

OMAR RACHID HADJAR

**ANALYSE, IMPLÉMENTATION ET ÉVALUATION
DE PERFORMANCE DE LA FUTURE MÉTHODE
D'ACCÈS HSDPA**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en Informatique
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

Département d'informatique et de génie logiciel
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2006

Résumé

La technologie HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) représente la première étape d'évolution de la méthode d'accès du réseau mobile de troisième génération UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Service*). Cette technologie permet d'obtenir des débits théoriques supérieurs à 10 Mbps sur le lien descendant et de supporter des services à valeur ajoutée, tels que l'accès Internet à haute vitesse, le téléchargement de fichiers audio et vidéo, la réception de programmes télévisés et la visiophonie. Ces améliorations sont rendues possibles grâce à une combinaison de propriétés qui sont à la base du HSDPA et qui consistent à adapter le codage et la modulation en fonction des conditions du canal radio (AMC : *Adaptive Modulation and Coding*), à effectuer des retransmissions rapides de paquets erronés (HARQ : *Hybrid Automatic Repeat re-Quest*) et à utiliser des méthodes d'ordonnancement intelligentes plus rapides. Même si l'introduction de ces nouvelles techniques contribue à une augmentation de la capacité du système, elle engendre toutefois une plus grande complexité dans l'évaluation de ses performances dans des conditions réelles. Dans ce contexte, nous proposons une implémentation et une évaluation de la méthode d'accès HSDPA qui prend en considération les spécifications techniques des Node B et des terminaux mobiles d'un système UMTS. Les résultats obtenus de cette implémentation, basés sur plusieurs scénarios utilisant des données géographiques réelles, montrent que le système réussit à satisfaire aux exigences des services multimédia.

Abstract

High speed downlink packet access (HSDPA) is an add-on technology for W-CDMA that allows higher downlink data rates and greater base station capacity. With HSDPA, W-CDMA systems, which today are seemingly stuck at 384 kbps, will be able to shift gears and move ahead to so-called 3.5G performance with over 10 Mbps throughput on the downlink. The incorporation of HSDPA in Release 5 of the 3GPP W-CDMA specification is the most significant change on the RF side since Release 99. Advanced techniques such as adaptive modulation and coding (AMC) and hybrid automatic repeat request (HARQ) are used to modify the coding and physical layer parameters adaptively in response to the instantaneous channel quality, thus enabling gains in spectral efficiency and data rates. On the other hand, such improvements also bring a higher complexity degree in the evaluation of the radio subsystem performance. This evaluation is crucial for operators who are willing to provide value-added services with rich multimedia contents. This thesis aims at implementing and simulating a radio access network on a real geographic area using the HSDPA features. Results show that such features enable to satisfy the quality of service requirements needed to support the new data-oriented services.

Avant-propos

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de recherche, M. Ronald Beaubrun pour sa confiance manifestée dès le départ. J'aimerais d'abord le remercier de m'avoir donné l'envie d'entamer ma maîtrise dans son domaine à travers le cours qu'il dispose aux gradués. Mais aussi, je tiens à le remercier pour l'encadrement exceptionnel, l'aide financière, les suggestions et la liberté accordée tout au long de mon cheminement.

Aussi, j'aimerais exprimer ma gratitude envers toutes les personnes formidables que j'ai côtoyées pendant toute la durée de ma maîtrise au département d'informatique et qui se reconnaîtront j'en suis sûr.

Je ne saurais terminer sans remercier du fond de mon coeur ma famille et mes amis pour m'avoir toujours soutenu.

*À Titis, ma grand-mère
qui vit éternellement dans nos cœurs...*

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iii
Avant-propos	iv
Table des matières	vi
Liste des tableaux	viii
Table des figures	ix
Liste des acronymes	xi
1 Introduction	1
1.1 Définitions et concepts de base	1
1.2 Éléments de la problématique	4
1.3 Objectifs de recherche	5
1.4 Plan du mémoire	5
2 Caractérisation du réseau d'accès de l'UMTS	7
2.1 Évolution des réseaux mobiles	7
2.2 Méthodes d'accès radio	12
2.2.1 Techniques de base	12
2.2.2 Étalement de spectre par séquences directes	14
2.2.3 Codes d'étalement	16
2.2.4 Caractéristiques du canal de propagation	20
2.3 Présentation du système UMTS	22
2.3.1 Services offerts	23
2.3.2 Architecture	25
2.3.3 Couches de protocoles radio de l'interface d'accès	28
2.3.4 Description des canaux de transport	29
2.4 Fonctions de la couche physique de l'UTRAN	30
2.4.1 Chaîne de transmission UTRA/FDD	30

2.4.2	Multiplexage et codage	31
2.4.3	Application de l'étalement de spectre	35
2.4.4	Modulation	36
2.5	Structure des canaux physiques	37
2.5.1	Canaux physiques dédiés de la voie montante	37
2.5.2	Canaux physiques dédiés de la voie descendante	40
2.5.3	Canaux physiques communs	41
3	Analyse de la technologie HSDPA	43
3.1	Présentation générale du HSDPA	43
3.2	Mécanisme de retransmission hybride HARQ	45
3.3	Modulation et codage adaptatifs	47
3.4	Canaux HSDPA	49
3.5	Fonctionnement de la couche physique	53
3.6	Ordonnancement rapide (<i>Fast Scheduling</i>)	54
3.7	Limitations des approches d'évaluation proposées	56
4	Performances de la technologie HSDPA	59
4.1	Plan d'expérimentation	59
4.2	Implémentation de la méthodologie	61
4.2.1	Paramètres géographiques	61
4.2.2	Paramètres radio	62
4.2.3	Modélisation du trafic	66
4.3	Résultats et analyse	69
5	Conclusion	76
5.1	Synthèse des résultats	76
5.2	Limitations des travaux	78
5.3	Orientations de recherches	78
	Bibliographie	80

Liste des tableaux

2.1	Exemples de systèmes cellulaires 1G	8
2.2	Exemples de réseaux numériques 2G	9
2.3	Classes de services de l'UMTS	25
2.4	Exemples de formats des slots du DPDCH de la voie montante	39
2.5	Exemples de formats des slots du DPCCH de la voie montante (avec SF=256)	39
2.6	Exemples de formats des slots du DPCH de la voie descendante	41
3.1	Schémas de modulation et de codage MCS sur le lien DL	49
3.2	Catégories de terminaux supportant la technologie HSDPA	49
3.3	Comparaison du canal HS-DSCH avec les autres canaux du lien descendant	50
4.1	Paramètres d'une antenne	63
4.2	Types d'antennes considérés	64
4.3	Paramètres d'un transmetteur	65
4.4	Paramètres caractérisant une cellule	65
4.5	Paramètres communs de simulations des Tx et des cellules	66
4.6	Caractéristiques des services offerts	67
4.7	Paramètres indiquant les différents types de terminaux mobiles	67
4.8	Paramètres des profils d'utilisateurs	68
4.9	Profils d'utilisateurs considérés	68
4.10	Structure d'une carte de trafic	69

Table des figures

1.1	Architecture de base d'un réseau mobile	2
2.1	Évolution vers la 3G	10
2.2	Accès multiple par répartition de fréquences (FDMA)	12
2.3	Accès multiple par répartition dans le temps (TDMA)	13
2.4	Méthode d'accès multiple à répartition de codes (CDMA)	13
2.5	(a) Émetteur d'un système DS-CDMA et (b) processus d'étalement	14
2.6	Accès multiple dans un système DS-CDMA avec deux utilisateurs	18
2.7	Exemple d'accès multiple DS-CDMA avec 2 utilisateurs suivant la figure 2.6 : signal transmis par la BS	19
2.8	Schéma générique d'un registre à décalage à n états	20
2.9	Exemple de génération des codes de Gold	20
2.10	Modélisation du canal de propagation dans un réseau DS-CDMA	21
2.11	Effets combinés des évanouissements à court et à long termes	22
2.12	Architecture générale du réseau UMTS	26
2.13	Éléments du réseau d'accès UTRAN	27
2.14	Couches de protocoles de l'interface radio	28
2.15	Correspondance (<i>mapping</i>) entre les canaux de transport et les canaux physiques	30
2.16	Fonctions de la couche physique dans la chaîne de transmission UTRA/FDD	31
2.17	Multiplexage et codage du canal DCH sur le lien montant	33
2.18	Exemple d'une chaîne d'émission utilisant la modulation QPSK	36
2.19	Structure des canaux physiques dédiés DPDCH et DPCCH de la voie montante	38
2.20	Agencement des canaux physiques dédiés dans une transmission en multicode dans la voie montante	40
2.21	Structure du canal physique dédié DPCH de la voie descendante	41
3.1	Architecture système avec le HSDPA	44
3.2	Technique HARQ dans la chaîne de codage du canal HS-DSCH	47
3.3	Principe de fonctionnement de l'HARQ	47
3.4	Constellations de la modulation 16-QAM et QPSK	48

3.5	Exemple de multiplexage de code avec deux usagers actifs	50
3.6	Relation du timing entre le canal HS-SCCH et le HS-DSCH	51
3.7	Structure du canal HS-DPCCH	52
3.8	Fonctionnement de la couche physique du HSDPA	54
4.1	Carte DTM de la région de Nice (France)	62
4.2	Étendue de la zone de calcul sur la carte géographique (Nice)	63
4.3	Emplacement des sites dans la région de Nice	64
4.4	Représentation des densités de trafic correspondant au tableau 4.10	70
4.5	Distribution des usagers par service	71
4.6	Débit correspondant au service d'accès Internet MIA	72
4.7	Débit correspondant au service Visio	73
4.8	Débit du service MMS par station de base	74
4.9	Débits obtenus pour chaque cellule du réseau sur le lien descendant	75
4.10	Débits obtenus pour chaque cellule du réseau sur le lien montant	75

Liste des acronymes

0-9

3G	3rd Generation of wireless communication technology
3GPP	3rd Generation Partnership Project

A

AMC	Adaptive Modulation and Coding
-----	--------------------------------

B

BER	Bit Error Rate
BLER	BLock Error Rate
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller

C

CDMA	Code Division Multiple Access
CQI	Channel Quality Indicator
CN	Core Network

D

DS-CDMA	Direct Sequence CDMA
DSCH	Downlink Shared CHannel

E

EDGE	Enhanced Data for Global Evolution
------	------------------------------------

F

FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access

G

GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications

H

HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
HS-DSCH	High-Speed Downlink Shared Channel
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access

I

IMT-2000	International Mobile Telephony
ITU	International Telecommunication Union

M

MSC	Mobile Switching Center
MCS	Modulation and Coding Schemes
MMS	Multimedia Messaging Service
MS	Mobile Station

O

OVSF	Orthogonal Variable Spreading Factor
------	--------------------------------------

Q

QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying

R

R99	Release 99
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network Sub-system
RRC	Radio Resource Control

R

SF	Spreading Factor
SGSN	Serving GPRS Support Node
SIR	Signal to Interference Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio

T

TDMA	Time Division Multiple Access
TTI	Transmission Time Interval
Tx	Tranmitter

U

UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network

W

WCDMA	Wideband CDMA
-------	---------------

Chapitre 1

Introduction

Depuis le début des années 90, nous assistons à un véritable engouement pour le développement des réseaux mobiles. Ces réseaux ont eu un succès tel que leur nombre d'abonnés dépasse actuellement celui des réseaux fixes¹. Cet engouement est dû, d'une part, à un besoin de mobilité et, d'autre part, à la panoplie de nouveaux services offerts, comme l'accès Internet à haute vitesse, le téléchargement de fichiers audio et vidéo, la réception de programmes télévisés et la visiophonie. De tels services ne peuvent être disponibles sans une augmentation significative du débit du lien radio. Cette augmentation dépend essentiellement de la méthode utilisée par un terminal mobile pour accéder au réseau, c'est-à-dire la « méthode d'accès ». Ce mémoire porte sur la future méthode d'accès HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), en mettant l'emphasis sur sa capacité à supporter ces services multimédia. Dans ce chapitre d'introduction, nous définirons d'abord les concepts de base, puis nous dégagerons les éléments de la problématique et présenterons nos objectifs de recherche. Nous terminerons alors le chapitre par la présentation des grandes lignes du mémoire.

1.1 Définitions et concepts de base

Un réseau mobile est un réseau qui permet la communication entre individus mobiles, par l'intermédiaire d'un lien ou canal radio. Il est essentiellement constitué de deux sous-systèmes : un sous-système radio et un sous-système réseau, comme illustré à la figure 1.1 [30]. Le sous-système radio comprend tous les équipements nécessaires à la gestion

¹Selon *Wireless Intelligence*, une entreprise d'étude et d'analyse créée par la *GSM Association* et la société de conseil *Ovum*.

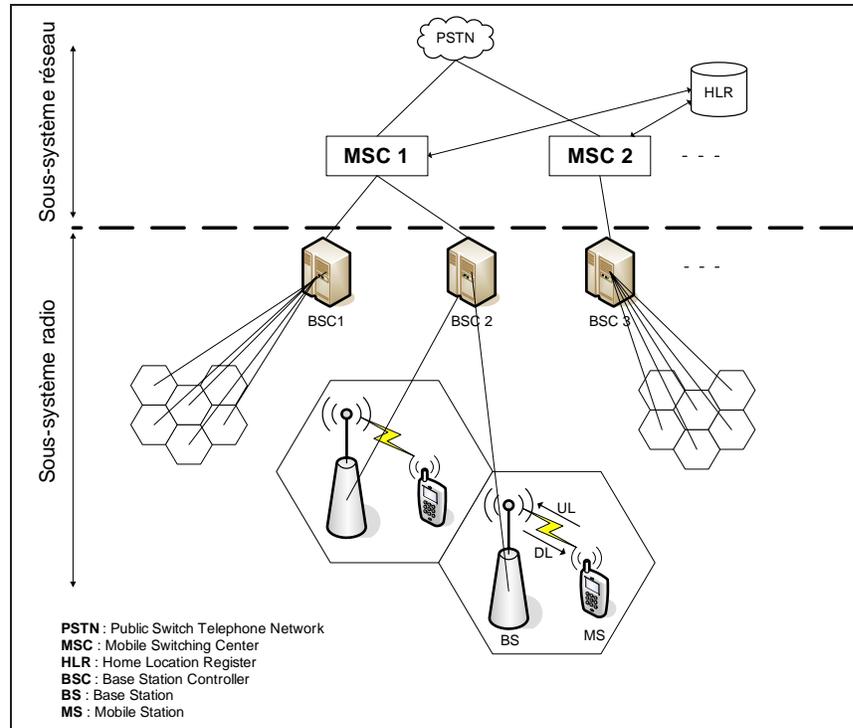


FIG. 1.1 – Architecture de base d'un réseau mobile

de l'interface radio et des transmissions. Il est principalement constitué de deux entités : les contrôleurs de stations de base **BSC** (*Base Station Controller*) et les stations de base **BS** (*Base Station*). Le BSC gère les ressources radio, supervise les accès et le contrôle de puissance. Il permet aussi de concentrer le trafic des stations de base vers les MSC.

Une station de base est un équipement contenant une ou plusieurs antennes de transmission, qui dessert plusieurs utilisateurs mobiles, muni de terminaux **MS** (*Mobile Station*), se trouvant dans une région donnée, appelée également « cellule ». Ces cellules sont communément modélisées par des hexagones dont le rayon varie de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Les BS permettent également de mesurer les paramètres radio nécessaires à la supervision des communications en cours et de retransmettre ces mesures aux BSC. Dans les zones denses, comme les centres-villes, des antennes dites « tri-sectorielles » sont utilisées pour subdiviser chaque cellule en trois secteurs distincts.

Dans le sous-système réseau, les MSC constituent l'interface entre les abonnés et le réseau téléphonique **PSTN** (*Public Switch Telephone Network*). Ils gèrent les appels et assurent des fonctions telles que la commutation ou la détection du décroché/raccroché du terminal mobile. Le sous-système réseau contient également une base de données nominale, appelée **HLR** (*Home Location Register*), qui contient toutes les données des

usagers, ainsi que leur localisation.

La communication entre deux MS nécessite l'utilisation de deux liens radio parallèles : un lien montant UL (*UpLink*) pour toutes les communications allant du terminal mobile vers la station de base et un lien descendant DL (*DownLink*) pour transporter les informations dans le sens contraire. Pour un opérateur donné, le nombre de canaux est limité. Il est alors impensable de réserver en permanence une paire de canaux à chaque abonné. D'où la nécessité de définir des méthodes afin de permettre à tous d'accéder au réseau. Ces méthodes sont souvent appelées « méthodes d'accès multiple ». Il existe trois méthodes d'accès de base [30] :

- le FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) : accès multiple par répartition de fréquences ;
- le TDMA (*Time Division Multiple Access*) : accès multiple par répartition dans le temps ;
- le CDMA (*Code Division Multiple Access*) : accès multiple par répartition de codes.

Utilisé dans les réseaux mobiles de première génération (1G), le FDMA permet d'allouer à chaque utilisateur un canal avec une bande de fréquences unique. Dans ce cas, un seul utilisateur peut se servir de ce canal pendant la durée d'une communication. L'introduction du TDMA a permis non seulement le passage vers une transmission numérique qui donna lieu à une deuxième génération de réseaux mobiles (2G), mais aussi la capacité du réseau à desservir un plus grand nombre d'utilisateurs [30]. En effet, avec cette technique, chaque canal radio est subdivisé en plusieurs intervalles de temps ou *slot* et chaque utilisateur se voit attribuer un slot de temps donné.

Dans le cas du CDMA, la bande de fréquences n'est pas subdivisée, alors que tous les utilisateurs se partagent la totalité de la bande disponible. Chaque utilisateur se voit attribuer un code connu exclusivement de l'émetteur et du récepteur. L'attribution des codes est réalisée selon le principe d'étalement de spectre. Le CDMA est particulièrement privilégié pour être à la base des méthodes d'accès des futurs réseaux mobiles, car il permet d'augmenter non seulement le nombre d'utilisateurs, mais aussi le débit des données sur le lien radio. Ainsi, à la fin des années 90, une évolution du CDMA, le WCDMA (*Wideband CDMA*), a été lancée, promettant des débits suffisamment élevés, en théorie, pour supporter des services riches en multimédia [30]. En pratique, ce standard n'offrait pas encore le débit requis par des services à valeur ajoutée. C'est la raison pour laquelle une autre évolution du nom de HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) a été proposée. Cette dernière technologie permet d'augmenter le débit du lien descendant, jusqu'à un maximum de 14 Mbps, en utilisant les propriétés suivantes :

- l’AMC (*Adaptative Modulation and Coding*) qui consiste à adapter le débit selon la qualité de la transmission du lien radio ;
- le HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*) qui représente un mécanisme de retransmission rapide de données erronées ;
- les algorithmes d’ordonnancement rapide permettant d’allouer efficacement les ressources radio aux différents utilisateurs.

De façon générale, l’évaluation de performance d’une méthode d’accès consiste à estimer des paramètres de qualité de service, comme le débit binaire sur le lien radio, les délais de transmission et le taux d’erreurs binaires. Dans le but d’estimer ces paramètres, il faut disposer d’un réseau d’accès dont les composants peuvent être onéreux. Il est alors préférable d’avoir recours à des solutions logicielles pour simuler le fonctionnement d’un réseau d’accès. Dans le contexte de notre recherche, l’évaluation de performance consiste à estimer le débit binaire d’un réseau d’accès utilisant la technologie HSDPA, qui supporte des services à valeur ajoutée, tels que l’accès rapide à Internet, la messagerie multimédia et la visiophonie. Dans notre évaluation, nous tiendrons compte des paramètres géographiques de la zone couverte par le réseau mobile considéré.

1.2 Éléments de la problématique

Plusieurs recherches ont été menées pour évaluer la performance de la technologie HSDPA [11], [18], [21]. Cependant, aucune d’entre elles n’utilise de méthodologie explicite dans l’évaluation de performance. Dans [18], plusieurs types (6) d’algorithmes d’ordonnancement ont été étudiés et comparés. Cette comparaison a permis d’illustrer le compromis entre la capacité d’une cellule et l’équité dans l’allocation des ressources aux utilisateurs. Toutefois, cette étude suppose que tous les utilisateurs transmettent la même quantité de données, ce qui est loin d’être le cas dans la réalité.

Dans l’étude réalisée dans [11], une extension d’un simulateur de la méthode d’accès WCDMA a été proposée et des modifications ont été apportées dans le but de prendre en charge l’évolution du HSDPA. Les résultats obtenus concernant le débit sur le lien descendant dépassent les 12.8 Mbps. Toutefois, un tel débit n’a pu être obtenu que pour un nombre restreint de stations de base. Quel serait alors le débit si le réseau contenait un nombre plus important de BS ?

Par ailleurs, Love *et al.* [21] ont mené une étude faisant une comparaison de performances, en terme de débit par cellule, entre la méthode d’accès WCDMA et son

évolution avec la technologie HSDPA, ce qui a permis de montrer les améliorations apportées par cette évolution. Néanmoins, les simulations réalisées dans cette étude ne tiennent compte que du service d'accès à Internet. De plus, cette étude fait abstraction des phénomènes qui affaiblissent la puissance du signal compte tenu des reliefs géographiques et des obstacles que l'on peut trouver dans une région sur laquelle on veut planifier un réseau mobile. Il est alors opportun de se questionner sur les performances de la méthode d'accès HSDPA dans des conditions réelles de fonctionnement et sur sa capacité à supporter des services à valeur ajoutée.

1.3 Objectifs de recherche

Dans ce mémoire, nous visons comme objectif principal l'analyse, l'implémentation ainsi que l'évaluation de performance de la future méthode d'accès HSDPA. De manière plus spécifique, nous visons à :

1. déterminer les paramètres importants qui influencent les performances d'une méthode d'accès de manière à déduire ceux de la technologie HSDPA ;
2. concevoir une méthodologie d'évaluation de performance bien définie dans le but d'assurer une évaluation rigoureuse et complète de la technologie HSDPA ;
3. simuler le fonctionnement d'un réseau d'accès, en tenant compte des spécifications des stations de base ainsi que celles des terminaux mobiles ;
4. mesurer les différents débits binaires sur le lien radio pour chaque station de base du réseau et évaluer la capacité de la méthode HSDPA à supporter des services à valeur ajoutée.

1.4 Plan du mémoire

La suite du mémoire est constituée de quatre chapitres. Dans le chapitre 2, nous établissons une revue sélective de littérature liée au réseau d'accès de l'UMTS, en mettant l'accent sur les concepts de base ainsi que les paramètres importants à considérer. Le chapitre 3 traite des caractéristiques spécifiques à la technologie HSDPA ainsi que les modifications engendrées par l'introduction de cette dernière au niveau du réseau d'accès de l'UMTS. À cette étape, nous serons en mesure de comprendre la complexité liée à l'évaluation de performance de cette technologie. Le chapitre 4 présente notre méthodologie d'évaluation de performance et les détails d'implémentation de la technologie

HSDPA. Cette méthodologie servira à décrire les étapes nécessaires à l'implémentation d'un réseau d'accès à base de HSDPA à l'issue de laquelle nous serons en mesure d'exécuter nos simulations à l'aide d'un outil de planification radio. Les résultats de ces simulations seront présentés et analysés. Au chapitre 5, nous synthétisons l'ensemble des résultats obtenus. Cette synthèse sera accompagnée d'une discussion sur les limites de notre approche d'évaluation de performance et par des suggestions d'orientations de recherche.

Chapitre 2

Caractérisation du réseau d'accès de l'UMTS

Le réseau mobile UMTS est un système qui vise à utiliser la technologie HSDPA afin de pouvoir offrir une multitude de services à valeur ajoutée. Dans ce chapitre, nous faisons une synthèse des principales caractéristiques du réseau d'accès du système UMTS. Nous commencerons par présenter l'évolution des standards de réseaux mobiles classés sous forme de générations. Puis, nous ferons l'étude des méthodes d'accès dans les réseaux mobiles et plus particulièrement celles à base de CDMA. Par la suite, nous présenterons l'architecture générale du réseau mobile de troisième génération UMTS, ainsi que les classes de services qu'il supporte. Nous nous intéresserons particulièrement au sous-système radio de l'UMTS et ses protocoles. Pour terminer, nous détaillerons les fonctions de la couche physique et la structure des canaux physiques.

2.1 Évolution des réseaux mobiles

La première génération de réseaux mobiles est souvent appelée « réseaux cellulaires » en raison de la subdivision en cellules de l'étendue géographique du réseau. À la fin des années 80, le premier réseau cellulaire, baptisé AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*), a vu le jour à Chicago. Par la suite, plusieurs pays ne tardent pas à lancer leurs propres réseaux que nous pouvons résumer dans le tableau 2.1 [30]. L'ensemble des réseaux cellulaires fonctionne en mode de transmission analogique et utilise la technique d'accès FDMA.

Standard	Bande de fréquences DL (MHz)	Bande de fréquences UL (MHz)	Largeur de bande d'un canal (kHz)
AMPS	869-894	824-849	30
TACS	935-960	890-915	25
E-TACS	917-950	872-905	25
NMT450	463-467.5	453-457.5	25
NMT900	935-960	890-915	12.5
C450	460-465.74	450-455.74	10
RMTS	460-465	450-455	25
NTT	870-885	925-940	25/6.25

TAB. 2.1 – Exemples de systèmes cellulaires 1G

Malgré le succès de ces réseaux cellulaires, un problème important apparaissait lorsque le nombre d'utilisateurs augmentait car ceux-ci avaient tendance à être plutôt regroupés dans des zones urbaines et cela affectait inévitablement la capacité en terme de nombre d'utilisateurs de cette région. En plus de ce problème, des cas de fraude importants ont commencé à faire surface, ce qui a nécessité des améliorations nécessaires et urgentes devant être apportées à cette première génération.

Au début des années 90, la deuxième génération de réseaux mobiles a fait son apparition. À l'instar de la première génération qui est analogique, les systèmes de la 2G sont tous numériques. Ce passage offre plusieurs avantages, dont une augmentation de la capacité, une meilleure sécurité contre les fraudes ainsi que de nouveaux services, comme la messagerie texte SMS (*Short Message Service*).

L'un des standards les plus répandus de la 2G est sans doute le GSM (*Global System for Mobile Communications*). Le GSM a été lancé en 1991 et a été développé en tant que standard ayant pour but d'être utilisé partout à travers les pays d'Europe dont la plupart utilisaient des systèmes 1G différents. Comme nous pouvons le constater à partir du tableau 2.2, la majorité des systèmes 2G utilisent la technique TDMA. Cependant, au même moment, un système appelé IS-95 (ou cdmaOne) à base de CDMA fait son apparition en Amérique du nord. On annonçait, avec le CDMA, non seulement des gains en terme du nombre d'utilisateurs, mais aussi une qualité supérieure de la voix ainsi qu'une simplification de la planification du système [30].

Les systèmes de deuxième génération offrent plusieurs avantages par rapport aux systèmes analogues, mais restent néanmoins concentrés sur l'optimisation d'un seul service : la voix. Le débit de transfert de données n'a pas été une priorité et reste assez limité à l'ère des communications multimédia [30]. Pour palier à cette situation, une

Standard	Bandes de fréquences DL et UL (MHz)	Méthode d'accès	Largeur du canal	Utilisateur par canal	Region
GSM	935-960 et 890-915	TDMA	200 kHz	8	Europe/Asie
IS-136	869-894 et 824-849	TDMA	30 kHz	3	É.U.A.
IS-95	869-894 et 824-849	CDMA	1.25 MHz	64	É.U.A./Asie
iDEN	851-866 et 806-821	TDMA	25 kHz	3/6	É.U.A.
PDC	935-960 et 890-915	TDMA	25 kHz	3/6	Japon

TAB. 2.2 – Exemples de réseaux numériques 2G

technologie de transition, souvent dénotée par 2.5G, a été développée. Cette évolution avait pour but de permettre aux opérateurs de réseaux mobiles de déployer des services de données plus efficaces tout en gardant la même infrastructure de leurs réseaux 2G. Ces services se basent sur la technique de commutation par paquets utilisée dans le réseau Internet. Le GPRS (*General Packet Radio Service*) est une solution qui a été introduite dans les réseaux GSM à la fin des années 90 [30]. Ce système propose des débits maximums (*peak rate*) de l'ordre de 115 kbps [13]. Une seconde étape de cette évolution, du nom de EDGE (*Enhanced Data for Global Evolution*), est proposée en conjonction avec GPRS. Celle-ci permet, en théorie, de tripler le débit obtenu avec le GPRS, soit un maximum de 473.6 kbps. Cependant, ces débits étaient loin d'être atteints avec un nombre d'utilisateurs constamment en augmentation [11].

Dans un environnement où l'Internet, le e-commerce et le multimédia sont très présents, les réseaux qui offrent un support limité en transferts de données présentent un inconvénient majeur. Les utilisateurs ne veulent pas seulement parler, mais ils veulent aussi naviguer sur le web sans attendre trop longtemps qu'une page s'affiche, envoyer des courriels comme ils le font sur un ordinateur. Ces utilisateurs veulent non seulement avoir tous ces services à leur disposition, mais aussi être libres de leurs mouvements en les utilisant. Afin de satisfaire ces besoins, d'autres technologies sont nécessaires, notamment celles qui formeront une troisième génération de réseaux mobiles.

Plusieurs organisations se sont mis au travail pour définir ces nouvelles technologies [13]. L'ITU (*International Telecommunication Union*) a regroupé plusieurs de ses travaux sous le nom de IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications 2000*). Ces travaux ont abouti aux recommandations qui touchent, entre autres, au débit binaire sur le lien radio (allant de 144 kbps jusqu'à 2 Mbps selon la mobilité et l'environnement où se trouve l'utilisateur), à la diversité des services (comme le multimédia) et à la fréquence d'opération de ces réseaux, en l'occurrence la bande des 2-MHz.

En général, l'ITU ne disait pas comment on pouvait réaliser ses recommandations

de manière spécifique. Par conséquent, l'ITU a sollicité des propositions techniques des organisations manifestant un intérêt et par la suite décidait de retenir ou pas cette proposition. Quelques propositions de techniques d'accès radio ont été retenues et, parmi les plus importantes, figuraient le WCDMA et le CDMA2000 comme l'illustre la figure 2.1. Le WCDMA supporte deux modes de duplexage : le duplexage en fréquences FDD (*Frequency Division Duplex*) qui constitue la technologie UTRA/FDD et le duplexage temporel TDD (*Time Division Duplex*) formant l'UTRA/TDD [16]. La largeur de bande d'un canal utilisée dans le WCDMA/FDD a été fixée à 5 Mhz [26].

Le WCDMA a été proposé par l'institut des standards de télécommunication européen ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) qui utilisera le mode UTRA/FDD en Europe. Le Japon a également soumis une solution, du nom de FOMA (*Freedom Of Multimedia Access*), à base de WCDMA, mais tolérant les deux modes de duplexage. Afin d'uniformiser les deux solutions, les réseaux 3G à base de WCDMA sont regroupés sous l'acronyme UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) et permettent de supporter les deux modes FDD et TDD. Quant à l'Amérique du Nord, elle opte pour le CDMA2000. Il existe d'autres standards, mais nous limiterons notre étude aux réseaux utilisant la technique d'accès WCDMA avec le mode FDD.

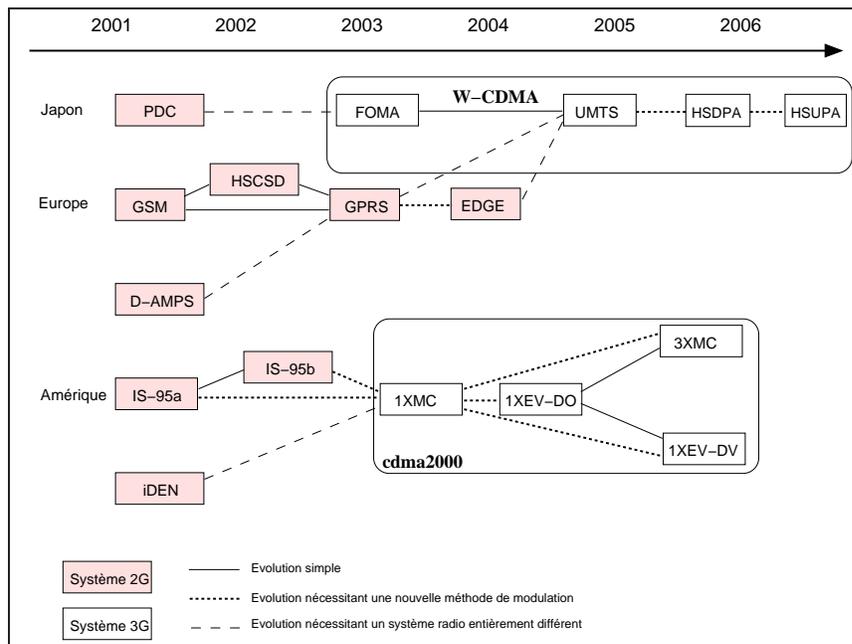


FIG. 2.1 – Évolution vers la 3G

Comme plusieurs groupes travaillaient sur des technologies similaires, il était évident que la méthode la plus efficace était de rassembler ces ressources. Par conséquent, deux groupes ont été créés : le 3GPP (*The 3rd Generation Partner Project*) qui travaille sur le système UMTS basé sur le WCDMA et le 3GPP2 qui développe le standard CDMA2000.

L'UMTS fait partie de la famille IMT-2000 et dont les spécifications techniques sont développées au sein du 3GPP. À la fin de l'année 1998, le 3GPP débuta ses activités et le travail technique détaillé commença en 1999, ayant comme but la première version de spécifications communes appelé *Release 99*¹. Elle constitue alors le premier ensemble complet de recommandations permettant le déploiement commercial d'un réseau UMTS. Par la suite, le 3GPP a pris comme convention que les nouvelles versions ou *releases* des spécifications techniques de l'UMTS, après celle de 1999, ne seraient plus associées à une année, mais plutôt aux nouvelles fonctionnalités qu'elles comporteraient [30]. Ainsi, la Release 2000 est divisée en Release 4 et 5. La Release 6 a été finalisée à la fin de l'année 2004 alors que les Releases 7 et 8 sont en cours.

Les documents techniques de la R99 ainsi que les versions ultérieures sont regroupés sous forme de « séries » numérotées de 21 à 35. Ces documents couvrent, soit des spécifications, soit des rapports techniques. Les spécifications techniques TS (*Technical Specification*) sont les documents qui décrivent la norme UMTS. La plupart du temps, il y a plusieurs versions pour ces spécifications qui pourront être publiées lorsque les différents organismes de normalisation le jugeront approprié. Ces spécifications ne deviennent officielles qu'après leur publication. Quant aux rapports techniques TR (*Technical Report*), ils représentent des documents de travail intermédiaires du 3GPP qui peuvent devenir des spécifications techniques. Une grande partie de ce chapitre, ainsi que tout ce que nous présenterons en relation avec le système UMTS, se basera essentiellement sur les spécifications de la version R99.

Selon la R99, le débit maximal du WCDMA est fixé à 2 Mbps [1]. Ce chiffre est optimiste car il est loin d'être le débit moyen et il ne cesse de décroître lorsque le nombre d'utilisateurs dans une cellule augmente, comme le montrent certaines études [21]. Afin d'y remédier, le HSDPA a été proposé dans la Release 5 du WCDMA. Cette nouvelle technologie annonce des débits pouvant aller au delà de 10 Mbps sur le lien descendant [23]. Un autre avantage du HSDPA réside dans le fait qu'il pourra être déployé sans changer radicalement l'architecture de l'UMTS définie dans la version R99 et permettra du coup aux opérateurs de réaliser cette évolution à moindre coût. D'autres travaux, regroupés sous le sigle HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*), visent également à obtenir, dans le futur, de hauts débits sur le lien montant [27].

¹Release 99 est souvent noté Rel99 ou simplement R99 dans la littérature

2.2 Méthodes d'accès radio

Dans cette section, nous allons présenter les méthodes d'accès de base avant de détailler le principe d'étalement de spectre sur lequel s'appuie le CDMA. Nous verrons ensuite les codes d'étalement utilisés dans le processus d'étalement. Pour terminer, nous évoquerons les principales caractéristiques du canal de propagation.

2.2.1 Techniques de base

Parmi les méthodes d'accès de base, le FDMA représente la technique la plus utilisée dans les réseaux mobiles de première génération. Avec cette méthode, le spectre est divisé en plusieurs canaux radio avec une largeur de bande (LB) fixée comme illustré à la figure 2.2. Quand un usager désire effectuer un appel, un des canaux est alors exclusivement alloué à cet usager pendant toute la durée de la communication. Cette technique s'applique principalement aux signaux analogiques.

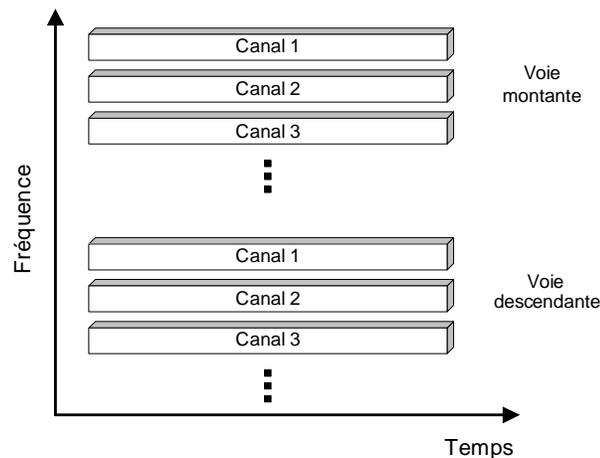


FIG. 2.2 – Accès multiple par répartition de fréquences (FDMA)

Le TDMA est surtout utilisé dans les systèmes de deuxième génération, tels que le GSM ou le IS-136 (appelé aussi *Digital AMPS*) [30]. Par cette technique, une même bande de fréquences est partagée par un certain nombre d'utilisateurs qui se voient attribués un intervalle (*slot*) de temps unique, comme le montre la figure 2.3. Dans le cas de la norme européenne GSM, chaque canal de 200 kHz est divisé en huit tranches de temps, tandis que selon la norme américaine IS-136, chaque canal de 30 kHz est divisé en trois tranches de temps. Ces systèmes permettent d'avoir, dans des conditions réelles d'utilisation, une capacité en terme de nombre d'utilisateurs 3 à 6 fois supérieure à celle des systèmes qui se basent sur le FDMA [30].

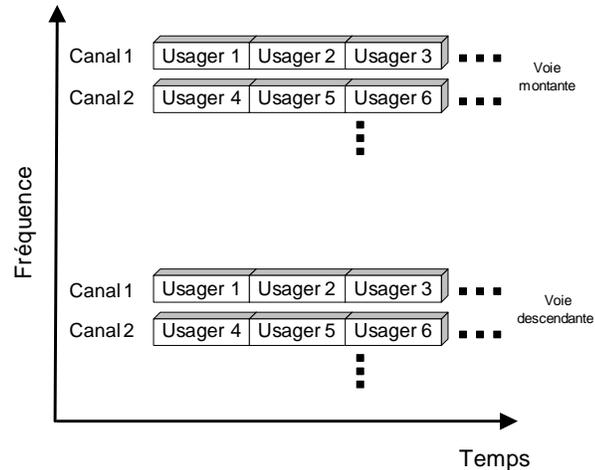


FIG. 2.3 – Accès multiple par répartition dans le temps (TDMA)

Quant au CDMA, elle constitue une méthode d'accès où tous les utilisateurs partagent la même bande de fréquences comme illustré à la figure 2.4. La technique d'étalement de spectre est utilisée pour affecter à chaque utilisateur un code, ou séquence, unique qui détermine les fréquences et la puissance utilisées. Le signal contenant l'information de l'émetteur est modulé avec la séquence qui lui est attribuée, ensuite le récepteur recherche la séquence en question. En isolant toutes les séquences provenant des autres utilisateurs (qui apparaissent comme du bruit), le signal original de l'utilisateur peut alors être extrait.

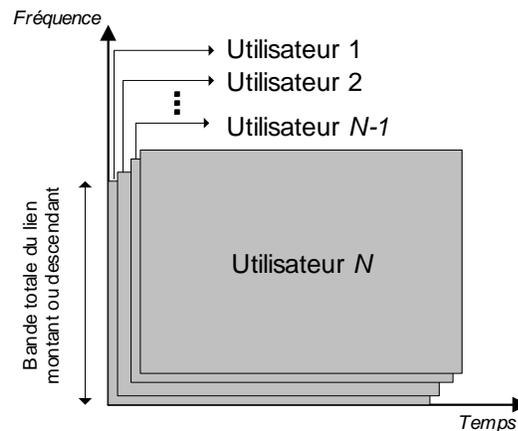


FIG. 2.4 – Méthode d'accès multiple à répartition de codes (CDMA)

Parmi les techniques à étalement de spectre, on peut citer le FH-CDMA (*Frequency Hopping CDMA*) et le DS-CDMA (*Direct-Sequence CDMA*). Le FH-CDMA consiste à étaler le spectre par des sauts de fréquences. Cependant, cette technique n'étant pas utilisée dans le système UMTS, son étude est peu pertinente dans le cadre de notre recherche. Il est donc recommandé de se référer à [26] pour plus de détails. Quant au

DS-CDMA, appelé aussi « CDMA à séquences directes », il est à la base du processus d'étalement de spectre dans le standard WCDMA.

2.2.2 Étalement de spectre par séquences directes

Dans ce type d'étalement de spectre, le signal d'information est directement modulé par une séquence ou code appelé « code d'étalement ». La figure 2.5 illustre le fonctionnement de cette technique ; la figure 2.5a montre les principaux éléments d'un émetteur DS-CDMA. Parmi ces éléments, on trouve principalement un générateur de

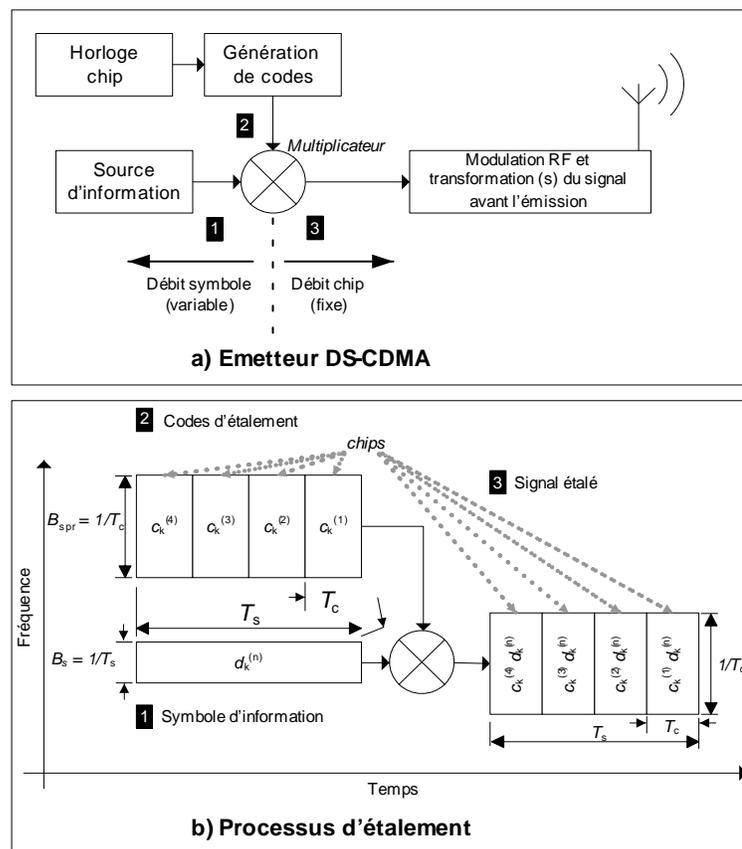


FIG. 2.5 – (a) Émetteur d'un système DS-CDMA et (b) processus d'étalement

codes d'étalement et un « multiplicateur ». Le code généré constitue une séquence de longueur fixe dont chaque élément constitue un « chip ».

Le processus d'étalement est illustré dans la figure 2.5b, qui montre le code d'étalement du k -ième utilisateur qui est représenté par la séquence de chips $c_k^{(p)}$, où $p = 1, 2, 3, \dots, M$ et où M représente la longueur du code ($M = 4$ dans cet exemple). Chaque

chip a une durée T_c et une amplitude égale à $+1$ ou -1 . Le débit avec lequel varie l'information étalée est appelé débit chip (ou *chip rate*) que l'on notera B_{spr} . Ce débit est égal à $1/T_c$, exprimé en chips par seconde (cps).

D'autre part, le n -ième symbole du message d'information¹ de l'utilisateur k est noté $d_k^{(n)}$, où $n = 1, 2, \dots$. Ainsi, et de manière similaire, nous pouvons aussi noter la durée de chaque symbole par T_s , à partir de laquelle nous pouvons également formuler le débit symbole $B_s = 1/T_s$ exprimé en symboles par seconde (sps). Il est important de constater que ce débit symbole est variable dans un système DS-CDMA, car il dépend du service offert (voix, vidéo ou données), tandis que le débit chip B_{spr} est constant et fixé à 3.84 Mcps (Millions de chips par seconde).

Le rapport entre le débit du signal étalé et le débit du signal non étalé est appelé facteur d'étalement SF (*Spreading Factor*). Il représente une propriété importante de l'étalement de spectre et s'exprime par :

$$SF = \frac{B_{spr}}{B_s} = \frac{1/T_c}{1/T_s} = \frac{T_s}{T_c} \quad (2.1)$$

Par conséquent, le facteur d'étalement dans un système DS-CDMA est égal au nombre de chips utilisés pour étaler un symbole d'information.

Après la génération des codes, le processus d'étalement se déroule simplement en multipliant le message par $+1$ ou -1 . Selon la figure 2.5b, il apparaît clairement que $T_s > T_c$, d'où $B_{spr} > B_s$. On comprend alors comment on passe d'un signal à bande étroite vers un signal à large bande. Finalement, le signal subit une modulation en fréquence et il est mis sur une fréquence porteuse avant d'être envoyé.

Au niveau de la réception, il suffit de reprendre la chaîne dans l'ordre inverse, notamment en démodulant dans un premier temps le signal reçu, pour ensuite le multiplier par le même code d'étalement utilisé lors de l'émission. À la suite de cette multiplication, nous obtiendrons le message d'information « désétalé » (exprimé en débit symbole). Toutefois, il doit y avoir une parfaite synchronisation entre le récepteur et l'émetteur pour pouvoir désétaler correctement le signal d'information.

¹Nous utiliserons l'appellation symbole au lieu de bit, car en pratique, l'étalement est appliqué sur le signal d'information après avoir subi une modulation numérique. Un symbole comporte généralement une information de phase et d'amplitude, alors qu'un bit contient seulement une information d'amplitude.

2.2.3 Codes d'étalement

Le choix des codes d'étalement est dicté par leurs propriétés de corrélation, et plus précisément par leurs propriétés d'autocorrélation et d'intercorrélation [26]. Du point de vue statistique, l'autocorrélation est une mesure de la correspondance entre un code et une version décalée de celui-ci. Soit le code c_i de longueur M tel que $c_i = [c_i(0), c_i(1), \dots, c_i(M-1)]$. On définit sa fonction d'autocorrélation $R_{c_i}(t)$ de la manière suivante :

$$R_{c_i}(t) = \sum_{k=0}^{M-1-t} c_i(k)c_i(k+t) \quad (2.2)$$

Par ailleurs, l'intercorrélation représente le degré de correspondance entre deux codes différents. L'expression mathématique de la fonction d'intercorrélation $R_{c_i c_j}(t)$ de deux codes c_i et c_j de longueur M s'écrit :

$$R_{c_i c_j}(t) = \sum_{k=0}^{M-1-t} c_i(k)c_j(k+t) \quad (2.3)$$

où $c_i = [c_i(0), c_i(1), \dots, c_i(M-1)]$ et $c_j = [c_j(0), c_j(1), \dots, c_j(M-1)]$. On suppose que les chips dans les expressions 2.2 et 2.3 prennent des « +1 » ou des « -1 » comme valeurs. Cette notation, appelée « notation polaire », est utilisée pour effectuer les corrélations à l'aide de simples additions arithmétiques. Ainsi, les 1 sont représentés par des -1 et les 0 par des +1. Cette représentation sera utilisée par la suite sans perte de généralité.

Dans un contexte d'accès multiple, on peut comprendre intuitivement l'utilité que représentent des codes caractérisés par une autocorrélation qui satisfait $R_{c_i}(t) = 0$ pour $t \neq 0$, avec $R_{c_i}(0) = M$ et par une fonction d'intercorrélation nulle : $R_{c_i c_j}(t) = 0$ pour tout t . En effet, les codes ayant une fonction d'intercorrélation nulle simplifieraient la tâche de l'émetteur et du récepteur qui pourraient communiquer via un même code tout en faisant abstraction des autres utilisateurs qui transmettent dans le même temps, sur la même fréquence, mais avec des codes distincts. Par ailleurs, si la fonction d'autocorrélation est nulle pour $t \neq 0$, l'interférence causée par les trajets multiples, que pourrait prendre le signal, peut être annulée.

Si la fonction d'intercorrélation entre deux codes différents c_i et c_j satisfait $R_{c_i c_j}(0) = 0$, on dit que les deux codes sont orthogonaux. Dans le cas où les codes ne sont pas complètement orthogonaux, un « résidu » d'intercorrélation apparaît entre le code de l'utilisateur qui nous intéresse et celui des autres utilisateurs dans la cellule. Ce résidu donne lieu à une forme d'interférence, très peu appréciée par les concepteurs des réseaux à base de CDMA qu'on appelle « interférence d'accès multiple » MAI (*Multiple Access*

Interference). Cette dernière est d'autant plus gênante que la puissance d'émission des autres utilisateurs est mal réglée.

Dans la plupart des systèmes de réseaux mobiles fondés sur le DS-CDMA, les codes utilisés pour effectuer le processus d'étalement sont de deux types : les codes de Walsh-Hadamard et les codes « pseudo-aléatoires ». Les codes orthogonaux utilisés en DS-CDMA sont choisis d'après un ensemble de fonctions proposées par Walsh [26]. Il existe plusieurs manières de générer les séquences de Walsh [20]. La génération par des matrices de Hadamard est l'une des plus courantes. Ces matrices, toujours carrées, peuvent être générées de la manière récursive suivante :

$$H_{2M} = \begin{bmatrix} H_M & H_M \\ H_M & -H_M \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

où $-H_M$ contient les mêmes éléments que H_M , mais avec le signe inversé (les « +1 » sont changés par des « -1 » et *vice versa*) et M est une puissance de 2. Par exemple, si l'on veut obtenir quatre codes orthogonaux c_1, c_2, c_3, c_4 , il faudra générer une matrice de Hadamard d'ordre 4. On a donc d'après 2.4 :

$$H_1 = [1], H_2 = \begin{bmatrix} +1 & +1 \\ +1 & -1 \end{bmatrix}, H_4 = \begin{bmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

où $c_1 = [+1 \ +1 \ +1 \ +1]$, $c_2 = [+1 \ -1 \ +1 \ -1]$, $c_3 = [+1 \ +1 \ -1 \ -1]$ et $c_4 = [+1 \ -1 \ -1 \ +1]$.

Afin de mieux comprendre l'utilisation des codes d'étalement en DS-CDMA, nous allons prendre un exemple¹ simple où une station de base communique, sur la voie descendante, avec deux utilisateurs présents dans la cellule comme le montre la figure 2.6. Les codes orthogonaux $c_1 = [+1 \ -1 \ +1 \ -1]$ et $c_2 = [+1 \ +1 \ -1 \ -1]$ sont utilisés pour distinguer les deux utilisateurs. Ces codes étalent respectivement les symboles d'information de l'utilisateur 1 et de l'utilisateur 2.

On va supposer que l'information que l'on souhaite transmettre à l'utilisateur 1 est contenue dans les symboles notés $d_1^{(1)} = +0,9$ et $d_1^{(2)} = -0,7$, tandis que celle de l'utilisateur 2 est comprise dans $d_2^{(1)} = -0,8$ et $d_2^{(2)} = +0,6$. La figure 2.7 illustre le processus d'étalement des messages représentés par les symboles $d_1^{(n)}$ et $d_2^{(n)}$ et montre aussi la forme des signaux dans chacun des points numérotés dans la figure 2.6.

¹Soulignons que cet exemple est purement didactique et ne prend pas en compte les imperfections du modulateur et du démodulateur RF.

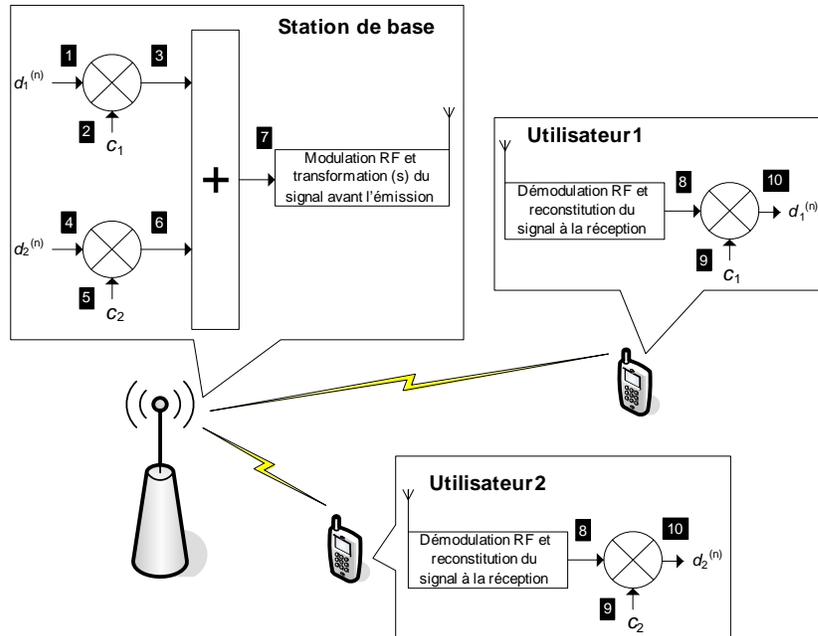


FIG. 2.6 – Accès multiple dans un système DS-SS avec deux utilisateurs

On peut voir sur la figure 2.7 que l'étalement de spectre a lieu en multipliant tout simplement les symboles d'information par les codes respectifs de chaque utilisateur. Il faut noter aussi que le signal total transmis par la station de base est la somme arithmétique des « chips » issus du processus d'étalement effectué pour chaque utilisateur (point 7).

À la réception, chaque terminal mobile est muni des éléments nécessaires pour récupérer le message d'information qui lui correspond : à savoir les tâches principales que le récepteur de chaque mobile doit accomplir sont, dans notre exemple, le passage en bande base du signal RF et le traitement du signal qui en résulte pour extraire l'information. Cette dernière tâche s'effectue en deux étapes. D'abord, les chips qui constituent le signal reçu sont multipliés un par un par les chips du code qui identifie l'utilisateur. Il faut noter que dans une phase qui précède l'échange d'information entre le mobile et la station de base, cette dernière communique au mobile le code d'étalement à utiliser. Ensuite, les chips sont additionnés sur la longueur M (4 dans cet exemple) de la taille du code d'étalement de manière similaire à l'addition arithmétique effectuée au niveau de l'émission. Cette opération de multiplication et d'addition n'est autre que la corrélation entre le code assigné au mobile et le signal reçu. Le dispositif matériel qui la réalise est appelé « corrélateur » [26].

Le deuxième type de codes utilisés dans le processus d'étalement sont les codes *pseudo-aléatoires*. Comme leur nom l'indique, ces codes ne sont pas complètement aléa-

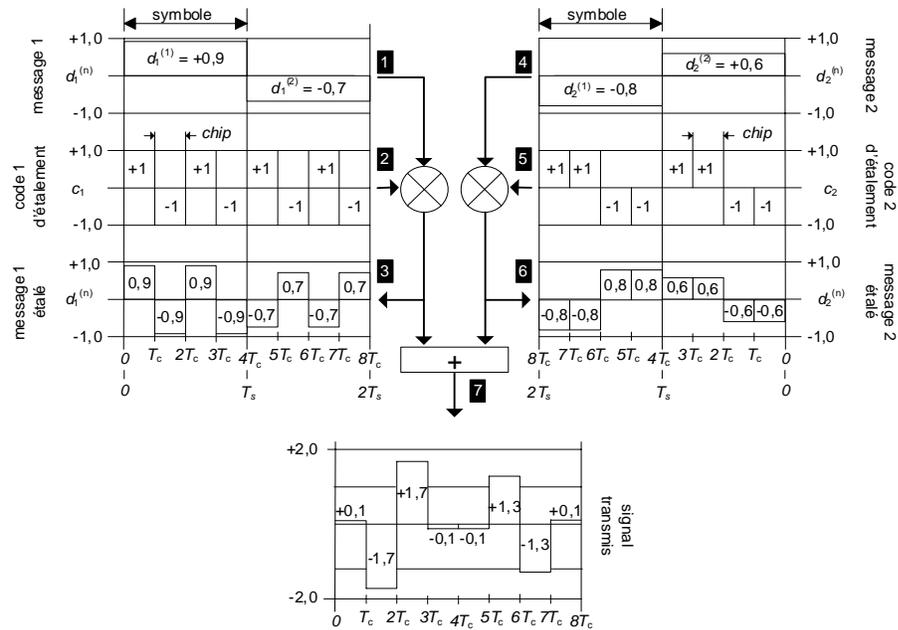


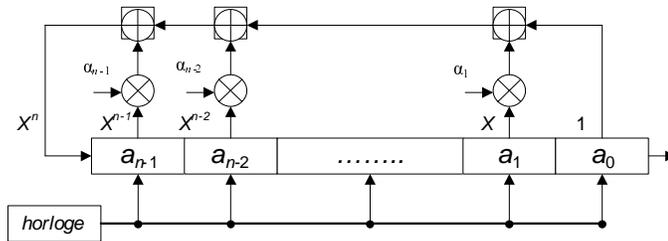
FIG. 2.7 – Exemple d'accès multiple DS-SS-CDMA avec 2 utilisateurs suivant la figure 2.6 : signal transmis par la BS

toires, car il est possible de les régénérer à la réception pour récupérer l'information transmise, pourvu que l'émetteur et le récepteur soient parfaitement synchronisés [26]. Un registre à décalage binaire, comme celui décrit à la figure 2.8, représente l'une des manières les plus courantes pour générer des codes pseudo-aléatoires. Son fonctionnement est le suivant : une fois que les différents états du registre sont initialisés, le bit en sortie est calculé à chaque coup d'horloge en additionnant en modulo 2 tous les bits présents à chaque état. Les bits sont ensuite décalés de manière circulaire pour réinitialiser les états et calculer le bit en sortie suivant.

Ce registre, appelé LFSR (*Linear Feedback Shift Register*), est dit périodique car, quelles que soient les valeurs initiales (les valeurs prises par a_i), on retrouve ces mêmes valeurs après un nombre fini de temps d'horloge. Puisque le registre comprend n états représentés par les valeurs (binaires) de a_i , 2^n codes pseudo-aléatoires sont possibles. Il en résulte aussi que la période de la séquence n'est jamais supérieure à 2^n [26].

Le nombre maximum d'états possibles (différents de 0) est de $P = 2^n - 1$. Une séquence binaire de période P , générée par un registre à décalage de type LFSR, est appelée « m-séquence » ou encore, séquence à longueur maximale (*maximal length sequence*). On peut noter sur la figure 2.9 que le générateur des m-séquences peut être représenté suivant une notation polynomiale [26] :

$$f(X) = X^n + \alpha_{n-1}X^{n-1} + \alpha_{n-2}X^{n-2} + \dots + \alpha_1X + 1 \quad (2.6)$$


 FIG. 2.8 – Schéma générique d'un registre à décalage à n états

où les coefficients α_i peuvent prendre deux valeurs 1 ou 0. Ainsi, lorsqu'il y a une connexion physique, $\alpha_i=1$ et lorsque $\alpha_i=0$, il n'y a pas de connexion. Le polynôme irréductible générant une m-séquence est appelé « primitif ».

Étant donné les propriétés d'intercorrélation assez médiocres entre deux m-séquences [28], un autre type de codes a été proposé du nom de « codes de Gold » afin d'améliorer les propriétés d'intercorrélation, tout en étant capable de générer un nombre plus important de codes avec les mêmes propriétés pseudo-aléatoires. A titre d'exemple, nous allons voir comment sont générés les codes de Gold à partir de deux m-séquences dont les polynômes générateurs sont $x = X^5 + X^2 + 1$ et $y = X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$. La figure 2.9 illustre les registres à décalage respectifs et leur mode d'interconnexion pour générer les $2^5 + 1 = 33$ codes de Gold correspondants. Les valeurs de a_4, a_3, a_2, a_1 et a_0 ont été initialisées à 1. Le code généré par la m-séquence 1 reste fixe tandis que le code 2, issu de la m-séquence 2, est décalé vers la droite.

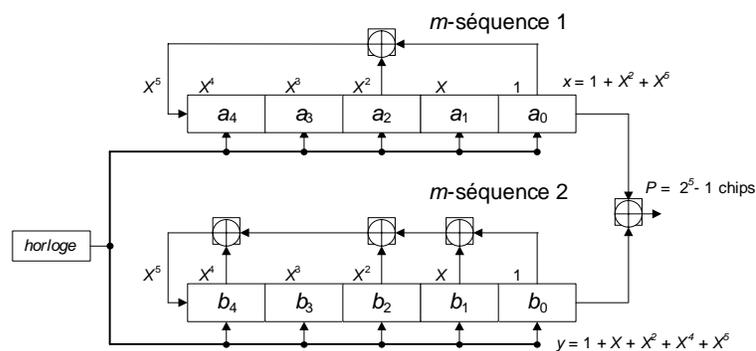


FIG. 2.9 – Exemple de génération des codes de Gold

2.2.4 Caractéristiques du canal de propagation

Le canal de propagation peut affecter les performances de tout système de radiocommunication à base de CDMA, car il engendre des dégradations sur le signal transmis.

Afin de choisir les techniques de traitement de signal appropriées qui seront mises en œuvre dans la chaîne d'émission et de réception, il faut définir les caractéristiques du canal de propagation. Les propriétés du canal sont également déterminantes pour le dimensionnement du réseau mobile, notamment au moment de la constitution du bilan de liaison [19].

Le bruit thermique et les interférences provoquées par les utilisateurs, qu'elles soient situées dans la même cellule (interférence intracellulaire) ou dans des cellules voisines (interférence intercellulaire), génèrent des perturbations d'une part. D'autre part, le signal transmis doit aussi faire face aux pertes de propagation dues à la distance, aux atténuations induites par les obstacles qu'il trouve sur son parcours et aux évanouissements suscités par l'existence de trajets multiples [26]. La figure 2.10 schématise l'ensemble de ces phénomènes.

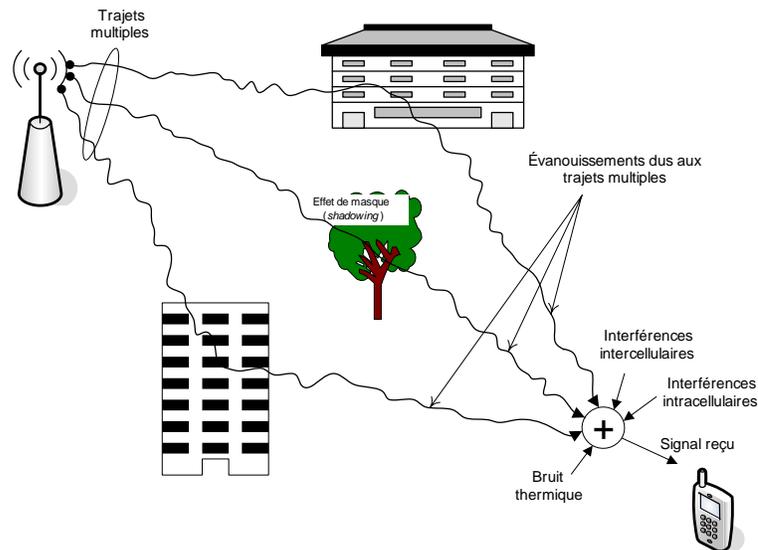


FIG. 2.10 – Modélisation du canal de propagation dans un réseau DS-CDMA

D'une manière générale, le phénomène qui se traduit par une variation de la puissance du signal mesurée à la réception, en fonction du temps ou de la distance qui sépare l'émetteur du récepteur, est connu sous le nom d'« évanouissement » ou *fading*. D'après cette définition, on peut classer les différents modèles de propagation en deux catégories : « évanouissement à long terme » et « évanouissement à court terme », illustrés à la figure 2.11 [26].

Les évanouissements à long terme se manifestent lorsque la distance qui sépare l'émetteur du récepteur est importante (de quelques dizaines à quelques milliers de mètres). En pratique, ces évanouissements sont modélisés d'après des équations qui déterminent « l'affaiblissement de parcours » ou *path-loss* [31]. En présence d'obstacles,

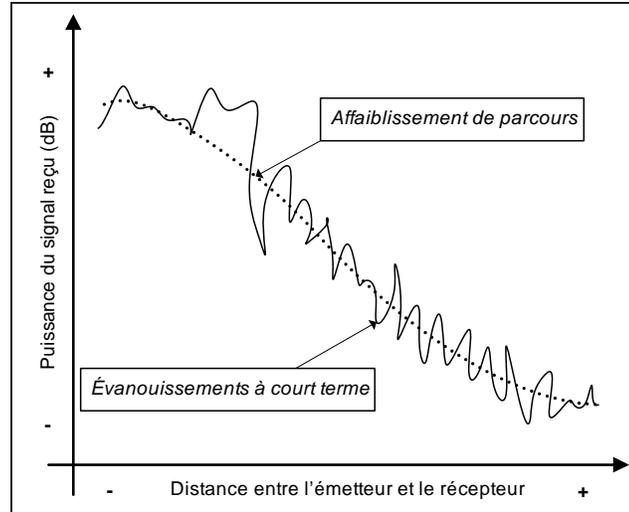


FIG. 2.11 – Effets combinés des évanouissements à court et à long termes

comme les arbres ou les immeubles, apparaît le phénomène appelé « effet de masque » ou *shadowing*. Ce phénomène est connu sous le nom d'évanouissement à moyen terme.

Les modèles qui considèrent la distance comme seul facteur de l'atténuation de parcours deviennent rapidement limités dans des conditions plus réalistes où il faudra tenir compte, entre autres, des caractéristiques du terrain et du phénomène de diffraction. Selon que l'environnement de propagation est intérieur (*indoor*) ou extérieur (*outdoor*), d'autres modèles devront être utilisés pour quantifier de manière plus précise les évanouissements à long terme [31].

2.3 Présentation du système UMTS

L'UMTS est un réseau mobile de troisième génération capable d'offrir des bénéfices significatifs à l'utilisateur en terme de services à valeur ajoutée, tels que l'accès Internet à haute vitesse, le téléchargement de fichiers (audio et vidéo) ou alors la visiophonie. Le système universel UMTS a été choisi dans le but de faire une distinction avec les systèmes de première et de deuxième génération qui sont considérés comme des systèmes axés principalement sur le service de la voix. Dans cette section, nous allons présenter les catégories de services pouvant être offerts par un réseau UMTS. Puis, nous verrons son architecture en général et son réseau d'accès en particulier. Nous verrons également les couches de protocoles radio de l'interface d'accès ainsi que la description des canaux de transport. Pour terminer, nous détaillerons le fonctionnement de la couche physique, qui fait intervenir des canaux physiques spécifiques.

2.3.1 Services offerts

Standardiser un nouveau service requiert généralement une modification des spécifications techniques, procédé long et ardu qui peut représenter un frein à l'innovation et à la standardisation de services. Par conséquent, dans l'UMTS, on standardise uniquement certains services afin de préserver une continuité dans l'offre et on donne les moyens aux opérateurs et aux fournisseurs de services de développer et de personnaliser leurs propres services. Les services standardisés en UMTS regroupent les :

- services support (*bearer services*);
- télé-services (*remote services*);
- services supplémentaires.

Un service support est une sorte de « tuyau » que l'opérateur du réseau mobile met à la disposition de l'abonné pour transmettre de l'information entre deux points. Il joue un rôle fondamental dans le réseau en transportant l'information liée au service (voix, données, vidéo...) et à la signalisation. Les télé-services proposent une offre complète pour la transmission d'information en incluant les fonctions de l'équipement terminal. On peut citer, par exemple, la transmission de la voix (téléphonie et appels d'urgence), le service de messages courts SMS (*Short Message Service*), la transmission de fax ou alors des services de voix groupés (communication en groupe, voix en diffusion). Les services supplémentaires sont toujours proposés en association ou comme complément à un service support ou à un télé-service. Ils offrent la possibilité de personnaliser les services support et les télé-services, en apportant des fonctionnalités additionnelles [1]. Un même service supplémentaire peut être proposé en association avec des services support ou des télé-services différents. Parmi ces services, nous pouvons citer le renvoi d'appel, le transfert d'appel, le rappel automatique, etc.

Chaque service support est caractérisé par un certain nombre d'attributs qui concernent, entre autres, le débit, le temps qu'il met pour acheminer l'information d'un bout à l'autre, le taux d'erreur qu'il garantit, etc. Tous ces paramètres doivent être choisis pour que le service support soit le plus adapté possible, car la qualité finale du service offert, appelée QoS (*Quality of Service*), en dépend. La QoS regroupe une série de caractéristiques quantitatives et qualitatives qui permettent au destinataire de considérer que la qualité du service est satisfaisante. A chaque service correspond une QoS particulière. Aussi, les services support doivent-ils être choisis en conséquence [2].

Les caractéristiques du service support sont choisies pour chaque télé-service ou application en fonction de la QoS que ces services ou applications requièrent. Ainsi, un service support pourra être caractérisé en fonction de la capacité du réseau pour

le transfert de l'information et de la qualité de l'information une fois transférée. Ces paramètres sont spécifiés ou négociés lors de l'établissement de la communication et il est possible de les modifier de manière dynamique au cours de celle-ci.

Le transfert de l'information fait référence à la capacité du réseau à acheminer différents types d'information entre deux ou plusieurs points. La qualité de l'information transférée entre deux ou plusieurs points peut être quantifiée en fonction d'un nombre limité de paramètres :

- le délai maximum toléré pour le transfert de l'information ;
- les variations du délai ;
- le débit binaire ;
- le taux d'erreur binaire.

La maîtrise des variations du délai est fondamentale pour offrir des services en temps réel. Le taux d'erreur binaire BER (*Bit Error Rate*) mesure le rapport entre le nombre de bits d'informations erronés et le nombre total de bits transmis. Le débit représente la quantité d'information transmise entre deux points par intervalle de temps et que l'on mesure en bits par seconde (bps).

En conclusion, l'application doit indiquer ses besoins en termes de QoS au réseau UMTS. Plus précisément, elle doit spécifier les attributs du service support requis : le type de trafic (temps réel ou non), les caractéristiques du trafic (point à point, point à multipoint), le délai de transfert maximum, les variations du délai et le taux d'erreur.

Nous allons donner quelques exemples de services que l'UMTS peut offrir suivant un découpage par « classes » qui dépendent de la QoS désirée. Ces classes de services sont résumées dans le tableau 2.3 et définies comme suit :

- a) **Services conversationnels** : les services de cette catégorie permettent de transmettre principalement du son et des images entre deux personnes ou groupes de personnes. Leur qualité est donc assez sensible à des délais dans la transmission, ces délais pouvant être facilement perceptibles par les utilisateurs. Parmi ces services, nous pouvons citer la téléphonie en mode circuit, la téléphonie en mode paquet utilisant le protocole VoIP (*Voice over IP*) et la vidéophonie [30]. Néanmoins, cette dernière est moins tolérante aux erreurs que la téléphonie et requiert généralement un débit plus important ;
- b) **Services interactifs** : ce type de service est caractérisé par le fait que le terminal ayant envoyé un message/commande attend une réponse du destinataire dans un certain intervalle de temps. Par conséquent, un paramètre clé pour identifier

la QoS des services interactifs est le temps d'aller-retour, c'est à dire le temps écoulé entre le moment où le message/commande est émis et celui où la réponse arrive. Comme exemple, nous pouvons citer le commerce électronique ainsi que les services de localisation qui se développent de plus en plus ;

Service	Délai	Exemples d'application	Débit	Tolérant à des erreurs
Conversationalnel (temps réel)	<< 1 s	Téléphonie	28.8 kbps	Oui
		Vidéophonie	32-384 kbps	Oui
Interactif	environ 1 s	Commerce électronique	Non garanti	Non
		Services de localisation	Non garanti	Non
Streaming	< 10 s	Audio/vidéo haute qualité	32-128 kbps	Oui
Arrière-Plan (<i>Background</i>)	> 10 s	Fax	Non garanti	Oui
		E-mail	Non garanti	Non

TAB. 2.3 – Classes de services de l'UMTS

- c) **Services *streaming*** : on retrouve dans cette classe les services qui traitent l'information au niveau du terminal de façon continue, c'est à dire au moment même où elle est reçue (avant de la recevoir dans sa totalité). Ce type de service est unidirectionnel. Ces services sont assez récents et offrent un potentiel d'application assez vaste. Le streaming audio et vidéo sont des exemples d'applications typiques. À la différence des services conversationnels, les services de type streaming sont assez asymétriques (on ne reçoit pas au même débit que l'on émet) et on peut tolérer dans ce cas des délais importants ;
- d) **Services en arrière-plan** : il existe des services qui ne posent, ou presque, aucune contrainte de temps dans le transfert de l'information qu'ils génèrent. Ils peuvent s'exécuter en « arrière-plan » (*background*). Parmi ces services, nous pouvons trouver l'envoi d'un courrier électronique, d'un message court SMS ou alors le téléchargement d'un fichier. Le paramètre pour quantifier la QoS de ce type de ce service est principalement le taux d'erreurs qui doit être souvent assez faible.

2.3.2 Architecture

Le réseau UMTS repose sur une architecture flexible et modulaire. Cette architecture n'est associée ni à une technique d'accès radio, ni à un ensemble de services, ce qui

assure sa compatibilité avec d'autres réseaux mobiles et garantit son évolution. Une telle architecture, illustrée à la figure 2.12, est composée de trois « domaines » : le domaine de l'équipement de l'utilisateur UE (*User Equipment*), celui du réseau d'accès radio « universel » UTRAN (*Universal Terrestrial Radio Access Network*) et celui du réseau cœur CN (*Core Network*) [26]. Chaque domaine réalise une fonction bien précise dans

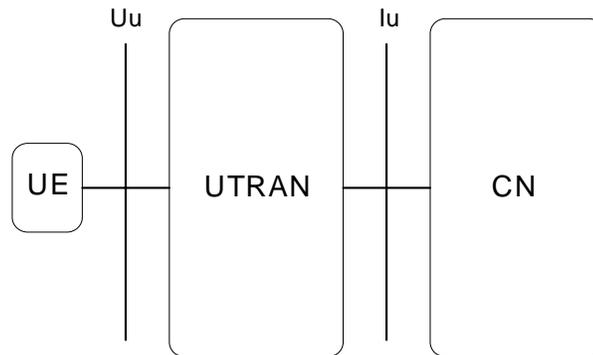


FIG. 2.12 – Architecture générale du réseau UMTS

le réseau, tandis que des points d'échange, dénotés par Uu et Iu , servent d'interfaces permettant les échanges entre les différentes parties du réseau.

Le domaine UE comprend tous les équipements terminaux et permet à l'abonné l'accès à l'infrastructure et à ses services par le biais de l'interface Uu . Le réseau cœur regroupe l'ensemble des équipements assurant les fonctions tels que le contrôle des appels, le contrôle de la sécurité et la gestion de l'interface avec les réseaux externes. Le CN dépassant le cadre de notre étude, les détails de cette partie du réseau peuvent être trouvés dans [30]. Enfin, l'UTRAN fournit à l'UE les ressources radio et les mécanismes nécessaires pour accéder au réseau cœur. Il contrôle les fonctions liées à la mobilité et à l'accès au réseau.

Comme illustré à la figure 2.13, l'UTRAN constitue le trait d'union entre l'UE et le réseau cœur. Il est composé d'un ensemble de sous-systèmes nommés RNS (*Radio Network Subsystem*). Le RNS est un sous-système de l'UTRAN constitué d'un contrôleur RNC (*Radio Network Controller*) et d'une ou plusieurs stations de base, appelées Node B¹. Les RNS peuvent être connectés entre eux grâce à l'interface Iur . Le RNC commande plusieurs stations de base via l'interface Iub . Il est responsable de la gestion des ressources radio de l'ensemble des Node B sous son contrôle, sachant que chaque Node B ne peut être associé qu'à un seul RNC.

¹Tout au long de notre travail, les termes « Node B » et « station de base » feront référence au même équipement.

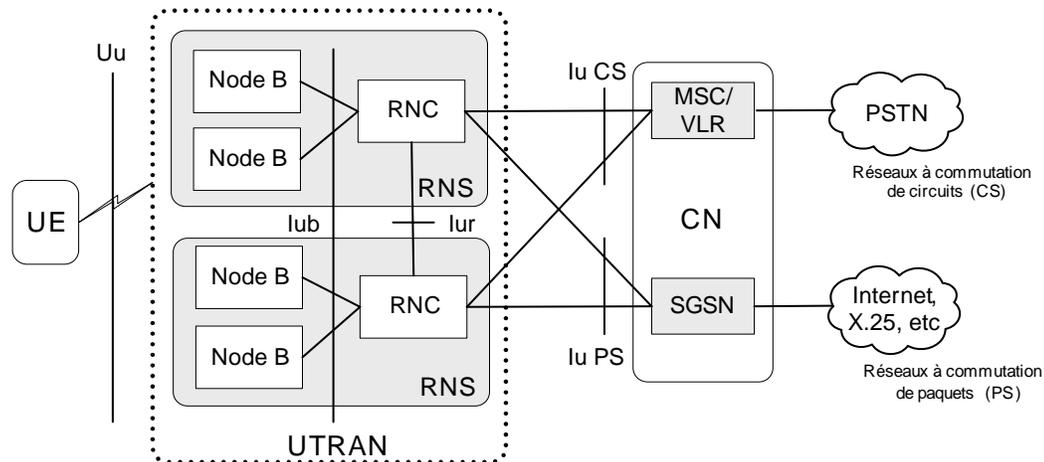


FIG. 2.13 – Éléments du réseau d'accès UTRAN

Quant au Node B, il assure la transmission et la réception d'informations entre l'UTRAN et un ou plusieurs équipements usagers. Parmi ses fonctions, on peut citer le contrôle de puissance. En effet, la puissance d'émission de l'UE est contrôlée systématiquement pour lui assurer la même qualité de service indépendamment de sa position dans le réseau. Cela permet également d'accroître l'autonomie de la batterie tout en évitant d'augmenter inutilement le niveau d'interférence dans la cellule.

Par ailleurs, l'interface *Iu* se décline, du point de vue fonctionnel, en deux interfaces « *Iu CS* » et « *Iu PS* ». La première permet au RNC de communiquer avec le MSC/VLR (*Mobile Switching Center/Visitor Location Register*), c'est à dire avec la partie du réseau qui gère les services à commutation de circuits, tandis que l'interface *Iu PS* permet au RNC de communiquer avec le SGSN (*Serving GPRS Support Node*), la partie du réseau qui gère les services à commutation de paquets [30]. L'ensemble de ces interfaces sont « ouvertes »¹ et permettent par conséquent de faire dialoguer entre eux des équipements fournis par des constructeurs différents. Ceci offre aux opérateurs des degrés de liberté supplémentaires dans le choix de leurs fournisseurs d'équipements de réseaux.

L'architecture du réseau UMTS dans sa première version est similaire à celle du GSM [26]. Ce choix d'architecture a été dicté, d'une part, par le souci des opérateurs européens de réutiliser les investissements lourds, déjà effectués pour le déploiement du GSM et qui n'étaient pas encore rentabilisés, et d'autre part, par la volonté de finaliser très rapidement la première version des spécifications (Release 99). Par conséquent, l'architecture modulaire de l'UMTS rend possible l'interconnexion de son réseau avec

¹Non propriétaires, dénoté en anglais par le terme *open*.

des systèmes d'accès radio autres que l'UTRAN, tel que le GSM/EDGE ou encore l'HIPERLAN 2 [26].

2.3.3 Couches de protocoles radio de l'interface d'accès

Dans le but de comprendre les fonctions de l'interface d'accès au réseau UTRAN, nous allons décrire les protocoles de communication mis en œuvre sur l'interface entre un terminal mobile et le réseau d'accès radio du système UMTS. On pourra distinguer sur cette interface radio trois couches principales de protocoles illustrées à la figure 2.14 [26] :

- la couche physique (couche 1) ;
- la couche de liaison de données (couche 2) ;
- la couche de contrôle de la ressource radio RRC (*Radio Resource Control*).

La couche 2 est elle-même composée aussi de quatre sous-couches :

- la sous-couche MAC (*Medium Access Control*) ;
- la sous-couche RLC (*Radio Link Control*) ;
- la sous-couche PDPC (*Packet Data Convergence Protocol*) ;
- la sous-couche BMC (*Broadcast/Multicast Control*).

La figure 2.14 montre l'architecture en couches des protocoles dans la strate d'accès [3]. Nous pouvons noter, sur cette figure, le découpage vertical en « plan de signali-

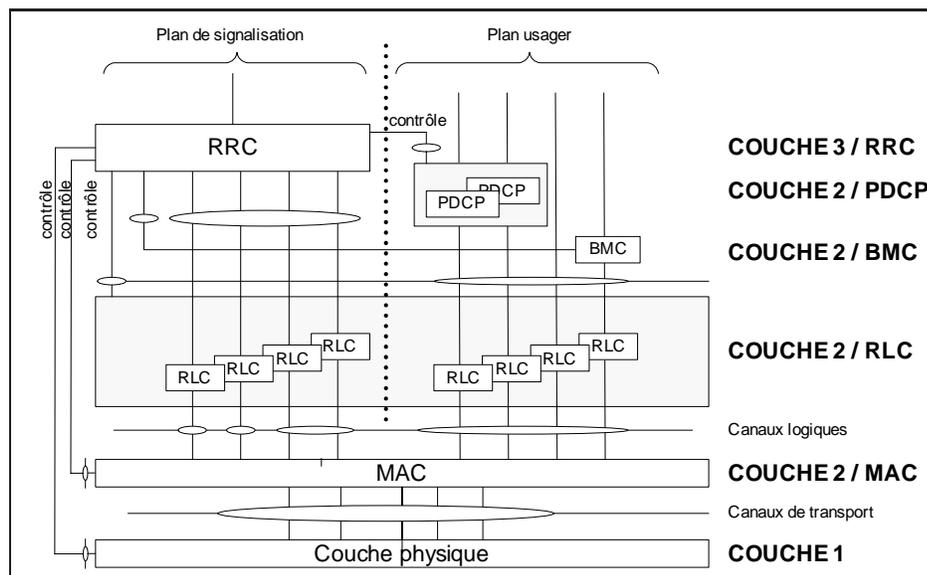


FIG. 2.14 – Couches de protocoles de l'interface radio

sation » et en « plan usager » supportant respectivement le transfert des messages de

signalisation entre le mobile et le réseau, et le transfert des données utilisateurs. Les lignes « contrôle » entre la couche RRC et chacune des autres couches matérialisent le fait que RRC assure le contrôle de la configuration de toutes les couches inférieures.

2.3.4 Description des canaux de transport

Le concept de canal se décline sur l'interface radio UMTS en trois types différents : les canaux logiques, les canaux de transport et les canaux physiques. Étudier un sous-système radio revient à étudier les fonctionnalités de la couche physique ainsi que les interactions que celle-ci peut avoir avec les couches supérieures. Par conséquent, notre intérêt se portera, de façon générale, sur les canaux de transport et plus particulièrement sur les canaux physiques qui seront définis lors de la description des procédures de la chaîne de transmission au niveau de la couche physique.

Un canal de transport est un service offert par la couche physique à la couche MAC pour le transfert d'informations. Ces canaux peuvent être classés en trois catégories : les canaux communs, les canaux partagés et les canaux dédiés [26]. Un canal commun est un canal point à multipoint unidirectionnel utilisée pour le transfert d'informations d'un ou de plusieurs UE. On peut trouver six types de canaux communs détaillés dans [3]. Il existe un seul type de canal partagé spécifié dans la R99 : le DSCH¹ (*Downlink Shared CHannel*). C'est un canal utilisé uniquement sur la voie descendante en association avec un ou plusieurs canaux dédiés. Il est partagé dynamiquement par différents utilisateurs et transporte des données de contrôle ou de trafic. Un canal dédié est un canal point à point dédié à un seul UE. Le DCH (*Dedicated CHannel*) est le seul type de canal spécifié dans la R99. Ce type de canal existe dans les deux sens de la liaison et transporte des données.

Comme illustré à la figure 2.15, il existe une correspondance (*mapping*) entre les canaux de transport et les canaux physiques [4]. Dans le cadre de cette recherche, nous nous limiterons aux canaux qui interviendront dans la chaîne de transmission et dont les paramètres seront pertinents pour notre implémentation. Ces canaux seront définis et détaillés au fur et à mesure que les fonctions de la couche physique seront étudiées.

¹Un autre canal de transport, introduit lors de la Release 5, sera étudié au chapitre suivant sur la technologie HSDPA.

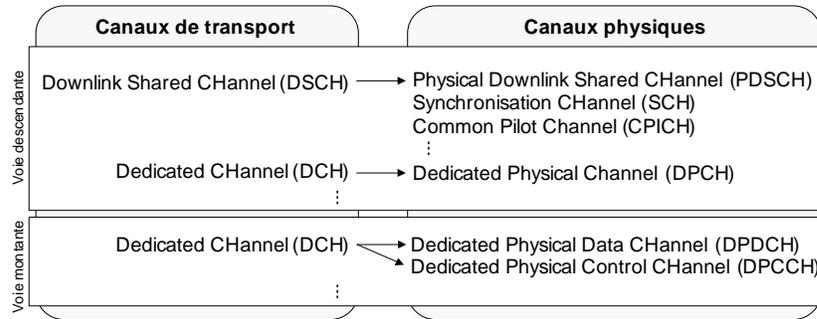


FIG. 2.15 – Correspondance (*mapping*) entre les canaux de transport et les canaux physiques

2.4 Fonctions de la couche physique de l'UTRAN

La couche physique est chargée de transporter l'information générée par les couches supérieures. Il s'agit de véhiculer cette information tout en respectant des contraintes de qualité imposées par le service (délai, débit, taux d'erreur, etc). Nous commencerons par présenter la chaîne de transmission UTRA/FDD. Puis, nous aborderons le multiplexage et le codage canal en détail. Nous verrons ensuite l'application de l'étalement de spectre de manière spécifique au réseau UMTS. Nous terminerons par la modulation radio.

2.4.1 Chaîne de transmission UTRA/FDD

La couche physique fournit le service de transfert d'information à la couche MAC au travers des canaux de transport. En émission, les données fournies par la couche MAC sont passées dans une chaîne de codage de canal avant d'être transmises sur le médium physique. En réception, les données reçues sur un canal physique sont passées dans une chaîne de décodage de canal avant d'être remises à la couche MAC. Lorsque plusieurs canaux de transport de même type sont portés simultanément par un seul canal physique, la chaîne de codage est suivie d'une chaîne de multiplexage et la chaîne de décodage est précédée d'une chaîne de démultiplexage. La figure 2.16 illustre les différentes opérations de traitement du signal utilisées dans la chaîne de transmission de l'UTRA/FDD.

Les fonctions de multiplexage et de codage canal s'appliquent aux canaux de transport par lesquels transitent les bits délivrés par les couches supérieures à la couche physique. Les bits véhiculés par les canaux de transport sont agencés sur les canaux

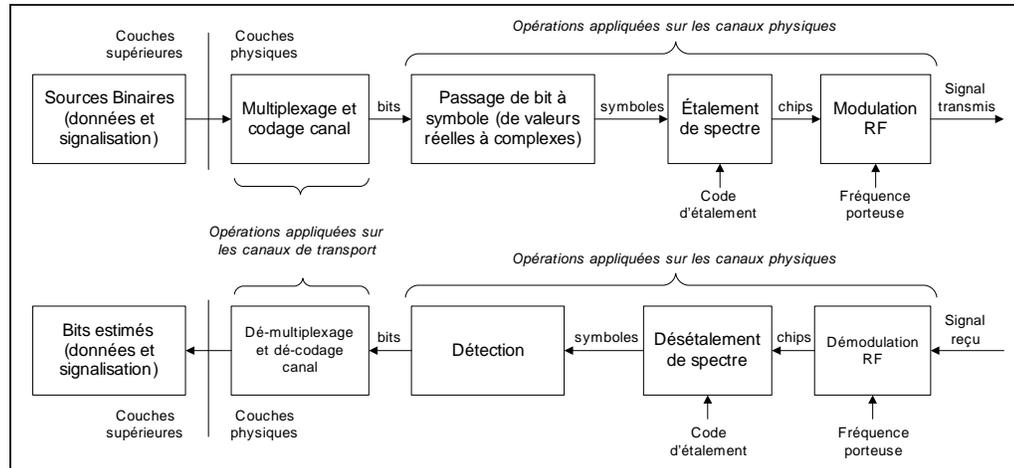


FIG. 2.16 – Fonctions de la couche physique dans la chaîne de transmission UTRA/FDD

physiques. Une fois qu'ils sont présents dans ces canaux, ils subissent des traitements de signal spécifiques pour pouvoir être transmis à travers l'air. Auparavant, les bits sont convertis en symboles et subissent l'opération d'étalement de spectre qui va les transformer en chips. Ce sont des chips qui sont transmis par l'antenne de l'émetteur après avoir été modulés et placés sur une fréquence porteuse. Les fonctions inverses sont mises en place à la réception [4].

2.4.2 Multiplexage et codage

Les services qui seront offerts par l'UMTS seront riches en contenu multimédia. Supporter ces services implique la transmission en parallèle de plusieurs flots d'information et, avec elle, l'utilisation de plusieurs canaux de transport lors d'une même connexion : chacun d'eux correspond à un service ayant une QoS différente. Dans le but d'avoir l'assurance que la QoS du service en question soit respectée, et plus particulièrement que le taux d'erreurs et le délai de transmission soient conformes aux attentes, la couche physique met en place des mécanismes de multiplexage flexibles et des techniques performantes de codage pour la détection et la correction des erreurs.

Un UE peut utiliser plusieurs canaux de transport simultanément, chacun étant doté de ses propres caractéristiques en termes de qualité de service. Ainsi, un ou plusieurs canaux dédiés de transport (DCH) peuvent être traités en parallèle pour constituer un flot binaire de données unique appelé CCTrCH (*Coded Composite Transport CHannel*), comme l'illustre la figure 2.17 [26]. Les bits dans un CCTrCH peuvent être convoyés par un même canal physique.

Les différentes étapes de la procédure de multiplexage et de codage dans la voie montante sont mises en évidence dans la figure 2.17 et résumées par les points suivants [4] :

Insertion de bits CRC : le CRC (Cyclic Redundancy Check) est une technique de détection d'erreurs en réception, à laquelle les systèmes de radiocommunication ont souvent recours, car elle est efficace et simple à mettre en œuvre [24]. Avec la détection d'erreurs, il est possible d'estimer la probabilité d'erreur dans un bloc de bits de transport. Cette estimation permet d'évaluer la qualité de la liaison radio et elle peut être utilisée dans des procédures tel que le contrôle de puissance ;

Concaténation et segmentation des blocs de transport : chaque groupe de blocs de transport, correspondant à un même canal de transport dans un intervalle de temps de transmission TTI¹ (*Transmission Time Interval*), est traité avant d'être envoyé vers le codeur canal, ce afin que le codeur canal ne détecte en entrée qu'une séquence de bits unique dont la taille ne dépasse pas la valeur maximale notée Z . Si le nombre de blocs de transport dans un TTI est M et si p est le nombre de bits par bloc de transport, la longueur de cette séquence après concaténation est $M \times p$. Dans le cas où la taille de la séquence dépasse Z , on applique alors une procédure de segmentation dont l'objet est de diviser la séquence en sous-séquences ayant la même taille. La valeur Z est imposée par le type de codage que l'on met en place. Cette opération permet de réduire la complexité du codeur ainsi que celle du décodeur lorsque la séquence à coder est trop longue ;

Codage : une fois que les blocs de transport ont subi les phases de concaténation et de segmentation, les séquences de bits qui en résultent sont livrées au codeur. Le codage fait partie des techniques appelées FEC (*Forward Error Correction*). L'idée est de coder les bits en émission en ajoutant des bits de redondance, de telle sorte qu'en réception, l'on puisse détecter et corriger d'éventuelles erreurs survenues pendant la transmission. Le codage se décompose donc en deux phases : l'encodage, qui est appliqué en émission et le décodage en réception. D'une manière générale, quel que soit le type de codage, l'encodage est effectué en faisant passer une séquence de bits dans un registre à décalages. Ce registre est composé de N états où des opérations algébriques sont appliquées suivant les polynômes générateurs utilisés. Pour k bits qui rentrent dans l'encodeur, on obtient n bits en sortie, ce qui détermine le « taux de codage » défini par le ratio $R = k/n$. Le paramètre N , appelé « longueur de contrainte », détermine la capacité du codage canal à corriger les erreurs et la complexité de mise en œuvre de cette technique [24]. Le choix du taux de codage à appliquer dépend du service. Plus le taux de codage est faible, plus les performances de codage sont bonnes, même si en

¹Correspond à l'intervalle de temps nécessaire pour effectuer l'échange de données entre les couches physiques et MAC sur un canal de transport donné. Il est fixé à 10 ms dans la R99

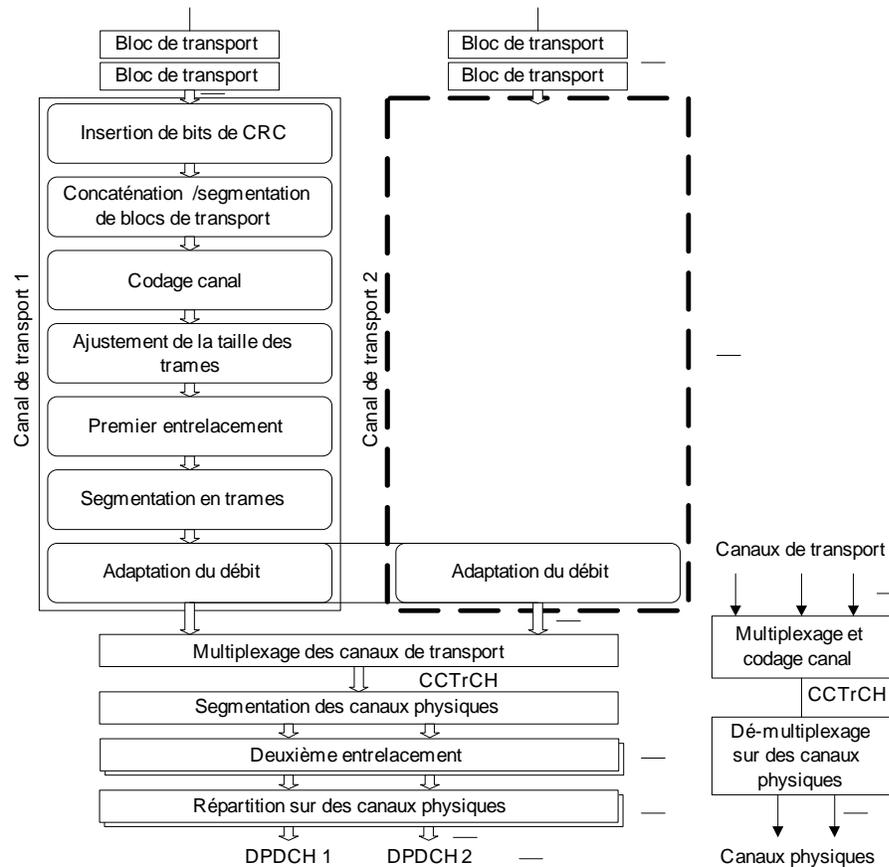


FIG. 2.17 – Multiplexage et codage du canal DCH sur le lien montant

contrepartie, le débit utile diminue et les opérations d'encodage et de décodage sont plus complexes.

Il existe deux types de codage en UTRA/FDD : le codage « convolutionnel » et le codage « Turbo ». Le premier est particulièrement approprié pour des services de transmission de voix où le taux d'erreur BLER (BLoCK Error Rate) que l'on tolère est de l'ordre de 10^{-3} . En revanche, pour des services de transmission de données, le taux d'erreur est généralement plus faible (moins de 10^{-5}). C'est pourquoi l'on fait appel à des techniques plus sophistiquées, tel que le codage Turbo qui peut être vu comme la concaténation de deux encodeurs convolutionnels qui opèrent en parallèle, séparés par un entrelaceur interne [4].

Une fois l'opération de codage terminée, d'autres étapes sont nécessaires avant d'entamer le multiplexage et que nous résumons par ce qui suit :

Ajustement de la taille de trames : cette étape, utilisée sur le lien montant, consiste à scinder les séquences de bits codés (ou non) en segments de la même taille

et à mettre ces segments en série. Ce procédé est nécessaire lorsque le nombre de bits présents dans la séquence de bits en entrée n'est pas un multiple du nombre de trames par TTI. Afin de s'assurer que tous les segments aient la même taille, des bits de bourrage peuvent être insérés ;

Premier entrelacement : l'entrelacement est une technique qui permet d'obtenir une forme de diversité temporelle et d'éviter ainsi les erreurs en rafale. Ce procédé consiste à mélanger une séquence de bits en émission, de façon à étaler les erreurs pendant la transmission et rendre plus aléatoire leurs propriétés statistiques [24]. L'entrelacement permet donc d'améliorer les performances de l'algorithme de décodage canal utilisé ;

Segmentation des trames : ce traitement vient compléter l'ajustement de la taille des trames et s'applique lorsque le TTI est supérieur à 10 ms. Son rôle est de segmenter la séquence de bits contenue dans un TTI en un nombre entier de trames consécutives ;

Adaptation du débit : un même canal physique peut convoier des bits d'information issus des différents canaux de transport. Or, le débit d'un canal physique est limité. Il faut donc adapter le débit à la sortie de chaque canal de transport. Pour ce faire, on peut être amené à retrancher des bits dans des flots d'information de chaque canal de transport ou à en rajouter [4]. En réexaminant la figure 2.17, on observe que l'adaptation de débit dans la voie montante s'applique en tenant compte du nombre de bits présents sur tous les canaux de transport actifs et qui devront être accommodés dans une même trame ;

Multiplexage des canaux de transport : chaque canal délivre une séquence binaire codée tous les 10 ms. Ces séquences sont ensuite concaténées les unes après les autres pour ne créer qu'un flot binaire unique en série : le CCTrCH ;

Segmentation des canaux physiques et deuxième entrelacement : la segmentation ne s'applique que lorsque plusieurs canaux physiques sont utilisés pour le même CCTrCH, autrement dit lors d'une transmission en multicode. Dans ce cas, le deuxième entrelacement s'applique individuellement sur chaque canal physique. À la sortie, l'information est répartie sur le ou les canaux physiques. À ce stade, on est sûr que les bits d'information provenant de chaque canal de transport pourront être accommodés dans des trames de 10 ms, et ce en respectant la QoS requise par le service.

Les fonctions de multiplexage et de codage canal sur le lien descendant sont similaires à celles mises en place dans la voie montante. Cependant, il existe des particularités propres au lien descendant. En effet, le nombre de bits présents dans la trame d'un canal physique est dicté par le facteur d'étalement SF. Dans la voie montante, ce paramètre peut changer d'un TTI à un autre. Tandis que, dans la voie descendante, la valeur de

SF reste constante tout au long de la communication. Ainsi, les fonctions d'adaptation de débit et de segmentation sont différentes [26].

2.4.3 Application de l'étalement de spectre

Suite à l'opération de multiplexage et de codage, les bits sont transformés en symboles, puis on applique les opérations d'étalement de spectre et de modulation (voir la figure 2.16). Auparavant, il convient de citer les paramètres radio qui caractérisent les canaux physiques de l'UTRA/FDD. Parmi ces paramètres, on trouve [3] :

- une fréquence porteuse¹ ;
- une durée dans le temps (avec un instant de temps de début et de fin qui dépend du type de canal) ;
- un code de canalisation (*channelisation code*) ;
- un code d'embrouillage (*scrambling code*).

Les métriques suivantes sont également référencées pour définir la durée des canaux physiques :

- une « trame radio » est une durée où l'on traite de l'information qui s'étend sur quinze intervalles de temps ou *slots*, soit 38 400 chips (10 ms) ;
- un slot est un intervalle de temps de longueur fixe et égale à 2560 chips (≈ 0.667 ms). Le nombre de bits par slot est variable.

Dans la voie descendante, les codes de canalisation permettent d'identifier les symboles d'information appartenant à chaque utilisateur dans une cellule. Dans la voie montante, ils permettent de différencier les symboles d'information du canal ou des canaux physiques de données dédiés (DPDCH) et du canal physique dédié de contrôle (DPCCH) appartenant à un même utilisateur. Le rôle fonctionnel des codes de canalisation utilisés dans un réseau UTRA/FDD peut être comparé aux slots de temps alloués dans les réseaux mobiles à base de TDMA, aux différents utilisateurs dans la cellule pour les distinguer (du moins pour ce qui concerne la voie descendante).

Les codes d'embrouillage, dans la voie descendante, permettent d'identifier une cellule. Il existe donc un code unique d'embrouillage par cellule. L'utilisation des codes

¹Les opérateurs qui auront déployé un réseau d'accès radio fondé sur la technologie UTRA/FDD peuvent disposer d'un jeu de plusieurs paires de fréquences porteuses à allouer aux usagers qu'ils desservent. Le nombre de paires dépend du pays où est implanté le réseau. En conséquence, la méthode d'accès en UTRA/FDD est en réalité hybride, car elle combine le CDMA et le FDMA

d'embrouillage rend les propriétés statistiques de l'interférence proche de celles d'un bruit Gaussien, sachant que cette interférence est invoquée par les cellules voisines qui émettent sur la même fréquence porteuse. Le code d'embrouillage permet donc de faciliter la tâche du récepteur lors de la détection des symboles transmis. Dans la voie montante, les codes d'embrouillage sont utilisés non seulement pour améliorer les propriétés statistiques des codes de canalisation, mais aussi pour différencier les utilisateurs présents dans une même cellule [26].

2.4.4 Modulation

La modulation consiste à transformer le signal en bande de base, une fois converti en analogique, en signal radio, afin de pouvoir le transmettre dans l'air. La figure 2.18 donne un exemple de modulation effectuée au niveau de l'émetteur de la station mobile et de la station de base.

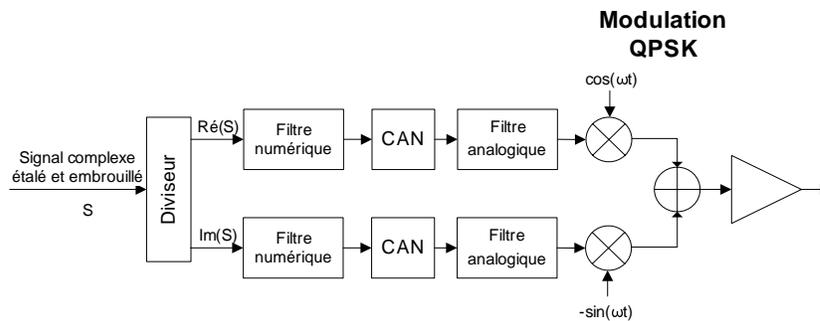


FIG. 2.18 – Exemple d'une chaîne d'émission utilisant la modulation QPSK

Après avoir été étalé et embrouillé, le signal complexe qui en résulte, composé de chips, est réparti sur une voie réelle et sur une voie imaginaire appelées respectivement « voie I » et « voie Q ». Puis, il est filtré avec un filtre numérique et converti en un signal analogique à l'aide d'un convertisseur numérique/analogique (CAN). Le signal passe encore par un filtre analogique avant d'être modulé en quadrature et transposé sur une fréquence ω .

Une fois filtré, le signal analogique est ensuite modulé suivant le principe de la modulation QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) [10]. Ce type de modulation permet la transmission de deux chips par symbole. La phase du signal modulé prend différentes valeurs qui représentent une paire unique de chips.

Dans le schéma simplifié de la figure 2.18, le signal modulé est amplifié à l'aide d'un

amplificateur de puissance PA (*Power Amplifier*) avant d'être transmis. Le choix de la modulation QPSK a été effectué précisément avec le souci d'améliorer son efficacité. En effet, l'efficacité de l'amplificateur de puissance est particulièrement importante dans la station mobile, car elle a une influence directe sur la consommation d'énergie du terminal [26].

2.5 Structure des canaux physiques

Nous allons présenter dans cette section les canaux physiques qui interviennent dans le cadre de notre recherche. Nous commencerons par les canaux dédiés de la voie montante et ceux de la voie descendante. Puis, nous verrons les canaux communs.

2.5.1 Canaux physiques dédiés de la voie montante

Il existe deux types de canaux physiques dédiés dans la voie montante : le canal physique dédié de données DPDCH (*Dedicated Physical Data CHannel*) et le canal physique dédié de contrôle DPCCH (*Dedicated Physical Control CHannel*). Dans une même liaison radio, il peut y avoir zéro, un ou plusieurs DPDCH et toujours un seul et unique DPCCH.

Le DPDCH doit acheminer l'information du canal de transport DCH, alors que le DPCCH véhicule l'information de contrôle ou de signalisation générée par la couche physique. Chacun de ces canaux est composé de champs de bits regroupés dans des intervalles de temps ou slots comme on peut le voir à la figure 2.19. L'information de contrôle contenue dans les champs de bits du DPCCH inclut :

- des bits pilotes connus par le récepteur de la station de base. Les bits pilotes dont le nombre varie entre 3 et 8, sont utilisés pour estimer le rapport signal à interférence SIR de la liaison radio ;
- un identificateur de la combinaison des formats de transport représentés par des bits TFCI (*Transport Format Combination Identifier*). À l'aide de ces bits, la station de base détermine les attributs selon lesquels les bits de données acheminés par le DPDCH ont été traités au niveau des canaux de transport (opérations de multiplexage et de codage canal). L'envoi des bits TFCI est optionnel et leur nombre est de 0, 2, 3 ou 4 par slot. Ils sont inclus dans le cas où, par exemple, plusieurs services sont traités en parallèle. Ils peuvent être omis dans les services

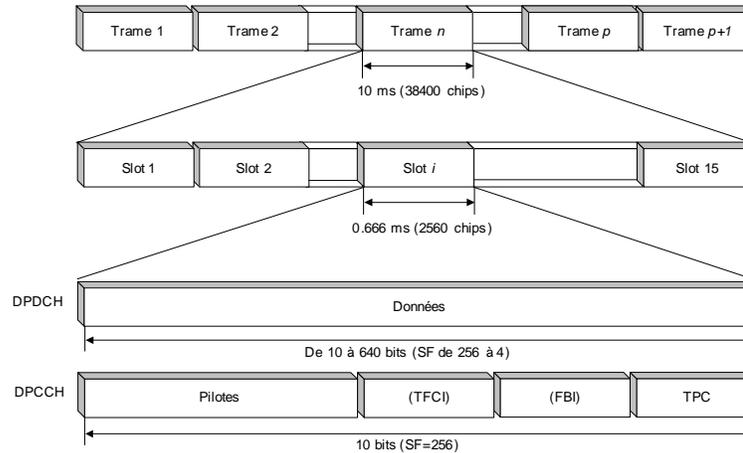


FIG. 2.19 – Structure des canaux physiques dédiés DPDCH et DPCCH de la voie montante

à débit fixe ;

- des bits de retour d'informations FBI (*FeedBack Information*) [3].
- des commandes pour le contrôle de puissance représentés par des bits TPC (*Transmit Power Control*). L'UE utilise ces bits pour demander au Node B d'augmenter ou de diminuer sa puissance d'émission afin de garantir un certain niveau de qualité dans le signal reçu.

De manière générale, le nombre de bits par slot du DPDCH ou du DPCCH dépend du débit binaire de l'information que chacun de ces deux canaux transportent. Ce nombre est fonction du facteur SF selon la relation :

$$N_{BITS} = \frac{2560}{SF} \quad (2.7)$$

La valeur du SF pour le DPCCH est toujours constante et égale à 256, ce qui implique que le nombre de bits par slot est également constant et égal à 10 bits. Le débit binaire¹ du DPCCH est donc fixe et égale à $3.84 \times 10^6 / 256 = 15$ kbps. Il existe douze manières différentes d'agencer les bits pilotes ainsi que les bits TFCI, FBI et TPC dans le slot du DPCCH, ce qui donne lieu à douze formats différents décrits dans [3].

La valeur du SF pour le DPDCH dépend du service en cours et peut varier d'une trame à l'autre. Les valeurs possibles sont 256, 128, 64, 32, 16, 8 et 4, ce qui correspond à des débits binaires de 15, 30, 60, 120, 240, 480 et 960 kbps. Les tableaux 2.4 et 2.5

¹Ce débit est différent du débit qu'on qualifie d'« utile ». Ce dernier est défini généralement comme le débit des canaux de transport (avant les phases de multiplexage et de codage) moins le débit nécessaire pour transmettre les entêtes MAC et RLC

donnent quelques exemples de l'agencement des champs de bits dans les slots DPDCH et DPCCH [3].

Débit bit (kbps)	Débit symbole (ksps)	SF	Bits/trame	Bits/slot	Bits de de données
15	15	256	150	10	10
120	120	32	1200	80	80
960	960	4	9600	640	640

TAB. 2.4 – Exemples de formats des slots du DPDCH de la voie montante

SF	Bits/trame	Bits/slot	Pilots/slot	TPC/slot	TFCI/slot	FBI/slot
256	150	10	6	2	2	0
			5	2	2	1
			6	2	0	2

TAB. 2.5 – Exemples de formats des slots du DPCCH de la voie montante (avec SF=256)

De manière générale, dans la voie montante, la transmission de plusieurs services en parallèle dotés de débits différents est accomplie en accommodant plusieurs canaux de transport dédiés (DCH) dans un seul canal physique de données dédié (DPDCH). Cette approche devient rapidement limitée lorsque l'on souhaite accroître le débit utile. Par exemple, avec SF=4, le débit maximum sur le DPDCH est de 960 kbps. Par ailleurs, si l'on considère que cette information a subi un codage avec un taux de codage de 1/2, le débit utile maximum que l'on obtient est de 480 kbps.

Une autre manière d'augmenter le débit consiste à agencer l'information des canaux de transport sur plusieurs canaux physiques dédiés. Cette approche est appelée transmission « en multicode », car plusieurs DPDCH peuvent être réquisitionnés pour transmettre en parallèle cette information, chaque canal étant étalé avec un code de canalisation différent. La valeur SF peut aussi être différente. Le nombre maximum de DPDCH par utilisateur est de six [4]. Les différents DPDCH sont additionnés et étalés avec le même code d'embrouillage, comme le montre la figure 2.20. On peut noter que l'information de contrôle associée à la liaison radio est convoyée par un seul DPCCH.

Avec la transmission en multicode, le débit utile total que l'on obtient en considérant un taux de codage de 1/2, un facteur d'étalement SF=4 et six canaux DPDCH est de 2.88 Mbps. Cependant, dans la pratique, en présence de trajets multiples et des limitations dues au contrôle de puissance, il serait difficile de garantir des performances acceptables avec un tel schéma de transmission.

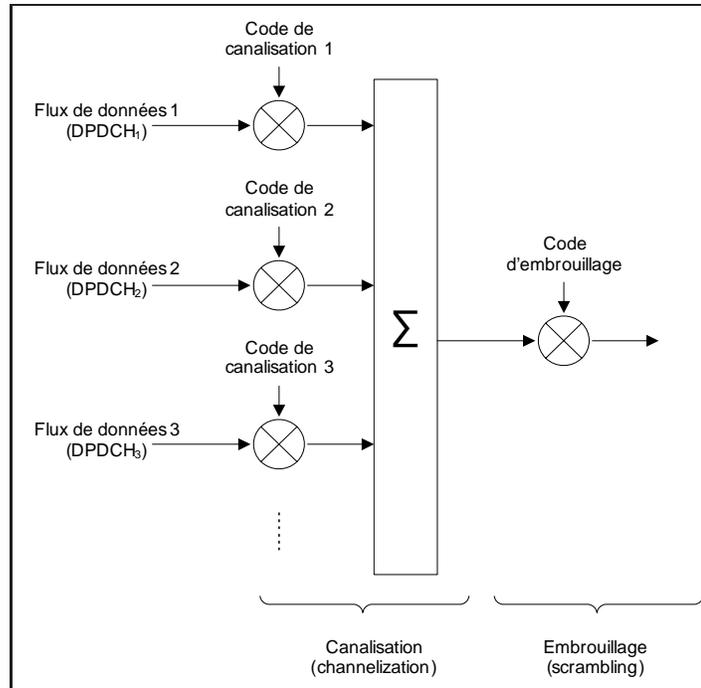


FIG. 2.20 – Agencement des canaux physiques dédiés dans une transmission en multi-code dans la voie montante

2.5.2 Canaux physiques dédiés de la voie descendante

À la différence de la voie montante, il existe un seul type de canal physique dédié dans la voie descendante appelé DPCH (*Dedicated Physical CHannel*). Ce canal achemine l'information du canal de transport DCH - information qui peut être du trafic de données ou de contrôle généré par les couches supérieures. Il transporte également de l'information de contrôle engendrée par la couche physique elle-même et, de ce fait, il peut être considéré comme le multiplexage temporel d'un canal physique de données dédié (DPDCH) et d'un canal physique de contrôle dédié (DPCCH). On voit sur la figure 2.21 que les bits de données sont répartis sur deux champs de bits à l'intérieur du slot (partie DPDCH). Dans la partie de contrôle (DPCCH), on retrouve les mêmes bits d'informations que dans la voie montante, à l'exception des bits FBI.

Le nombre de bits dans le slot du DPCH est calculé à partir de l'expression :

$$N_{BITS} = \frac{5120}{SF} \quad (2.8)$$

Le facteur d'étalement SF peut prendre pour valeur 512, 256, 128, 64, 32, 16, 8 ou 4 et les débits respectifs sur le DPCH qui en résultent sont 15, 30, 60, 120, 240, 480, 960 et 1920 kbps. Ce débit devra être partagé entre les bits de contrôle et de données.

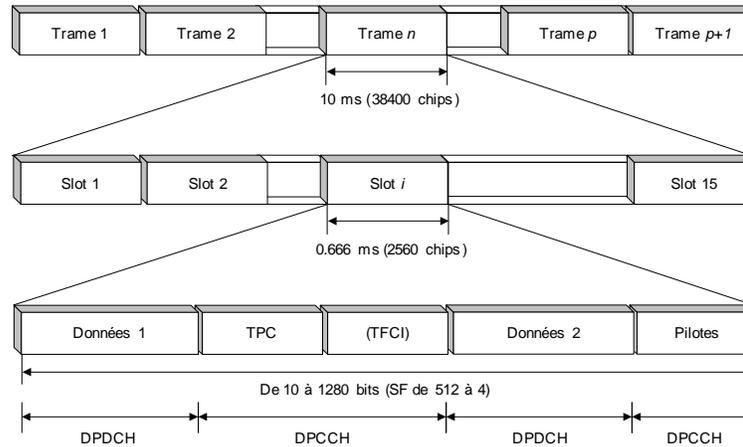


FIG. 2.21 – Structure du canal physique dédié DPCH de la voie descendante

Il existe 49 formats de slots différents qui représentent autant de manières possibles de répartir les bits dans les champs du slot du DPCH de la voie descendante [26]. Le tableau 2.6 en donne quelques exemples. Ce sont les couches supérieures qui indiquent le format de slot à utiliser.

Débit bit (kbps)	Débit symbole (ksps)	SF	Bits /slot	Données 1 /slot	Données 2 /slot	TPC /slot	TFCI /slot	Pilots /slot
15	7,5	512	10	0	4	2	0	4
60	30	128	40	6	26	2	2	4
1920	960	4	1280	248	1000	8	8	16

TAB. 2.6 – Exemples de formats des slots du DPCH de la voie descendante

La transmission en multicode est également possible dans la voie descendante. Les DPCH sont transmis en parallèle vers l'UE concerné avec la même valeur ou non de SF. Chaque DPCH possède un code de canalisation différent. Par contre, le même code d'embrouillage est appliqué à tous les DPCH impliqués.

2.5.3 Canaux physiques communs

Dans le cadre de notre recherche, nous allons citer uniquement trois canaux physiques communs sur la voie descendante : le PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*), le CPICH (*Common Pilot Channel*) et le SCH (*Synchronization Channel*). Le canal PDSCH supporte le DSCH lors de l'envoi de trafic de données à haut débit vers un ou plusieurs équipements usagers situés dans une même cellule. Plusieurs utilisateurs peuvent se partager ce canal à des moments différents. Ceci est particulièrement

précieux pour l'UTRAN dans des situations où les codes de canalisation dont dispose la cellule se font rares. L'allocation d'un PDSCH à un UE est cadencée TTI par TTI. Dans certains cas, l'UTRAN peut attribuer, dans une même trame, plusieurs PDSCH à un UE en utilisant la technique de transmission multicode où chaque PDSCH possède la même valeur de SF. Des débits aussi élevés que ceux que l'on obtient avec un canal dédié peuvent être ainsi atteints.

Comme son nom l'indique, le CPICH est composé d'une séquence prédéfinie de bits dits « pilotes » qui sont transmis en permanence sur la cellule. Le débit de ces bits est constant et égal à 30 kbps, ce qui est fixé avec une valeur de SF constante et égale à 256. Le CPICH peut être considéré comme un canal « balise » dont les terminaux mobiles se servent, entre autres, pour estimer la qualité du canal de propagation. La précision de cette estimation permet d'améliorer les performances des techniques de détection mises en place à la réception, pour récupérer l'information binaire transmise par le biais des canaux physiques dédiés et communs de la voie descendante.

Le SCH permet aux stations mobiles de se synchroniser avec le réseau et de récupérer le code d'embrouillage spécifique à la cellule courante. Il ne transporte pas d'informations des couches supérieures et il n'est associé à aucun canal de transport.

Jusqu'ici, nous avons étudié les principes intervenant dans le réseau d'accès du système UMTS d'après la version Release 99 des spécifications du 3GPP. La version Release 5 propose une nouvelle technologie du nom de HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) qui vise à améliorer le débit sur le lien descendant pour atteindre des pics de l'ordre de 10 Mbps. Cette technologie se base sur un certain nombre de propriétés que nous verrons en détail dans le prochain chapitre. Nous verrons également les changements qui seront apportés tant au niveau de l'architecture du sous-système radio qu'au niveau de la couche physique.

Chapitre 3

Analyse de la technologie HSDPA

La technologie HSDPA représente l'évolution principale du WCDMA telle que spécifiée dans la version Release 5 du 3GPP. Ce chapitre traite de cette évolution de la méthode d'accès du réseau UMTS. Nous commencerons par présenter les caractéristiques principales de la technologie HSDPA et montrer l'impact de l'introduction de cette technologie sur l'architecture du sous-système radio. Puis, nous étudierons les nouveaux canaux introduits ainsi que le rôle qu'ils jouent dans l'implémentation des propriétés qui sont à la base de l'HSDPA. Par la suite, nous résumerons le fonctionnement général de la couche physique de l'UMTS avec la technologie HSDPA. Nous terminerons par les limitations des approches d'évaluation proposées par d'autres recherches.

3.1 Présentation générale du HSDPA

Le HSDPA est doté d'un ensemble de propriétés dont la combinaison permet d'améliorer la capacité du réseau ainsi que le débit de données jusqu'à plus de 10 Mbps (débit pic) pour le trafic sur le lien descendant. Parmi ces propriétés, nous retrouvons des techniques connues et utilisées dans des standards d'évolution tel que le GSM/EDGE et que l'on résume par les points suivants :

- la technique de modulation et de codage adaptatifs AMC (*Adaptative Modulation and Coding*);
- une méthode de retransmission hybride rapide appelée H-ARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*);
- des algorithmes d'ordonnancement rapide de paquets (*Fast Packet Scheduling*).

L'AMC a été appliquée, en premier lieu, au standard EDGE. Grâce à cette propriété, il est possible de suivre la variation dans le temps des conditions du canal de transmission et d'augmenter d'une manière significative les débits de données ainsi que l'efficacité spectrale du réseau GSM. En effet, selon les conditions instantanées du canal radio envoyées par le terminal mobile, et les ressources disponibles, un système avec l'AMC peut choisir la modulation et le codage appropriés. Une nouvelle modulation d'ordre supérieure, appelée 16 QAM (Quadrature Amplitude Modulation), vient cohabiter avec l'existante QPSK. Lorsque le terminal est dans une position favorable (proximité d'une station de base par exemple), la modulation 16 QAM et des taux de codage supérieurs peuvent être sélectionnés pour atteindre des pics de débits élevés. Par contre, si l'UE se trouve dans des conditions défavorables, on lui alloue un ordre de modulation et un taux de codage moins élevé dans le but d'assurer la qualité de la communication.

D'autre part, la réduction de l'intervalle de temps de transmission TTI à 2 ms (au lieu de 10 ms pour la version R99) ainsi qu'une grande distribution dans l'architecture HSDPA, comme l'illustre la figure 3.1, permettent de réduire les délais d'attente de manière significative par rapport à la version précédente R99 du WCDMA. En effet,

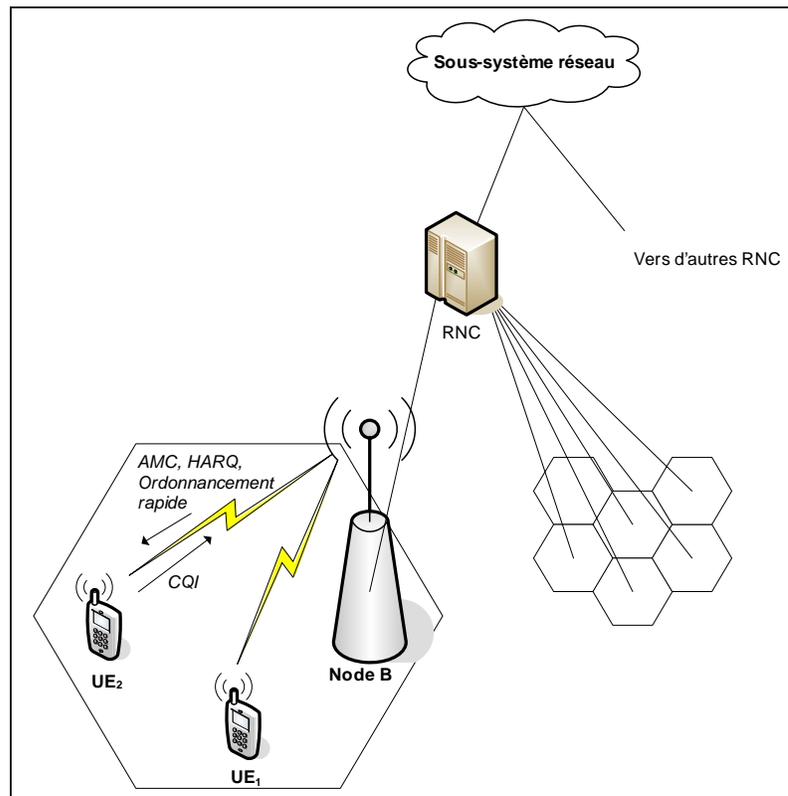


FIG. 3.1 – Architecture système avec le HSDPA

les stations de base sont dotées davantage d'intelligence de manière à pouvoir prendre

en charge les retransmissions de paquets erronés, une fonctionnalité qui était jusque là du ressort du RNC. Le déplacement de cette fonctionnalité vers les Node B permet ainsi de se rapprocher encore plus de l'utilisateur et par conséquent de réduire les délais dus à la retransmission. Ces modifications permettront également d'obtenir des informations récentes sur la qualité du lien radio, grâce à l'indicateur CQI (*Channel Quality Indicator*) illustré à la figure 3.1.

Dans le but d'implémenter la technologie HSDPA, trois nouveaux canaux ont été introduits dans les spécifications de la Release 5 : le HS-DSCH, le HS-SCCH et le canal physique HS-DPCCH [3]. Le HS-DSCH (*High Speed Downlink Shared CHannel*) est un canal partagé qui transporte les données des utilisateurs sur le lien descendant, avec un débit pic allant au delà des 10 Mbps. Le canal HS-SCCH (*High Speed Shared Control CHannel*) prend en charge l'information de contrôle nécessaire de la couche physique afin de permettre le décodage des données sur le canal HS-DSCH. Enfin, le canal HS-DPCCH (*High Speed Downlink Dedicated Physical Control CHannel*) transporte l'information de contrôle nécessaire sur le lien montant, notamment les acquittements ACK (positifs et négatifs) ainsi que l'information sur la qualité du lien radio.

Puisque le canal HS-DSCH est partagé par plusieurs utilisateurs, il est nécessaire d'avoir une méthode d'ordonnancement pour répartir les ressources à tous. Des algorithmes d'ordonnancement rapides permettent de distribuer efficacement les ressources du canal HS-DSCH pour tous les utilisateurs voulant accéder au réseau. À la figure 3.1, on constate que cette fonctionnalité a été également déplacée vers la station de base.

3.2 Mécanisme de retransmission hybride HARQ

Afin d'assurer la fiabilité des transmissions, on distingue deux grandes classes de mécanismes : les mécanismes *réactifs* ARQ (*Automatic Repeat reQuest*) et les mécanismes *proactifs* FEC (*Forward Error Correction*). Dans les mécanismes réactifs, l'émetteur réagit à la signalisation d'une perte de paquet en retransmettant ce paquet. Cette signalisation peut être effectuée par l'émission d'acquittements positifs ACK (*ACKnowledgement*) ou négatifs NAK (*Negative-AcKnowledge*). En ce qui concerne le fonctionnement des mécanismes proactifs, l'émetteur rajoute des paquets de redondance permettant au récepteur de récupérer des paquets perdus. Ces paquets de redondance sont calculés en utilisant des codes correcteurs d'erreurs [22]. Ces deux mécanismes sont souvent combinés en utilisant des acquittements pour ajuster la quantité de redondances des codes FEC. Une telle combinaison de mécanismes est appelée « ARQ hybride » ou HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*).

Le HARQ peut être caractérisé par certains paramètres telles que la synchronisation, l'adaptativité ainsi que la manière dont est faite la combinaison. Quand la relation temporelle entre la transmission originale et la (ou les) retransmission(s) est fixe, l'opération HARQ est dite alors « synchrone ». Si, par contre, les retransmissions sont programmées à n'importe quel moment après avoir reçu un ACK, on parlera alors d'opération « HARQ asynchrone ».

On dit qu'un système HARQ est adaptatif si on peut réaliser des retransmissions en utilisant un autre type de modulation autre que celui qui a été utilisé pour la transmission originale. Par exemple, si la modulation QPSK est utilisée durant la première transmission d'un paquet et que celle-ci échoue, la 16-QAM peut être utilisée pour la retransmission de ce même paquet si les conditions du canal ou des ressources radio (puissance du signal et/ou codes de canalisation) changent entre la première transmission et les retransmissions qui s'en suivent.

On distingue deux variantes de l'HARQ selon que l'on combine ou non les retransmissions :

- **HARQ de type I** : dans cette variante, appelée aussi *chase combining* ou *soft-combining*, il n'y a pas de combinaison des retransmissions. Le Soft combining fait appel à la retransmission par l'émetteur du même paquet de données codées. Le décodeur au niveau du récepteur combine ces copies multiples du paquet envoyé, pondéré par le rapport de signal/bruit SNR (*Signal to Noise Ratio*) reçu ;
- **HARQ de type II** : cette technique, connue aussi sous le nom de IR (*Inremental Redundancy*), contrairement à la précédente qui envoie des répétitions simples de tout le paquet encodé, envoie une information redondante additionnelle d'une manière incrémentale si le décodage échoue à la première tentative.

La technologie HSDPA s'appuie sur un mécanisme HARQ asynchrone et adaptatif et peut fonctionner avec les deux variantes Soft combining et IR. Il est à noter qu'avec la deuxième variante, on obtient de meilleures performances, mais elle nécessite plus de mémoire dans le récepteur du terminal mobile pour stocker les informations de redondance [12].

Comme illustré à la figure 3.3, la fonctionnalité HARQ, utilisant la variante IR dans cet exemple, est implémentée à travers deux blocs d'adaptation au débit (*rate-matching*) dans la chaîne de codage du canal HS-DSCH. Cette dernière est illustrée à la figure 3.2. Le principe réside dans l'existence d'un buffer entre les deux blocs afin de permettre de raffiner les paramètres de redondance pour les différentes retransmissions entre les deux blocs de rate-matching [5].

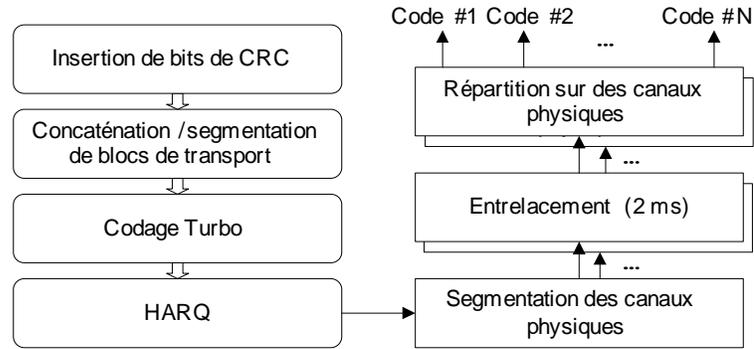


FIG. 3.2 – Technique HARQ dans la chaîne de codage du canal HS-DSCH

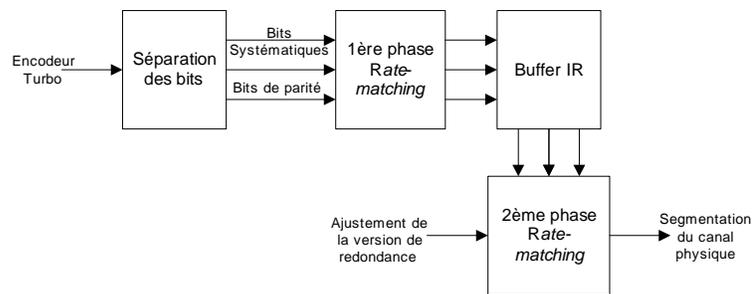


FIG. 3.3 – Principe de fonctionnement de l'HARQ

3.3 Modulation et codage adaptatifs

Dans les réseaux mobiles, la qualité d'un signal reçu par un terminal dépend de plusieurs facteurs, comme la distance entre la station de base ou la perte de propagation due aux obstacles ou aux trajets multiples. Dans le but d'améliorer la performance d'un système, en termes de débit de données et de fiabilité de la couverture radio, le signal transmis vers et par un utilisateur particulier est modifié de façon à prendre en compte les variations de la qualité du signal à travers un processus connu sous le nom d'« adaptation au lien radio » (*link adaptation*), connu également sous le nom de AMC.

Auparavant, les systèmes à base de CDMA utilisaient le contrôle de puissance rapide comme méthode privilégiée afin d'implémenter l'adaptation au lien radio. Récemment, l'AMC s'est révélé être une méthode alternative promettant d'améliorer globalement la performance du système. L'AMC fournit la flexibilité d'adapter la combinaison modulation-codage aux conditions moyennes du canal radio pour chaque utilisateur. Avec l'AMC, la puissance du signal transmis est maintenue constante pendant toute la durée de la trame, en faisant varier le nombre de codes parallèles pouvant être supportés

par un terminal et le taux de codage en fonction de la qualité actuelle du signal reçu.

L'utilisation d'un ordre de modulation plus important avec la 16-QAM permet aussi d'augmenter le débit d'une manière significative. Cette nouvelle modulation a été proposée dans la Release 5, mais son utilisation est, contrairement à la modulation QPSK, optionnelle et dépend du type de terminal utilisé. Il faut noter que l'introduction d'un ordre de modulation plus élevé est accompagné d'une plus grande complexité dans les terminaux mobiles, qui doivent estimer l'amplitude relative des symboles reçus. Cette estimation d'amplitude est nécessaire pour que le terminal puisse séparer tous les points de la constellation 16-QAM telle qu'illustré à la figure 3.4. Étant donné que cette estimation devient plus difficile lorsque la qualité du signal reçu est mauvaise, il est alors plus judicieux d'utiliser la modulation QPSK dont la constellation est moins dense.

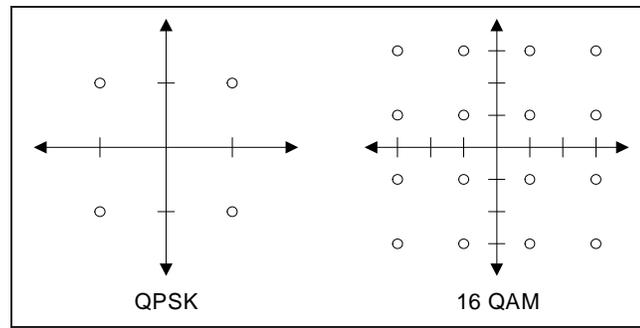


FIG. 3.4 – Constellations de la modulation 16-QAM et QPSK

En combinant le type de modulation, le taux de codage et le nombre de codes supportés, nous obtenons plusieurs combinaisons (5), appelées également schéma de modulation et de codage MCS (*Modulation and Coding Scheme*), qui ont été proposées par le 3GPP dans la Release 5 et résumées dans le tableau 3.1. Ainsi, un utilisateur qui serait proche d'une station de base pourrait se voir attribué, par exemple, une modulation 16-QAM avec un taux de codage de $3/4$ et dont le terminal supporte 15 codes (en parallèles). Cette combinaison lui permettrait de bénéficier d'un débit de l'ordre de 10.7 Mbps sur le lien descendant. L'AMC a été intégré aux fonctionnalités des Node B supportant la technologie HSDPA. Par conséquent, la station de base a la responsabilité de sélectionner le schéma de modulation et de codage approprié.

Selon le nombre de codes parallèles pouvant être supporté par le terminal, nous obtenons plusieurs classes de terminaux HSDPA spécifiées dans la Release 5 avec un total de 12 catégories. Ces catégories permettent d'avoir des débits pics allant de 0.9 à 14.4 Mbps, comme le montre le tableau 3.2 [6]. Les dix premières classes de terminaux doivent être capables de supporter la modulation 16-QAM, alors que les deux dernières

MCS	Modulation	Taux de codage	Débit max		
			5 codes	10 codes	15 codes
1	QPSK	1/4	600 kbps	1.2 Mbps	1.8 Mbps
2		2/4	1.2 Mbps	2.4 Mbps	3.6 Mbps
3		3/4	1.8 Mbps	3.6 Mbps	5.4 Mbps
4	16-QAM	2/4	2.4 Mbps	4.8 Mbps	7.2 Mbps
5		3/4	3.6 Mbps	7.2 Mbps	10.7 Mbps

TAB. 3.1 – Schémas de modulation et de codage MCS sur le lien DL

(11 et 12) supportent uniquement la modulation de base QPSK.

Catégorie	Nombre maximum de codes parallèles	Bits des canaux de transport par TTI	Type de HARQ	Débits (Mbps)
1	5	7298	Soft combining	1.2
2	5	7298	IR	1.2
3	5	7298	Soft combining	1.8
4	5	7298	IR	1.8
5	5	7298	Soft combining	3.6
6	5	7298	IR	3.6
7	10	14411	Soft combining	7.2
8	10	14411	IR	7.2
9	15	20251	Soft combining	10.2
10	15	27952	IR	14.4
11	5	3630	Soft combining	0.9
12	5	3630	IR	1.8

TAB. 3.2 – Catégories de terminaux supportant la technologie HSDPA

3.4 Canaux HSDPA

Le HS-DSCH possède des caractéristiques spécifiques tout comme les autres canaux de la Release 99. Dans le but de résumer ces caractéristiques, nous avons dressé un tableau comparatif 3.3 qui montre les ressources associées aux canaux DCH, DSCH et HS-DSCH du lien descendant.

Concernant le codage sur le canal HS-DSCH, nous pouvons l'illustrer à travers un exemple avec 2 utilisateurs actifs qui utilisent le même canal partagé HS-DSCH tel

Canal	HS-DSCH	DSCH	Downlink DCH
Spécification	Release 5	R99	R99
Facteur d'étalement	Fixé, 16	Variable (256-4)	Fixé (512-4)
Modulation	QPSK/16-QAM	QPSK	QPSK
Contrôle de puissance	Puissance constante	Rapide, basé sur le DCH associé	Rapide
Entrelacement	2 ms	10-80 ms	10-80 ms
Schéma de codage canal	Codage Turbo	Codage Turbo et convolutionnel	Codage Turbo et convolutionnel

TAB. 3.3 – Comparaison du canal HS-DSCH avec les autres canaux du lien descendant

qu'illustré à la figure 3.5. Tous deux vérifient l'information de contrôle à partir des canaux HS-SCCH afin de déterminer les codes HS-DSCH à désétaler.

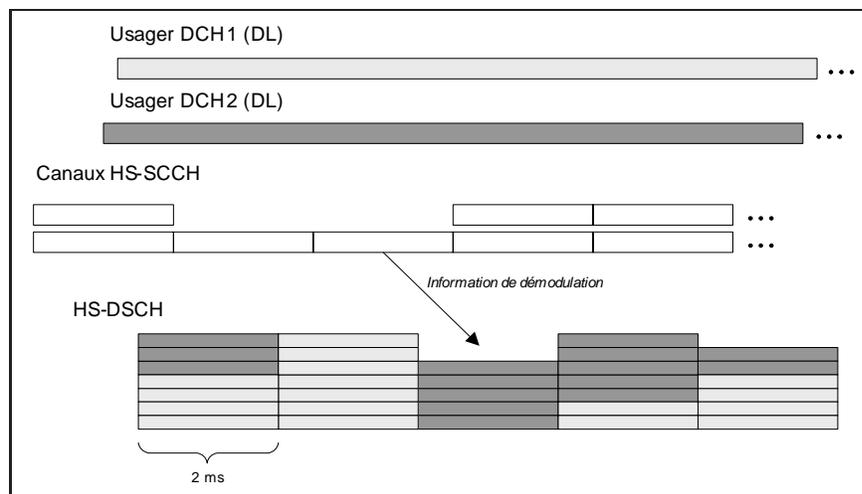


FIG. 3.5 – Exemple de multiplexage de code avec deux usagers actifs

Le canal HS-SCCH transporte l'information nécessaire à la démodulation de l'information du canal HS-DSCH. L'UTRAN doit allouer un certain nombre de canaux HS-SCCH au plus grand nombre d'utilisateurs soumis à un multiplexage de codes. Dans le cas où il n'y a aucune donnée sur le canal HS-DSCH, l'utilisation du canal HS-SCCH n'est pas nécessaire. En effet, le trafic dû à la signalisation doit être minimisé afin de réserver le maximum de ressources aux données utiles. Un usager peut avoir recours à un maximum de quatre canaux HS-SCCH à un temps donné [17].

Chaque bloc HS-SCCH est composé de trois slots et divisé en deux parties fonc-

signalisation. Ce type d'approche est nécessaire non seulement afin d'éviter au terminal de placer dans son buffer des données qui ne lui sont pas destinées, mais aussi dans le cas où les codes utilisés dépassent le nombre maximum pouvant être traité par le terminal.

Le canal HS-DPCCH doit permettre le transport, sur le lien montant, des acquittements aussi bien positifs que négatifs pour les retransmissions au niveau de la couche physique ainsi que l'information concernant la qualité du lien radio. Cette dernière sera utilisée par l'ordonnanceur, se trouvant dans le Node B, pour déterminer à quel terminal transmettre et à quel débit. Le HS-DPCCH est donc divisé en deux parties comme le montre la figure 3.7 et transporte les paramètres suivants :

- les transmissions ACK/NAK afin de refléter les résultats de la vérification CRC après le décodage de paquets ;
- le CQI (*Channel Quality Indicator*) qui indique la taille de bloc de transport, le type de modulation ainsi que le nombre de codes parallèles pouvant être correctement reçus (avec un taux d'erreurs raisonnable) sur le lien descendant.

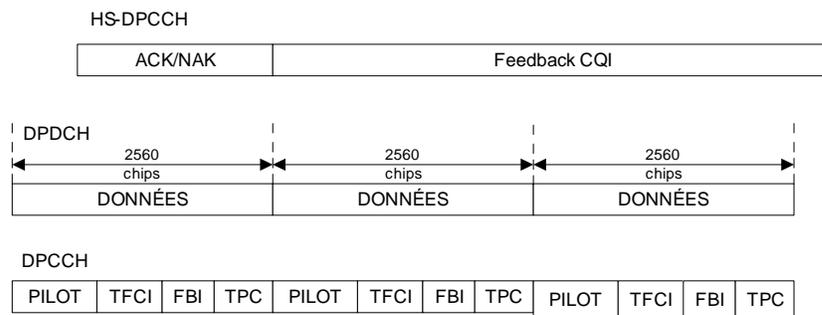


FIG. 3.7 – Structure du canal HS-DPCCH

La définition d'une méthode qui renvoie l'information sur les conditions du lien radio n'est pas une tâche triviale. En effet, on doit tenir compte non seulement des différentes implémentations de récepteurs mais, en même temps, cette méthode doit permettre facilement la conversion de ces conditions radio en une information adéquate pour l'ordonnanceur. Dans tous les cas, l'information sur la qualité du lien radio est codée sur 5 bits. Un état de signalisation est réservé pour l'état « transmission non nécessaire » (*do not bother to transmit*) ainsi que d'autres états représentant la transmission que le terminal peut recevoir à ce moment. Par conséquent, ces états vont de la transmission à un code avec une modulation QPSK jusqu'aux transmissions 15 codes avec la modulation 16-QAM (incluant les différents taux de codage). Évidemment, les restrictions des capacités du terminal doivent être prises en compte en plus de l'information sur la qualité du lien. Le canal HS-DPCCH requiert une partie de la puissance de transmission

sur le lien montant et celle-ci doit être prise en compte dans les paramètres du bilan de liaison.

3.5 Fonctionnement de la couche physique

Le processus, illustré à la figure 3.8, montre les procédures de fonctionnement de la couche physique HSDPA, qui se résument par les étapes suivantes [17] :

1. L'ordonnanceur dans le Node B évalue les conditions du lien radio pour les différents usagers en calculant la quantité de données présentes dans le buffer pour chacun des utilisateurs ainsi que le temps écoulé depuis la dernière fois qu'un utilisateur donné, ayant des transmissions en attente, a été servi. Les critères devant être pris en compte dans l'ordonnanceur dépend de l'implémentation spécifique au fournisseur du réseau mobile ;
2. Une fois qu'un terminal a été choisi pour être servi à un certain intervalle TTI donné, le Node B identifie les paramètres HS-DSCH nécessaires, comme par exemple le nombre de codes disponibles, la possibilité d'utiliser ou non la modulation 16-QAM ou alors les limitations des capacités des terminaux. Le type de mémoire soft du terminal détermine également le type de retransmission HARQ pouvant être utilisée ;
3. Le Node B commence à transmettre le HS-SCCH deux slots avant le TTI HS-DSCH correspondant pour communiquer au terminal les différents paramètres. Le terminal peut sélectionner un ou plusieurs canaux HS-SCCH (parmi un ensemble limité à quatre) à condition qu'il n'y ait pas de données dans la trame HS-DSCH précédente pour ce terminal ;
4. Le terminal gère les différents canaux HS-SCCH qui sont mis à sa disposition par le réseau et une fois que le terminal a décodé la Partie 1 (voir figure 3.6) d'un HS-SCCH qui lui est destiné, celui-ci commence à décoder le reste et va stocker dans le buffer les codes nécessaires du HS-DSCH ;
5. Ayant déjà décodé les paramètres du HS-SCCH de la Partie 2, le terminal peut déterminer à quel processus ARQ appartiennent les données et si celles-ci doivent être combinées avec l'information déjà présente dans le soft buffer ;
6. Par la suite, le terminal envoie un indicateur ACK/NAK sur lien montant, en fonction de la vérification CRC appliquée aux données HS-SCCH ;
7. Si le réseau continue à transmettre des données pour le même terminal sur des intervalles TTI consécutifs, le terminal va rester sur le même HS-SCCH utilisé lors du précédent TTI.

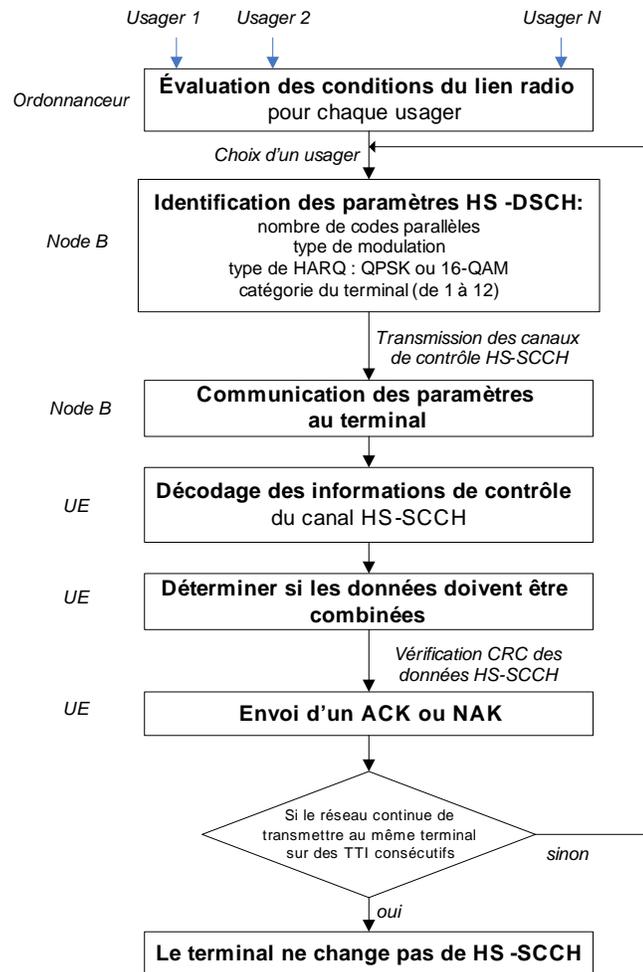


FIG. 3.8 – Fonctionnement de la couche physique du HSDPA

3.6 Ordonnancement rapide (*Fast Scheduling*)

L'ordonnancement est le mécanisme qui permet de déterminer à quel utilisateur il convient de transmettre dans un intervalle de temps donné. C'est un élément déterminant dans la conception puisqu'il répartit l'allocation du canal entre les utilisateurs et ainsi, d'une manière générale, détermine le comportement global du système. Un débit optimal du système peut être obtenu en affectant toutes les ressources radio à l'utilisateur avec les meilleures conditions radio du canal, néanmoins un ordonnanceur, en pratique, devrait avoir plusieurs niveaux d'équité. Ainsi, en choisissant différents algorithmes d'ordonnancement, les opérateurs peuvent adapter sur mesure le comportement du système à leurs besoins. Alors, il n'est pas nécessaire de standardiser les algorithmes utilisés, au lieu de cela, les vendeurs peuvent choisir différents critères. La prédiction de la qualité du canal, la charge courante de la cellule, ainsi que des classes différentes de

priorités de trafic sont des exemples d'informations sur lesquels l'ordonnanceur pourrait baser ses décisions.

Afin d'illustrer le principe d'ordonnement, considérons l'ensemble d'utilisateurs HSDPA $\{i\}$ ayant une qualité de canal variable dans le temps et dont la performance instantanée est modélisée par un processus stochastique :

$$\{R_i(n)\} \quad i = 1, \dots, N \quad (3.1)$$

où $R_i(n)$ est le débit maximum supportable pour un taux d'erreurs de blocs BLER (*Block Error Rate*) par intervalle de temps de transmission TTI si l'utilisateur i est servi par l'ordonnanceur de paquets dans un délai de TTI n . Dans l'équation 3.1, on suppose que la totalité de la puissance et des ressources sont allouées à un seul utilisateur dans un TTI donné (i.e. il n'y a pas de multiplexage de code).

Avec les suppositions précédentes, nous allons définir la tâche de l'ordonnanceur de paquets HSDPA en ce qui concerne la sélection de l'utilisateur i afin qu'il soit servi à chaque TTI. Étant donné l'ensemble d'utilisateurs dans la cellule $\{i\}, i = 1, \dots, N$, l'ordonnanceur de paquets HSDPA doit maximiser le débit de la cellule tout en satisfaisant les attributs de QoS des services offerts par les opérateurs.

On peut découper ces algorithmes d'ordonnement en deux grandes catégories : les méthodes d'ordonnement « intelligentes » et les méthodes d'ordonnement « aveugles » [9]. Les algorithmes de la première catégorie basent leurs décisions sur les mesures récentes (i.e. exécutées à chaque TTI) des conditions de canal du terminal mobile. La deuxième catégorie, quant à elle, contient des algorithmes qui ne basent leurs décisions d'ordonnement sur aucune mesure. Un exemple d'algorithmes simples faisant partie des ces méthodes aveugles est le RR (*Round Robin*), dans lequel les utilisateurs sont desservis dans un ordre cyclique en faisant abstraction des conditions de qualité du canal. Cette méthode est unique de par sa simplicité, et garantit une distribution équitable parmi tous les utilisateurs de la cellule.

Parmi les méthodes d'ordonnement intelligentes, on peut trouver l'algorithme Max C/I (*Maximum C/I*), le PF (*Proportional Fair*) et le FFTH (*Fast Fair Throughput*). Le Max C/I dessert l'utilisateur tous les TTI avec le débit supportable instantané le plus élevé. Ce principe de service possède des avantages évidents en terme de capacité de cellule, mais il en résulte une absence d'équité de débit car les utilisateurs ayant de mauvaises conditions radio de canal sont desservis d'une manière moins fréquente.

Dans le cas de l'algorithme PF, l'utilisateur est desservi tous les TTI avec la plus

grande priorité que l'on exprime par l'équation suivante :

$$P_i = \frac{R_i(t)}{\lambda_i(t)} \quad i = 1, \dots, N \quad (3.2)$$

où P_i dénote la priorité de l'utilisateur, $R_i(t)$ le débit supportable instantané de l'utilisateur i , et λ_i qui représente le débit utilisateur. Dans le cas présent, λ_i est simplement calculé comme étant le nombre de bits correctement reçus par l'utilisateur i durant la période (t_i, t) divisé par une telle période, où t_i représente l'instant où l'utilisateur i a initié sa transmission sur le lien descendant. Cet algorithme a pour but de servir les utilisateurs ayant des conditions radio de canal très favorables relativement à leurs conditions moyennes, prenant de cette manière avantage des variations temporelles de l'effet d'évanouissement rapide du canal.

3.7 Limitations des approches d'évaluation proposées

Un certain nombre d'études ont été menées afin d'évaluer la performance de la technologie HSDPA [11] [18] [21]. L'étude réalisée dans [18] a mis l'accent sur l'ordonnement de paquets et le compromis entre l'équité entre les utilisateurs et le débit par cellule. Cette étude s'est basée principalement sur la qualité du lien radio, mesurée par le paramètre E_s/N_0 (l'énergie d'un symbole par rapport à celle du bruit). Ce paramètre a servi à la comparaison des deux grandes catégories d'algorithmes d'ordonnement que nous avons présentées. La première catégorie permet d'avoir des délais d'attente allant de 20 à 100 ms avant l'allocation des ressources aux différents utilisateurs, alors que les algorithmes de la deuxième catégorie ont la particularité d'être plus flexibles et plus rapides que ceux de la première et permettent d'avoir des délais de l'ordre de 2 ms. En contrepartie, il est nécessaire d'ajouter un appareillage supplémentaire au niveau des stations de base pour implémenter ces algorithmes et, du coup, le degré de complexité est plus élevé.

De plus, l'étude a montré que l'optimisation d'un ordonnanceur de paquets implique la prise en compte de la priorité des retransmissions, des caractéristiques des services offerts et du dimensionnement du réseau. Néanmoins, les résultats ont montré qu'il est difficile de réaliser des chiffres de performance absolus pour les différents algorithmes comparés dans l'étude. Mais de manière générale, il a été montré, d'une part, que les algorithmes appartenant à la deuxième catégorie permettent d'offrir des débits binaires plus élevés, allant jusqu'à 1.4 Mbps par cellule [18]. D'autre part, les caractéristiques du trafic et, en particulier, les exigences de qualité de service peuvent influencer les performances des algorithmes d'ordonnement d'une manière significative. Il est à

noter que cette étude suppose que la quantité de données est la même pour tous les utilisateurs.

D'autre part, Buddendick *et al.* [11] ont réalisé une extension d'un simulateur de la méthode d'accès WCDMA/Release 99 qui permet d'intégrer les propriétés introduites avec la technologie HSDPA : l'AMC, le HARQ et l'ordonnancement rapide. Le système de simulation contient des sources de trafic pour chaque terminal actif et permet d'évaluer des indicateurs de performance tels que le débit binaire et les délais de transmission des paquets. Pour ce faire, le système utilise un générateur de trafic de paquets pouvant être paramétrisé de manière à pouvoir modéliser différents types de trafic. Pour chaque terminal actif, le générateur crée une séquence de paquets avec différentes tailles et différents temps d'arrivée.

Dans cette étude, un environnement réaliste avec des interférences a été considéré. Le réseau d'accès contient 7 cellules avec des antennes omni-directionnelles. Deux types de cellules ont été considérées : des micro-cellules et des macro-cellules. L'algorithme d'ordonnancement utilisé pour la simulation est basé sur le C/I qui optimise le débit au détriment de l'équité entre les utilisateurs, particulièrement lorsque la charge supportée par le réseau est grande. La durée réelle simulée a été de 24 minutes et plus de 8×10^5 paquets ont été transmis dans cet intervalle de temps.

Les résultats obtenus ont montré que des débits maximums de l'ordre de 2.8 Mbps ont été atteints pendant la durée de la simulation. D'autres indicateurs de performance ont été dérivés des statistiques des paquets transmis, comme le délai de transmission de paquets. Étant donné que le nombre de cellules est limité à 7, le nombre d'utilisateurs pouvant être supportés par le réseau s'en trouve aussi limité. Par conséquent, on pourrait se poser la question suivante : ce nombre de cellules est-il suffisant pour avoir une évaluation de performance réaliste ?

Concernant la recherche qui a été menée dans [21], les simulations considèrent un réseau mobile hétérogène où la technologie HSDPA (version R5) coexiste avec la version R99 de l'UMTS. Plusieurs scénarios de simulations ont été considérés en fonction du modèle de trafic utilisé. Trois modèles de trafic ont été créés de la manière suivante :

- 100% de données utilisant la version R99 et le R5 ;
- 100% de données utilisant uniquement la version R5 pour la navigation web HTTP (avec le protocole TCP/IP) ;
- voix utilisant le R99 et le R5.

Les résultats obtenus ont montré que le débit par secteur, avec la version R5

(HSDPA), est 3-4 fois supérieur à celui obtenu avec la version R99. Les résultats ont également montré que la capacité obtenue avec la version R5, en terme de nombre d'utilisateurs par secteur, est 4 fois supérieure à celle qu'offre la version R99. De plus, pour le même nombre d'utilisateurs (50 UE/secteur), le débit moyen par utilisateur est 4 fois supérieur dans le cas du HSDPA, alors que le débit moyen par secteur obtenu pour le service de navigation, basé sur le modèle de trafic TCP/IP, est de l'ordre de 2000 kbps avec la technologie HSDPA. Ainsi, selon cette recherche, le HSDPA est 3 fois supérieur en efficacité spectrale que la version R99 de l'UMTS. Cette recherche n'a cependant pas considéré les services multimédia, sensibles aux délais, comme la visiophonie. On pourrait alors se demander comment varierait le débit moyen par secteur pour cette classe de services.

Comme nous avons pu le constater, aucune méthodologie explicite n'a été utilisée afin d'évaluer la performance de la technologie HSDPA. De plus, les différentes évaluations menées ont supposé une uniformité dans le trafic et ont, dans certains cas, ignoré les phénomènes tels que les trajets multiples ou les effets de masque. Par conséquent, dans le cadre de notre recherche, nous proposons d'élaborer de manière explicite une méthodologie d'évaluation de la performance globale du HSDPA, en utilisant des paramètres géographiques réels. Dans le prochain chapitre, nous allons procéder à l'implémentation de cette technologie et évaluer ses performances à travers des simulations avec un logiciel de planification radio.

Chapitre 4

Performances de la technologie HSDPA

L'évaluation de performance du HSDPA constitue une tâche complexe vu les propriétés avancées sur lesquelles elle se base, telles que l'AMC, le HARQ et l'ordonnancement rapide. Dans le contexte de notre mémoire, nous proposons d'élaborer une méthodologie afin d'évaluer la performance de cette technologie. Nous commencerons par la proposition d'un plan d'expérimentation qui nous donnera toutes les étapes de la méthodologie à suivre dans le but d'évaluer la technologie HSDPA. Par la suite, nous détaillerons l'implémentation de cette technologie avec la sélection des paramètres qui interviendront dans nos simulations que nous effectuerons à l'aide d'un outil de planification radio. Nous terminerons le chapitre par la présentation et l'analyse des résultats de simulations.

4.1 Plan d'expérimentation

Le plan d'expérimentation que nous avons établi est organisé en trois étapes : la caractérisation des paramètres du HSDPA, la modélisation et l'implémentation de cette technologie, et la simulation du réseau d'accès utilisant le HSDPA. La première étape consiste à définir l'ensemble des paramètres nécessaires à la modélisation d'un réseau mobile à base de la technologie HSDPA. Ces paramètres seront regroupés, selon leur nature et leurs fonctionnalités, en trois grandes catégories : géographiques, radio et trafic.

Les paramètres géographiques contiennent toutes les données liées à la topologie et les caractéristiques de la zone sur laquelle sera déployé notre réseau UMTS. Parmi ces caractéristiques, nous devons considérer l'élévation du sol par rapport au niveau de la mer et la nature des différentes zones géographiques (forêts, immeubles, etc) qui peuvent affecter la propagation du signal.

Les paramètres radio concernent les caractéristiques des dispositifs liés à la transmission des ondes radios. Ces dispositifs sont soit des antennes, ou des transmetteurs, et sont indispensables dans tout réseau d'accès. Les antennes transmettent les signaux à travers le lien radio, tandis que les transmetteurs, notés Tx, représentent un groupe d'appareils radio se trouvant sur un emplacement spécifique, qu'on dénotera par « site ». Un site sera défini simplement par ses coordonnées. La définition des paramètres des antennes et des transmetteurs permet de modéliser n'importe quel type de station de base.

Dans notre méthodologie, nous avons choisi de modéliser le trafic selon l'approche statistique de Monte-Carlo [14]. Grâce à cette approche, il est possible de générer des distributions réalistes d'utilisateurs. La création de ces utilisateurs nécessite une connaissance sur les services offerts par le réseau ainsi que sur le comportement des utilisateurs. En effet, nous pouvons regrouper les utilisateurs en fonction des services auxquels ils sont abonnés et de la fréquence avec laquelle ils utilisent ces services (durée moyenne des appels, volume moyen de données échangées, etc). Ces informations seront combinées avec la mobilité (vitesse moyenne) et la densité d'abonnés de la région où se trouve l'utilisateur.

Dans la deuxième étape, il faudra modéliser et implémenter la technologie HSDPA à l'aide d'un outil de planification radio. Cet outil devra être en mesure de représenter toutes les caractéristiques d'un réseau d'accès utilisant le HSDPA, tels que les différents types de canaux physiques spécifiques au HSDPA et l'ensemble des propriétés utilisées par cette technologie.

Une fois la phase d'implémentation terminée, il faudra procéder à la troisième phase : la simulation du réseau. Il existe deux méthodes principales pour simuler un réseau d'accès : les simulations dites « dynamiques » et les simulations « statiques ». Les simulations dynamiques permettent de donner l'état du réseau en fonction d'une référence temporelle. Ce type de simulation nous donne une grande quantité d'informations sur les performances du réseau. Cependant, elles sont très coûteuses en termes de temps de simulation et d'investissement financier, car elles requièrent des outils de simulation aussi bien logiciels que matériels pouvant simuler le comportement d'une station de base par exemple [32].

En ce qui concerne les simulations statiques, elles sont basées sur la technique des *snapshot* (ou capture). L'objectif de cette analyse en snapshot est d'estimer l'état du système pour un trafic donné, et plus particulièrement les différents niveaux des signaux (en terme de puissance et de qualité), les interférences ainsi que les ressources disponibles. En combinant les résultats d'un ensemble de snapshots différents, il est possible d'évaluer la performance du réseau utilisant la technologie HSDPA. Dans le cadre de notre recherche, nous avons opté pour cette méthode de simulation, car elle offre un bon compromis entre l'efficacité et le coût d'investissement.

4.2 Implémentation de la méthodologie

Pour des fins d'implémentation, nous avons choisi d'utiliser l'outil de planification radio AtollTM(de FORSK®). Au préalable, plusieurs solutions ont été envisagées et étudiées, mais nous avons décidé de retenir cet outil car sa flexibilité permet de réaliser rapidement notre implémentation de la méthode d'accès HSDPA. Nous allons donc procéder, dans un premier temps, à la définition des paramètres géographiques et radio d'un réseau d'accès à base de technologie HSDPA avec l'outil Atoll. Par la suite, nous passerons à la modélisation du trafic qui sera supporté par le réseau qu'on désire mettre en place.

4.2.1 Paramètres géographiques

Avant tout, il est indispensable de spécifier le système pour les coordonnées et les unités qui sera utilisé pour représenter une carte géographique. Les coordonnées peuvent être définies soit en termes de positions sur un axe planaire (abscisse et ordonnée) ou alors en degré-minutes-secondes. Ces coordonnées précisent exactement la position de l'emplacement des sites. En ce qui concerne les unités, elles peuvent être définies dans le système métrique ou impériale. Les unités mesurent essentiellement la puissance de transmission/émission, la hauteur et la distance.

Les régions qui présentent un intérêt pour notre recherche sont celles dont les environnements possèdent des reliefs importants et des obstacles naturels afin de prendre en considération les phénomènes d'affaiblissement du signal et de rendre ainsi notre étude de performance la plus proche possible à la réalité. Par conséquent, nous avons décidé de travailler avec des données géographiques réelles qui décrivent la région de Nice en France. Nous avons utilisé le système métrique et le système de projection « NTF (Pa-

ris) / France II étendue » dont les coordonnées sont représentées sur un axe planaire (X et Y).

Pour représenter le relief de la région de Nice, nous faisons appel à des données contenues dans un format appelé DTM (*Digital Terrain Model*), illustré à la figure 4.1, qui associe à chaque pixel de la carte une valeur numérique (sur 16 bits) correspondant à l'élévation du sol du point sur la carte. D'autres données, telle que la densité de la population d'une région, peuvent apporter une information supplémentaire qui peut être exploitée lors de notre étude.

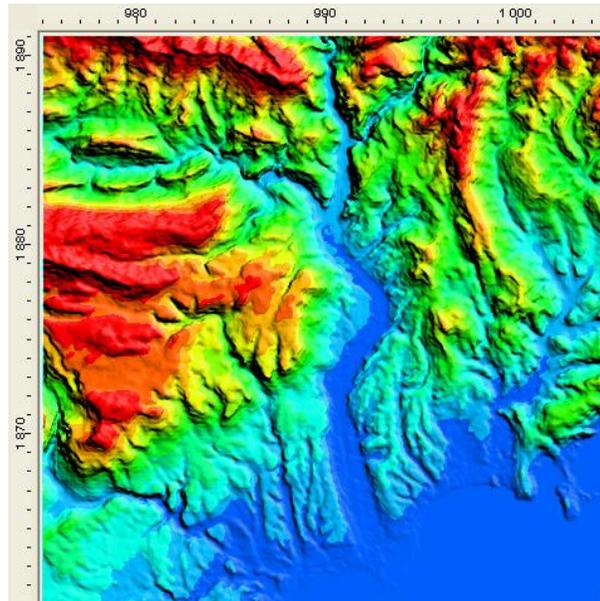


FIG. 4.1 – Carte DTM de la région de Nice (France)

Dans le cas de zones géographiques étendues, comme celle que nous avons choisie, il est possible de restreindre l'étude du réseau à une surface plus réduite grâce à une « zone de calcul » (*computation zone*). Cette zone peut être créée au moyen de polygones, comme illustré à la figure 4.2.

4.2.2 Paramètres radio

Dans notre implémentation, nous avons créé les paramètres radio suivants :

- sites ;
- antennes ;
- transmetteurs ;

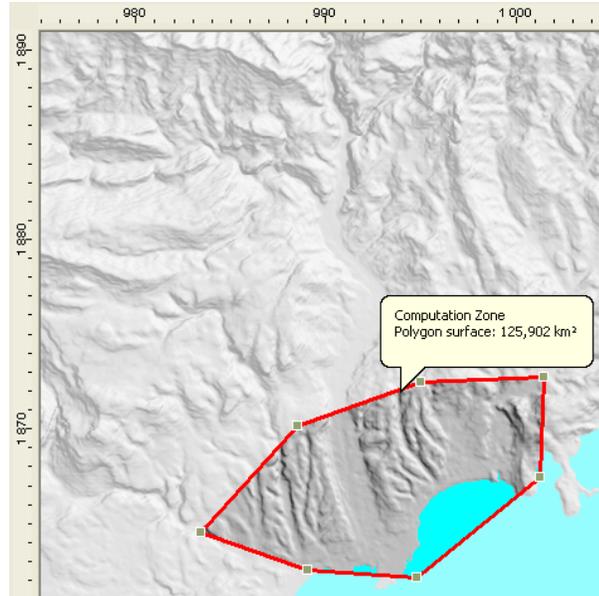


FIG. 4.2 – Étendue de la zone de calcul sur la carte géographique (Nice)

– cellule.

On caractérise un site par son nom, sa position et sa hauteur. Nous avons créé 43 emplacements de sites, sur la région de Nice, répartis selon leurs coordonnées (X et Y) et leur altitude (fournie par la carte DTM), comme l'illustre la figure 4.3.

Il existe plusieurs types d'antennes pré-définies dans les modèles proposés par Atoll, qui sont adaptées selon le type de réseau que l'on désire déployer. Le tableau 4.1 contient les différents paramètres utilisés pour définir une antenne. Pour notre implémentation,

Paramètre	Description
<i>Antenna</i>	Nom du type d'antenne
<i>Manufacturer</i>	Nom du fabricant
<i>Angle</i>	Angle de couverture (en degrés)
<i>Fmin</i>	Fréquence minimum (en Hz)
<i>Fmax</i>	Fréquence maximum (en Hz)

TAB. 4.1 – Paramètres d'une antenne

nous avons utilisé deux types d'antennes : « 120deg » et « 65deg ». Le premier type couvre une région donnée avec un angle de 120 degrés. Le second type d'antenne, quant à lui, dessert une région avec un angle de 65 degrés. Le type *65deg* est utilisé lorsqu'on veut minimiser les interférences dans une zone dense. En effet, les chevauchements entre les différentes antennes peuvent générer des interférences mutuelles qui peuvent perturber

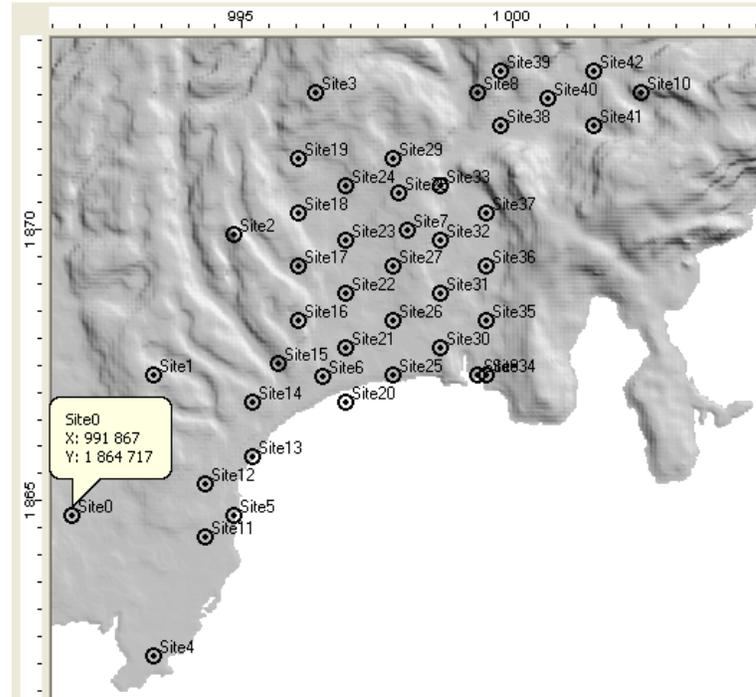


FIG. 4.3 – Emplacement des sites dans la région de Nice

le signal aussi bien sur le lien descendant que montant. Il convient alors d’alterner l’angle de couverture afin de minimiser ces chevauchements. Les autres caractéristiques des types d’antennes utilisées, dans notre implémentation, sont résumées dans le tableau 4.2.

Nom du type d’antenne	Manufacturier	Angle (°)	Fmin (Hz)	Fmax (Hz)
120deg	Kathrein	120	1920	2170
65deg	Kathrein	65	1920	2170

TAB. 4.2 – Types d’antennes considérés

Les transmetteurs comportent une ou plusieurs antennes. Plusieurs transmetteurs peuvent être installés sur un site, généralement au nombre de trois. Une station de base est formée par un ou plusieurs Tx se trouvant sur le même site. Les paramètres d’un transmetteur sont résumés dans le tableau 4.3. Pour chaque transmetteur, il est possible de spécifier les pertes d’émission et de réception, exprimées en dB.

On peut associer un modèle de propagation à chaque transmetteur. Les modèles de propagation permettent de prédire le niveau du signal (puissance) reçu à un point donné, en prenant en compte les données radio tels que la perte de puissance du Tx et le

rayon de calcul de la propagation. Atoll fournit un modèle de propagation, appelé SPM (*Standard Propagation Model*), qui est approprié pour notre étude, car il permet de prendre en compte également les phénomènes liés aux données géographiques tels que les évanouissements dus aux trajets multiples et l'effet de masque. Il est dit standard, car il peut également être utilisé pour d'autres technologies d'accès.

Paramètre	Description
<i>Site</i>	Nom du site où se trouve le Tx
<i>Transmitter</i>	Identifiant du transmetteur
<i>Antenna</i>	Type d'antenne utilisée
<i>Transmission loss (dB)</i>	Perte de puissance du signal émis
<i>Reception loss (dB)</i>	Perte de puissance du signal reçu
<i>Propagation Model</i>	Modèle de propagation du signal utilisé
<i>Calculation radius</i>	Rayon de calcul de la propagation

TAB. 4.3 – Paramètres d'un transmetteur

Paramètre	Description
<i>Site</i>	Nom du site où se trouve le Tx
<i>Transmitter</i>	Identifiant du Tx correspondant
<i>Max Power (dBm)</i>	Puissance maximale avec laquelle peut émettre le Tx
<i>Pilot Power (dBm)</i>	Puissance du signal pilote
<i>SCH Power (dBm)</i>	Puissance du canal de synchronisation
<i>HS-DSCH Power</i>	Puissance du canal HS-DSCH
<i>Max number of HS-PDSCH</i>	Nombre de canaux HS-PDSCH maximum

TAB. 4.4 – Paramètres caractérisant une cellule

Chaque transmetteur couvre une cellule à qui on peut associer une ou plusieurs porteuses. Chaque cellule possède ses paramètres propres que l'on trouve dans le tableau 4.4. On peut spécifier, entre autres, la puissance totale maximale autorisée dans la cellule ainsi que la puissance correspondant au canal HS-DSCH. Le nombre maximum de canaux HS-PDSCH peut être spécifié pour chaque cellule du réseau et correspond au nombre maximum de codes parallèles disponibles. Le tableau 4.5 illustre les valeurs, inspirées des études réalisés dans [21], des paramètres de simulation communs à l'ensemble des transmetteurs mis en place ainsi que celles des cellules associées.

Paramètre	Valeur
<i>Height (m)</i>	29
<i>Transmission loss (dB)</i>	0
<i>Reception loss (dB)</i>	0
<i>Propagation Model</i>	Standard Propagation Model
<i>Calculation radius (m)</i>	5000
<i>Max Power (dBm)</i>	43
<i>Pilot Power (dBm)</i>	30
<i>SCH Power (dBm)</i>	17
<i>HS-DSCH Power</i>	34
<i>Max number of HS-PDSCH</i>	16

TAB. 4.5 – Paramètres communs de simulations des Tx et des cellules

4.2.3 Modélisation du trafic

Dans le but de simuler le trafic du réseau d'accès, il est indispensable de définir d'abord tous les paramètres qui entrent en jeu. Parmi ces paramètres, on retrouve :

- les services ;
- les terminaux ;
- les profils d'utilisateurs ;
- la mobilité.

Étant donné le caractère multimédia des services que l'on vise à offrir dans les réseaux utilisant la technologie HSDPA, nous avons privilégié trois classes de services :

- *Mobile Internet Access* (MIA) qui permet un accès rapide à Internet aux usagers mobiles ;
- *Multimedia Messaging Service* (MMS) permet d'envoyer et de recevoir des images ou de la vidéo ;
- *Visiophony* (Visio) est un service qui permet aux usagers de se voir pendant leur conversation téléphonique (*video conferencing*).

Afin de pouvoir supporter de tels services avec une bonne QoS, il est indispensable de définir certains paramètres propres à chaque service qui permettront d'identifier les différentes classes de services que l'on désire offrir. Les débits nominaux requis sur les deux liens radio (UL et DL) serviront à définir nos classes de services. Le débit nominal $R_{nominal}$ étant le débit nécessaire pour garantir la QoS d'un service. Ce débit sera multiplié par le facteur de codage utilisé pour obtenir le débit effectif. Le débit nominal pour le lien descendant est noté $R_{nominal}^{DL}$, tandis que $R_{nominal}^{UL}$ représente le

débit nominal sur le lien montant.

Un système de priorité a été également introduit afin de mieux répondre aux exigences de chaque service. Par exemple, les services de type conversationnel (temps réel), non tolérants aux délais, se voient attribuer une priorité plus élevée que ceux qui sont plus tolérants aux délais tel que l'accès à l'Internet. Les différentes caractéristiques pour chacun des services que nous avons défini sont décrites au tableau 4.6.

Service	$R_{nominal}^{UL}$ (kbps)	$R_{nominal}^{DL}$ (kbps)	Priorité (0 : la plus basse)
MIA	64	384	0
MMS	64	64	0
Visio	64	64	1

TAB. 4.6 – Caractéristiques des services offerts

Dans le but de supporter des services exigeants en terme de débit, la capacité des terminaux mobiles doit être suffisante pour assurer une bonne QoS. Cette capacité est directement liée au débit et au nombre de codes parallèles que peut supporter le UE. Il existe plusieurs catégories, standardisées, de terminaux selon le débit que peut supporter le terminal. Nous avons donc créé un paramètre représentant la catégorie d'un UE. En plus de la catégorie, il existe plusieurs différences entre les UE tel que l'ergonomie, la présence d'un clavier ou d'une caméra vidéo, etc. Nous avons créé essentiellement deux types de UE : le PDA (*Portable Digital Assistant*) et le MP (*Mobile phone*). Le PDA est idéal pour les services comme l'accès Internet ou la visiophonie, alors que le MP est plus approprié pour des services tel que le MMS. La puissance pouvant être reçue ou émise du terminal est un autre paramètre que nous avons utilisé pour modéliser un UE tel que résumé au tableau 4.7.

Paramètre	Description
P_{min}	Puissance du signal minimum que doit recevoir le terminal mobile
P_{max}	Puissance du signal maximum que peut recevoir le terminal mobile
$UE\ category$	La catégorie du terminal mobile HSDPA
$UE\ type$	Le type de terminal mobile

TAB. 4.7 – Paramètres indiquant les différents types de terminaux mobiles

Le comportement des utilisateurs est un facteur déterminant pour évaluer la performance de tout réseau mobile. Par conséquent, on se doit de simuler ce comportement en créant des classes (ou profils) d'utilisateurs en fonction de certains paramètres décrits dans le tableau 4.8. Dans notre implémentation, nous avons fait la distinction entre les usagers qui utilisent leur terminal mobile d'une manière professionnelle « *Business*

Paramètre	Description
<i>Service</i>	Classe de service que l'utilisateur utilisera
<i>Terminal</i>	Type de terminal mobile dont dispose l'utilisateur
<i>Call/Hr</i>	Nombre d'appels que l'abonné effectue dans une heure de temps
<i>Duration</i>	Durée moyenne de chaque appel (en secondes)
<i>UL volume</i>	Quantité de données moyenne (en kBytes) envoyé sur le lien montant
<i>DL volume</i>	Quantité de données moyenne (en kBytes) reçu sur le lien descendant

TAB. 4.8 – Paramètres des profils d'utilisateurs

User » et ceux qui en font un usage standard « *Standard User* ». Le tableau 4.9 détaille les caractéristiques de chaque profil d'utilisateur que nous avons considéré dans notre implémentation.

Profil	Service	UE	Appel/Hr	Durée(sec)	Volume UL / DL (kByte)
<i>Business User</i>	MIA	PDA	0,5	600	700 / 4500
	MMS	MP	0,3		150 / 150
	Visio	PDA	0,1		
<i>Standard User</i>	MIA	PDA	0,4	200	700 / 4500
	MMS	MP	0,1		100 / 100
	Visio	PDA	0,05		

TAB. 4.9 – Profils d'utilisateurs considérés

Dans un réseau mobile, les utilisateurs ont le choix d'utiliser les services pour lesquels ils ont souscrit peu importe leur mobilité. Cependant, la mobilité peut influencer la qualité des signaux reçus et/ou envoyés par le terminal. Par conséquent, nous devons la caractériser en tenant compte de la vitesse moyenne (*average speed*), exprimée en km/h, avec laquelle se déplace l'utilisateur. Nous avons considéré deux types de mobilité : *Pedestrian* dont la vitesse moyenne est de 3 km/h et *Vehicular* avec une vitesse moyenne de 50 km/h. Un troisième type de mobilité a été envisagé pour les zones rurales où les utilisateurs circulent principalement sur les autoroutes ou routes départementales avec une vitesse moyenne de 90 km/h. Néanmoins, ce type de mobilité ne sera pas pris en considération à cause de limitations liées aux fonctionnalités de l'outil de travail Atoll.

Il existe plusieurs organismes qui effectuent des mesures liées à la densité d'abonnés (nombre d'abonnés par km^2) dans une zone géographique donnée. Ces mesures nous renseignent également sur le comportement des utilisateurs dans les différentes parties de la région donnée. Dans le cadre de nos simulations, ces informations sont contenues dans

un format de fichier d'extension MIF (MapInfo), et renferme des cartes appelé « cartes vectorielles de trafic » (*Traffic vector map*), compatible avec Atoll. Le tableau 4.10 nous donne un aperçu de la structure de telles cartes de trafic. Chaque zone, associée à un identificateur « Id », est représentée par un polygone contenant une certaine densité avec un certain profil d'utilisateur ainsi qu'un type de mobilité donné. Grâce à ces paramètres, nous sommes en mesure de produire un modèle de trafic de données sur le lien radio (UL et DL). Ce modèle sera utilisé pour générer, avec l'aide de l'outil Atoll, une distribution d'utilisateurs spatiale aléatoire à partir de la carte de trafic vectorielle. La carte de

Id	Nom de la région	Profil usager	Mobilité	Densité
1	Arrière-pays	Standard	90 km/h	8
2	Village	Standard	vehicular	10
3	Corniche	Standard	vehicular	10
4	Rurale	Standard	90 km/h	8
5	Villages	Standard	vehicular	10
6	Nice	Business	pedestrian	700
7	Nice aéroport	Business	pedestrian	700
8	Nice périphérie	Standard	vehicular	100
9	Rurale	Standard	90 km/h	5
10	Villages	Standard	vehicular	10
11	Nice centre	Business	pedestrian	4000

TAB. 4.10 – Structure d'une carte de trafic

trafic que nous avons utilisée ainsi que les informations contenues dans le tableau 4.10 produisent un découpage sur la région de Nice tel qu'illustré par la figure 4.4.

4.3 Résultats et analyse

L'ensemble des paramètres que nous avons définis vont nous permettre de simuler un réseau d'accès avec les propriétés propres à la technologie HSDPA. Pour réaliser nos simulations, nous allons utiliser l'outil Atoll. Cet outil nous permet de créer plusieurs groupes de simulations, où chaque groupe correspond à une distribution des utilisateurs dans la zone de calcul définie. Nos simulations reçoivent en entrée le trafic sur le lien montant et descendant. En exécutant une simulation avec Atoll, nous obtenons une distribution spatiale des utilisateurs en fonction du service utilisé, comme l'illustre la figure 4.5. Dans cet exemple, nous avons un total de 241 utilisateurs regroupés en fonction du service utilisé à un instant bien précis (snapshot). Nous avons reproduit

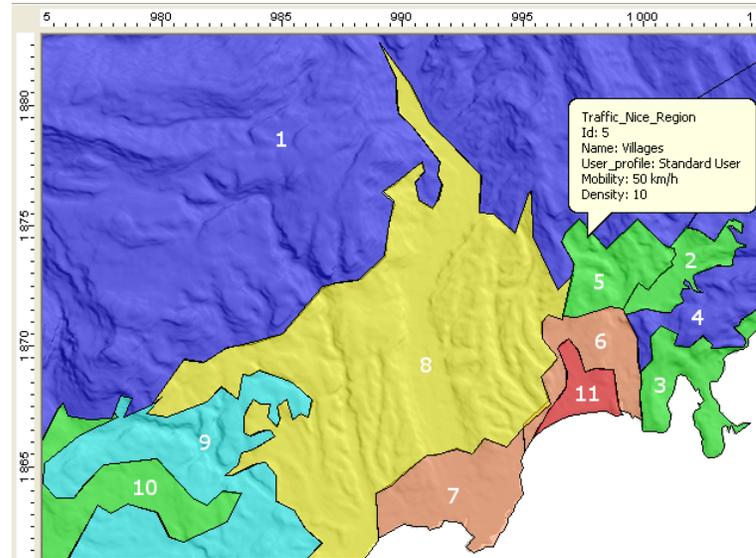


FIG. 4.4 – Représentation des densités de trafic correspondant au tableau 4.10

plusieurs fois nos simulations avec le même nombre d'utilisateurs afin d'obtenir un ensemble de snapshots. Chaque simulation est accompagnée de résultats en termes de débits. Nous avons retenu deux grandes catégories de résultats :

- le débit offert par chaque station de base en fonction du service offert ;
- le débit supporté par chaque cellule du réseau.

Nous avons exécuté un ensemble de 20 simulations qui se sont basées sur les 241 utilisateurs se trouvant dans la région délimitée par la zone de calcul définie tel qu'illustré dans la figure 4.5. Dans un premier temps, les simulations nous donnent les proportions d'utilisateurs en fonction du service qu'ils utilisent. Les résultats montrent que 49% utilisent le service d'accès Internet, 28% le service de messagerie multimédia et 21% utilisent la vidéo-conférence. Ces pourcentages représentent une moyenne calculée sur l'ensemble des simulations exécutées. Ces proportions s'expliquent du fait que dans les profils d'utilisateurs, la fréquence avec laquelle les usagers utilisent le service MIA est la plus élevée parmi tous les services proposés. Ces proportions s'expliquent également par le volume de données moyen reçu et envoyé pour chaque profil d'utilisateur, que nous avons défini dans notre implémentation (voir le tableau 4.9). En effet, le volume de données du service MIA est bien plus important que celui du service MMS.

Par la suite, nous avons obtenu des résultats concernant les débits demandés par les différents utilisateurs selon le service qu'ils invoquent et le débit qu'ils reçoivent. Dans notre cas, tous les utilisateurs desservis reçoivent la totalité du débit requis. Cela

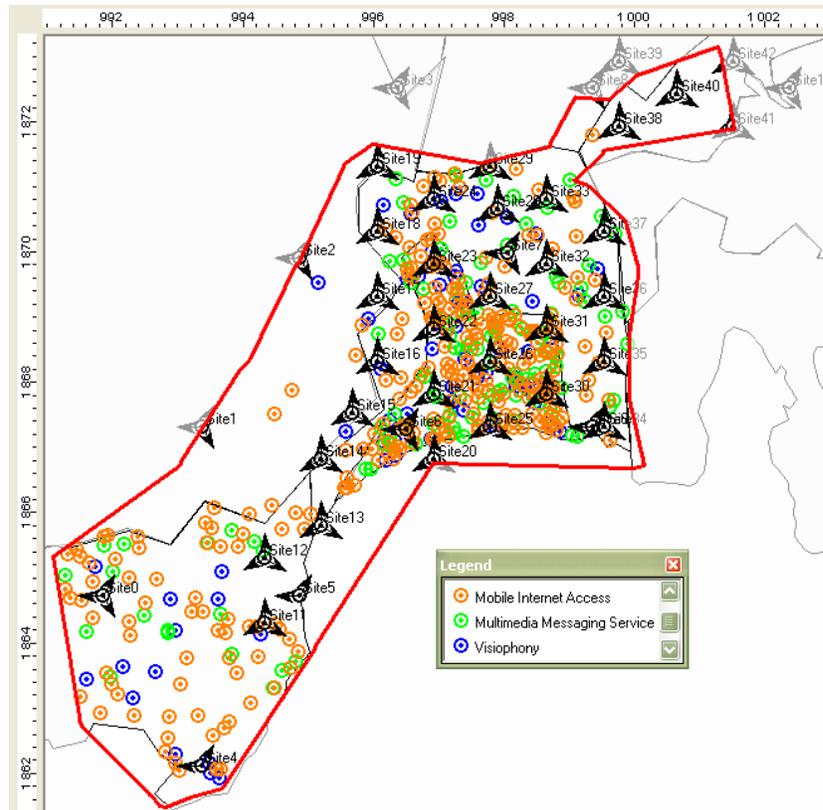


FIG. 4.5 – Distribution des usagers par service

montre que les exigences en matière de QoS sont bien respectées avec la technologie HSDPA. Lorsque le réseau d'accès ne réussit pas à satisfaire un utilisateur pour le service qu'il a demandé, cet utilisateur est alors rejeté. En combinant les résultats obtenus par l'ensemble de nos simulations nous avons dégagé le débit binaire offert en fonction des stations de base, représentées par les sites, pour chacun des services offerts. Ces résultats sont illustrés dans les figures 4.6, 4.8 et 4.7.

On constate que, sur la courbe de la figure 4.6, les débits sur le lien descendant sont importants et qu'ils sont très nettement supérieurs aux débits maximums que permet la version R99 du 3GPP. Ceci est dû principalement à l'introduction de la technologie HSDPA qui avait pour objectif l'augmentation du débit sur le lien descendant. La station de base 19 offre le plus haut débit sur le DL qui avoisine les 3.5 Mbps. Ce débit s'explique du fait que les utilisateurs desservis par cette station sont assez proches de celle-ci par rapport aux autres stations dont les utilisateurs sont un peu plus éloignés. La proximité à une station de base permet de bénéficier d'une bonne qualité de signal et un ordre de modulation important peut être sélectionné, tel que le 16-QAM. L'utilisation de cette modulation permet de sélectionner des MCS offrant ainsi des hauts débits pour

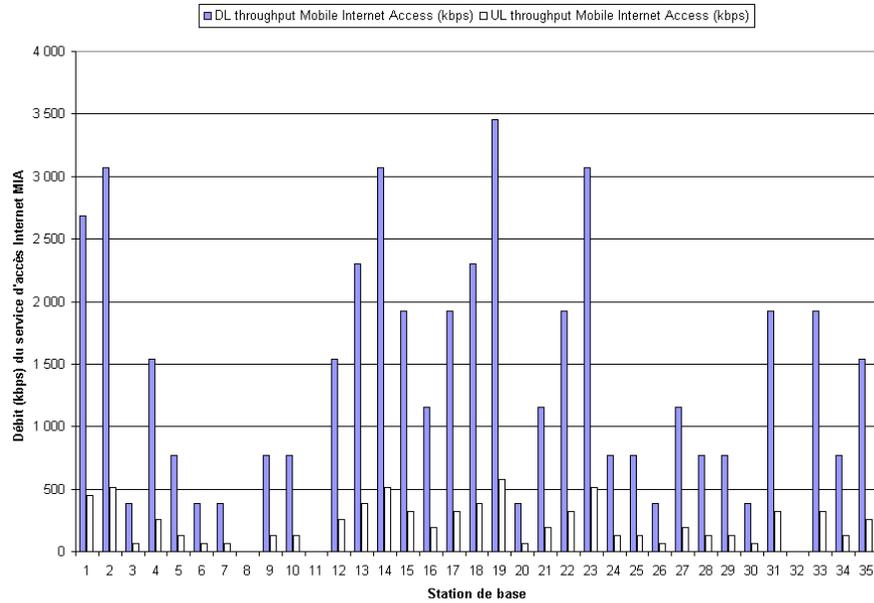


FIG. 4.6 – Débit correspondant au service d'accès Internet MIA

les utilisateurs se trouvant à proximité de leur station de base.

D'un autre côté, on remarque que les stations 3, 6 et 7 par exemple, ont un débit assez faible en raison de l'éloignement des utilisateurs qu'elles desservent. Cet éloignement peut causer la dégradation de la qualité du signal à cause des différents phénomènes liés à la propagation du signal tels que l'effet de masques ou la diminution de la puissance du signal. Ces phénomènes augmentent le taux d'erreur au niveau des données et les délais de transmission sont plus longs. De plus, la qualité du signal étant moins bonne, la BS devra sélectionner un ordre de modulation moins élevé qui est plus approprié vu la fiabilité du lien radio.

À la figure 4.6, on constate aussi une grande différence de débits entre le lien descendant et montant. Les caractéristiques de l'accès Internet font que l'on a beaucoup plus tendance à utiliser le lien descendant pour télécharger des informations contenues dans des serveurs connectés sur Internet. La quantité d'informations reçue sur le DL est plus importante que le volume de requêtes que l'on fait sur le lien montant, d'où la différence de débit offert sur les deux liens DL et UL.

Concernant les courbes des figures 4.7, on remarque que le débit du lien montant est équivalent à celui du lien descendant pour chacune des stations de base de notre réseau. En effet, les exigences de QoS que nous avons fixées pour le service Visio requièrent le même débit nominal, aussi bien sur le lien descendant que sur le lien montant. Cette

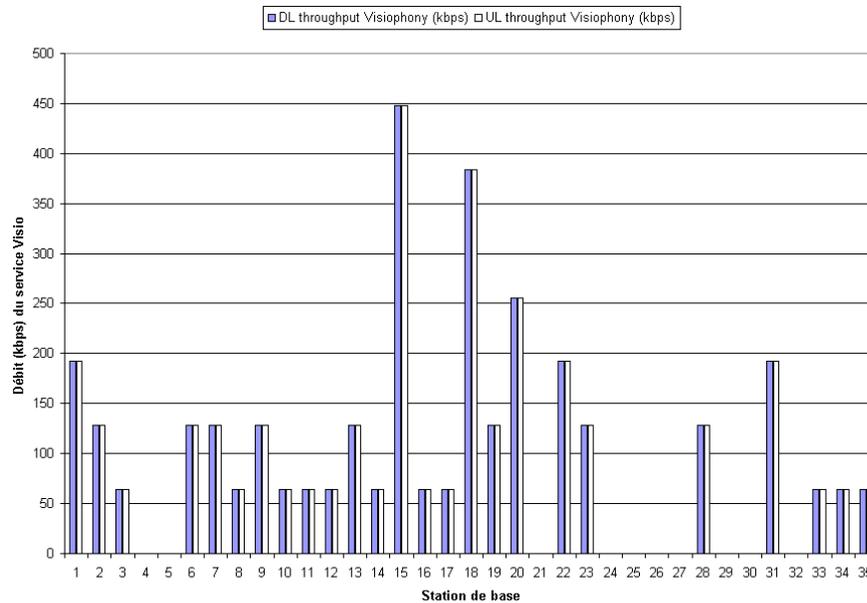


FIG. 4.7 – Débit correspondant au service Visio

condition est directement liée à l'utilisation du service de vidéo-conférence entre deux usagers. En effet, il faudrait satisfaire non seulement le débit nécessaire pour recevoir l'image et le son de son interlocuteur mais aussi de pouvoir bénéficier d'un débit suffisant pour acheminer sa propre vidéo avec le son. Par conséquent, il faudrait disposer d'un débit suffisant et égal pour les deux liens radio.

En ce qui concerne la deuxième catégorie de résultats, nous allons voir comment varie le débit, pour l'ensemble des services offerts, au niveau de chaque cellule du réseau. Dans la figure 4.9, les débits offerts dans certaines cellules, telles que les cellules correspondant aux transmetteurs 6, 28, 43, sont les plus élevés. En effet, les usagers se trouvant dans ces cellules utilisent une catégorie de terminaux ayant la capacité de recevoir 5 codes parallèles. Les terminaux faisant partie de ces catégories peuvent recevoir un débit allant jusqu'à 3,6 Mbps. De plus, la qualité du signal étant bonne, un ordre de modulation élevé peut être utilisé. Selon les MCS définis par la propriété AMC, avec de telles conditions, les utilisateurs peuvent bénéficier d'un débit élevé.

Par contre, il existe des cellules offrant un débit inférieur à 150 kbps, telles que les cellules 14, 17, 35, 68 et 76. Ces cellules se trouvent dans des zones urbaines denses et l'interférence causée par les signaux des autres cellules altèrent la qualité du signal. Dans ces conditions, l'AMC sélectionne la modulation QPSK ainsi qu'un faible taux de codage.

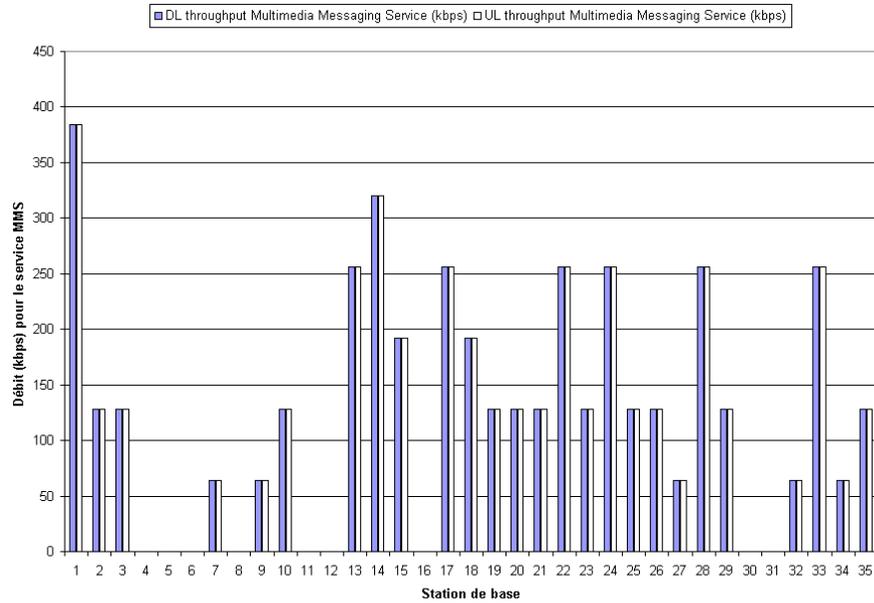


FIG. 4.8 – Débit du service MMS par station de base

Pour terminer, les résultats observés à la figure 4.9 montrent les variations de débits entre les différentes cellules du réseau. On peut expliquer ces variations par le fait que nous avons choisi de déployer le réseau sur une région avec des données géographiques réelles. Ces données comportent des informations sur les différents types d’environnements qui composent cette région tels que les forêts, les montagnes, les immeubles, etc. Ces obstacles réduisent, parfois même masquent, les signaux envoyés par les stations de base ou les terminaux mobiles. La prise en considération de toutes ces données géographiques se reflètent dans les résultats que nous avons obtenus par les variations importantes qu’on peut observer entre les différentes cellules.

Notre étude nous a permis de montrer l’influence que peut avoir des données géographiques précises sur la performance, en terme de débit, de la technologie d’accès HSDPA. Nous avons montré que la qualité du signal pouvait influencer le débit de façon considérable. Nous avons également montré que cette technologie est capable de supporter des services riches en multimédia, comme le MMS.

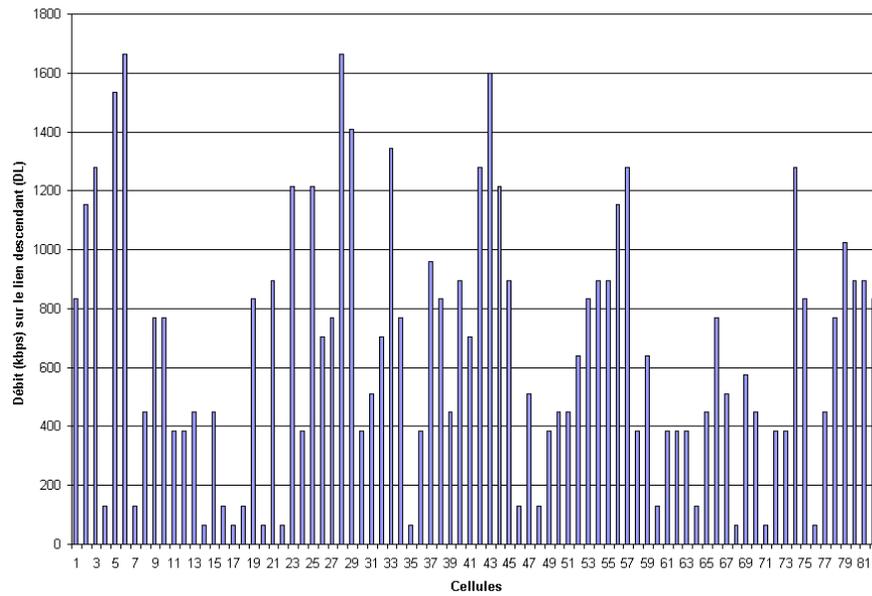


FIG. 4.9 – Débits obtenus pour chaque cellule du réseau sur le lien descendant

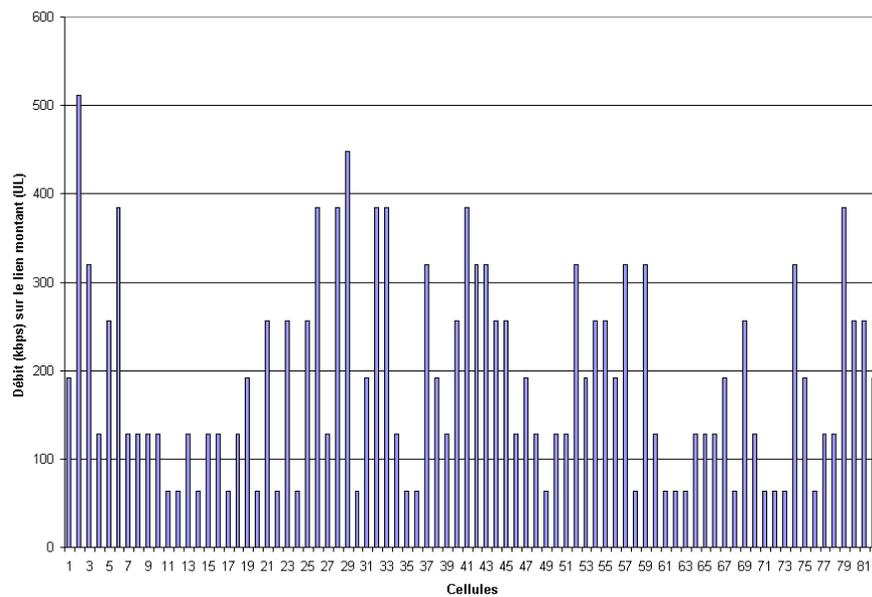


FIG. 4.10 – Débits obtenus pour chaque cellule du réseau sur le lien montant

Chapitre 5

Conclusion

Après avoir présenté et analysé les résultats de simulation, il nous revient maintenant de conclure. Dans cette conclusion, nous ferons d'abord la synthèse des résultats obtenus. Puis, nous présenterons les limitations de nos travaux de recherche et ferons des suggestions pour les travaux futurs.

5.1 Synthèse des résultats

La recherche que nous avons menée dans ce mémoire nous a permis de comprendre les fondements des méthodes d'accès basées sur le CDMA. Afin de bien identifier les paramètres intervenant dans une technique d'accès, nous avons détaillé les fonctionnalités de la couche physique du réseau d'accès. Cette couche possède plusieurs canaux aussi bien fondamentaux que spécifiques à la technologie HSDPA. Nous avons également présenté les propriétés de la technologie HSDPA, tels que la modulation et le codage adaptatifs, le mécanisme de retransmission hybride ainsi que des algorithmes d'ordonnement rapide. La combinaison de ces propriétés permet d'augmenter le débit, sur le lien descendant, d'une manière significative. Par conséquent, nous avons choisi le débit binaire moyen comme paramètre de sortie afin d'évaluer la performance d'un réseau à base de HSDPA. Cependant, la détermination du débit binaire offert par une méthode d'accès représente une tâche complexe. Nous avons donc décidé d'élaborer une méthodologie d'évaluation d'une manière explicite.

Plus particulièrement, nous avons retenu deux aspects du débit : le débit moyen offert par service et le débit moyen offert dans chaque cellule. Le premier aspect nous a

montré que les exigences fixées, en terme de QoS, ont été respectées pour l'ensemble des services offerts. En effet, tous les utilisateurs desservis par le réseau d'accès et ayant sollicité un service nécessitant un débit nominal donné ont été satisfaits. Il existe néanmoins des utilisateurs qui ont été rejetés, car les conditions du lien radio n'étaient pas suffisamment bonnes pour permettre d'utiliser les services sollicités. Ces mauvaises conditions sont liées principalement aux paramètres géographiques de la région choisie. La prise en considération de ces conditions radio contribue à rendre nos simulations plus réalistes. Les phénomènes, tels que l'évanouissement du signal ou l'effet de masque, existent dans la réalité et ils influencent considérablement les performances d'une méthode d'accès.

Les résultats de simulation ont également montré une différence importante entre le débit du lien montant et celui du lien descendant au niveau de la station de base. Par exemple, nous avons obtenu, sur lien UL, un débit maximum UL de l'ordre de 600 kbps pour le service MIA, alors que sur le DL, le débit maximum avoisine les 3.5 Mbps, ce qui représente une amélioration importante comparé au débit offert dans la version R99 de l'UMTS. Le débit obtenu sur le lien descendant confirme la capacité du réseau à supporter des services comme l'accès internet à haute vitesse, tel que le service MIA défini dans notre implémentation qui nécessite un débit nominal, sur le DL, de 384 kbps et de 64 kbps sur le UL. Ces résultats montrent que la technologie HSDPA est particulièrement adaptée aux services qui exigent des débits importants sur le lien descendant.

La deuxième catégorie de résultats nous a permis de constater les variations importantes du débit que l'on pouvait avoir dans les différentes cellules du réseau. Sur le lien montant, nous avons obtenu des débits allant de 64 kbps à 500 kbps (cellule 2), tandis que sur le lien DL, nous avons obtenu des débits allant de 64 kbps (cellule 35) jusqu'à plus de 1600 kbps (cellules 6 et 28). Ces variations traduisent la prise en compte des paramètres géographiques dans notre méthodologie. Elles montrent aussi qu'une évaluation de performance de la méthode HSDPA doit obligatoirement intégrer les paramètres géographiques dans les simulations afin d'avoir des résultats qui reflètent les conditions réelles de fonctionnement d'un réseau d'accès.

De manière générale, nous pouvons affirmer que les principaux objectifs du mémoire ont été atteints à travers la mise en œuvre de la méthodologie d'évaluation de la méthode d'accès HSDPA. Les résultats ont confirmé l'amélioration des performances grâce aux propriétés du HSDPA. Pour terminer, nous pouvons dire que les gains de performances apportés par l'introduction des propriétés de la technologie HSDPA, comme l'adaptation du débit en fonction de la qualité du lien radio, dépendent en grande partie des paramètres géographiques. En effet, les débits obtenus peuvent être très variables de cellule en cellule selon la zone géographique considérée. Par exemple, les cellules 14,

35 et 71 offrent un débit ne dépassant pas les 64 kbps en raison des zones où elles se trouvent et qui contiennent des reliefs importants avec des obstacles naturels (forêts ou immeubles). Étant donné ces conditions, les schémas de modulation et de codage choisis ne permettent pas d'atteindre des débits très élevés.

5.2 Limitations des travaux

Même si, dans l'ensemble, les résultats se sont avérés satisfaisants, nous n'avons considéré uniquement que le débit offert. Il existe d'autres paramètres tels que les délais de transmission, le taux d'erreurs ou l'efficacité spectrale qui permettent également d'évaluer les performances de la méthode d'accès HSDPA.

D'autre part, nous avons été, quelque peu, pénalisé par les limitations de l'outil de planification radio ATOLL dont la version actuelle (2.4) ne possède malheureusement pas de structure qui nous permette d'implémenter le mécanisme de retransmission d'erreur rapide HARQ, ni les différents types d'algorithmes que nous avons présentés dans le chapitre 3. De plus, ATOLL ne permet pas d'exécuter des simulations dynamiques qui montrent l'évolution de certains paramètres telle que la mobilité dans le réseau d'accès sur un axe temporel. En effet, le caractère statique des simulations, sous forme de snapshots, peut limiter les effets de la mobilité des usagers sur la performance du système.

5.3 Orientations de recherches

Au terme de nos travaux de recherche, nous pouvons suggérer quelques orientations possibles pour la suite de nos travaux. La première orientation concerne le processus de simulation de l'outil de planification Atoll. Une extension logicielle pourrait être développée et intégrée à travers les API de l'outil afin de considérer l'effet dynamique de la mobilité et son influence sur les performances globales du système. Le mécanisme de retransmission HARQ et des algorithmes d'ordonnancement plus intelligents pourraient être également implémentés afin d'assurer une meilleure évaluation.

Par ailleurs, le jumelage de la solution logicielle avec des dispositifs électroniques capables de générer des signaux semblables à ceux que génère une BS par exemple, pourrait rendre l'évaluation de la performance plus précise et donner une meilleure idée du potentiel réel de la méthode d'accès HSDPA.

Pour terminer, une autre suite de nos travaux consiste à implémenter des propriétés utilisées dans la technologie HSDPA, tels que l'AMC et le HARQ, pour améliorer également le débit sur le lien montant. Cette amélioration pourrait permettre l'émergence de nouveaux services à valeur ajoutée qui pourraient exploiter ce débit. Cette amélioration est prévue par l'organisme 3GPP sous le nom de HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) et fait l'objet de plusieurs recherches [34] [29].

Bibliographie

- [1] 3GPP Technical Specification 22.004, *Technical Specification Group Services and System Aspects : General on supplementary services*, Release 1999, 2000.
- [2] 3GPP Technical Specification 25.107, *Technical Specification Group Services and System Aspects : Quality of Service (QoS) concept and architecture*, Release 1999, 2002.
- [3] 3GPP Technical Specification 25.211, *Physical Channels and Mapping of Transport Channels onto Physical Channels (FDD)*, Release 5, 2004.
- [4] 3GPP Technical Specification 25.212, *Multiplexing and Channel Coding (FDD)*, Release 99, 2002.
- [5] 3GPP Technical Specification 25.308, *HSDPA Overall Description*, Release 5, 2003.
- [6] 3GPP Technical Specification 25.306, *Technical Specification Group Radio Access Network : UE Radio Access capabilities*, Release 5, 2005.
- [7] 3GPP Technical Specification 25.213, *Technical Specification Group Radio Access Network : Spreading and modulation (FDD)*, Release 5, 2005.
- [8] Adachi F., Sawahashi M., Okawa K., *Tree-structured generation of orthogonal spreading codes with different lengths for forward link of DS-CDMA mobile*, Electronic letters, Volume 33, Issue 1, 1997, pp. 27 - 28.
- [9] Ameigeiras P., Wigard J., Mogensen P., *Performance of packet scheduling methods with different degree of fairness in HSDPA*, Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th Volume 2, 2004, pp. 860 - 864.
- [10] Anderson J. B., Svensson A., *Coded Modulation Systems*, Springer, 2002.
- [11] Buddendick H., Wolffe G., Burger S., Wertz P., *Simulator for performance analysis in UMTS FDD networks with HSDPA*, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004. PIMRC 2004. 15th IEEE International Symposium on Volume 3, 2004, pp. 2251 - 2255.
- [12] Das A., Khan F., Sampath A., Hsuan-Jung Su, *Adaptive, asynchronous incremental redundancy ($A/sup 2/IR$) with fixed transmission time intervals (TTI) for HSDPA*, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on Volume 3, 2002, pp. 1083 - 1087.

- [13] Dornan A., *The Essential Guide to Wireless Communications Applications*, Prentice Hall, 2002.
- [14] Gentle J. E., *Random Number Generation and Monte Carlo Methods*, Springer, 2005.
- [15] Golomb S. W., *Shift Register Sequences*, Aegean Park Press, 1992.
- [16] Haardt M., Klein A., Koehn R., Oestreich S., Purat M., Sommer V., Ulrich T., *The TD-CDMA based UTRA TDD mode*, Selected Areas in Communications, IEEE Journal on Volume 18, Issue 8, 2000, pp. 1375 - 1385.
- [17] Holma H., Toskala A., *WCDMA for UMTS, Radio Access for Third Generation Mobile Communications*, JohnWiley & Sons, 4th edition, 2004.
- [18] Kolding T. E., Frederiksen, F., Mogensen, P.E., *Performance aspects of WCDMA systems with high speed downlink packet access (HSDPA)*, Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th, vol.1, pp. 477-481.
- [19] Krueger R., Mellein H., *UMTS, Introduction and Measurement*, Rohde-Schwarze, 2004.
- [20] Lee J. S., Miller L. E., *CDMA for Third Generation Mobile Communications*, Artech House, 1998.
- [21] Love R., Ghosh A., Weimin Xiao, Ratasuk R., *Performance of 3GPP high speed downlink packet access (HSDPA)*, Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th Volume 5, 2004, pp. 3359 - 3363.
- [22] MacWilliams F. J., Sloane N. J. A., *The Theory of Error-Correcting Codes*, North-Holland, 1977.
- [23] Parkvall S., Dahlman E., Frenger P., Beming P., Persson M., *The evolution of WCDMA towards higher speed downlink packet data access*, Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Spring. IEEE VTS 53rd Volume 3, 2001, pp. 2287 - 2291.
- [24] Proakis J. G., *Digital Communications*, McGraw-Hill, 1995.
- [25] Safwat A. M., Mouftah H., *4G network technologies for mobile telecommunications*, Network, IEEE Volume 19, Issue 5, 2005, pp. 3 - 4.
- [26] Sanchez J., Thioune M., *UMTS, Services, Architectures et WCDMA* Lavoisier, 2001.
- [27] Sharma G., Kumar G.S., *Moving towards HSUPA (high speed uplink packet access) : a complete 3.5G wireless system*, Personal Wireless Communications, 2005. ICPWC 2005. 2005 IEEE International Conference, 2005, pp. 174 - 177.
- [28] Sarwate D. V., Pursley M. B., *Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences*, Proceedings of the IEEE Volume 68, Issue 5, 1980, pp. 593 - 619.

- [29] Meng Zhang, Tao Chen, Jiancun Hu, *Throughput-based and power-based load control in HSUPA*, Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2005. Proceedings. 2005 International Conference on Volume 2, 2005, pp. 969 - 973
- [30] Smith C., Collins D., *3G Wireless Networks*, McGraw-Hill Professional, 2002.
- [31] Tabbane S., *Réseaux Mobiles*, Hermès, 1997.
- [32] Turke U., Koonert M., Schelb R., Gorg C., *HSDPA performance analysis in UMTS radio network planning simulations*, Vehicular Technology Conference, 2004. VTC 2004-Spring. 2004 IEEE 59th Volume 5, 2004, pp. 2555 - 2559.
- [33] Wacker A., Laiho-Steffens J., Sipilä K., Jaesberg M., *Static simulator for studying WCDMA radio network planning issues*, Vehicular Technology Conference, 1999 IEEE 49th Volume 3, 1999, pp. 2436 - 2440.
- [34] Xu Zhaoji, Sebire B., *Impact of ACK/NACK signalling errors on high speed uplink packet access (HSUPA)*, Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on Volume 4, 2005, pp. 2223 - 2227.