'ESME Sudria (Paris) et l'Eriee (Nîmes).
- directeur de la collection Réseaux et Télécommunications chez Hermès Science Publications (depuis 1999)

- 1984-1990 Ingénieur d'études à Alcatel Radiotéléphone.
- 1989-1990 Chef de projet (logiciel et matériel) :  
– spécifications techniques des matériels et logiciels à développer,  
– encadrement d'équipes de recherche et développement,  
( 2 équipes de 3 à 4 personnes pendant 1 an).
- Projets concernés :  
– modem radio intégré à un émetteur-récepteur,  
– infrastructure de réseau radio à ressources partagées.
- 1988-1989 Spécification d'un protocole de signalisation pour les réseaux privés radiomobiles au sein du DTI (Department of Trade and Industry,GB).
- 1987-1988 Développement logiciel d'un modem radio avec gestion de protocole intégrée. Mise en service et installation sur site.
- 1985-1986 Participation au développement d'un terminal de radio-téléphonie pour réseaux d'entreprises.  
Dépot d'un brevet sur un système de scrutation de canaux par des terminaux dans les réseaux radios d'entreprises analogiques.

## **FORMATION**

- 11/05/98 Docteur de l'ENST, spécialité informatique et réseaux  
Sujet : analyse de performances des réseaux cellulaires hiérarchiques.
- 1981-1984 Ecole centrale des arts et manufactures (ECP).  
option électronique

## **LANGUES**

- Anglais : Anglais international courant.

## **Annexe A2 : Reproductions de publications**

Dans les pages suivantes sont reproduits quelques publications récentes.

- A2.1 X. Lagrange, "Multi-tier Cell Design," *IEEE Communications Magazine*, Vol 35,n°8, pp. 60-64, 1997.
- A2.2. X. Lagrange, "Teletraffic analysis of reversible hierarchical cellular networks" in *Multiaccess, Mobility and Teletraffic, Vol 3*, K. Leung and B. Vojcic (Editors), Kluwer Academic Publisher, 1999.
- A2.3. X. Lagrange, B. Jabbari, "Fairness in Wireless Microcellular Networks" in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol 47, n°2, May 1998.
- A2.4. C. Mihailescu, X. Lagrange, P. Godlewski, "Resource Allocation for Integrated Voice/WWW Traffic in UMTS/TDD Systems" in *Multiaccess, Mobility and Teletraffic, Vol 4*, E. Biglieri, L. Fratta and B. Jabbari (Editors), Kluwer Academic Publisher, 1999.
- A2.5. C. Mihailescu, X. Lagrange, Ph. Godlewski, "Radio Resource Management for Packet Transmission in UMTS WCDMA Systems", *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, Amsterdam, The Netherlands, Sept. 1999, pp. 573-577.
- A2.6. C. Mihailescu, X. Lagrange, Ph. Godlewski, "Soft Handover Analysis in Downlink UMTS WCDMA Systems", *IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications*, San Diego, USA, Nov. 1999.