

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
TABLE DES MATIERES	ii
NOTATIONS.....	vi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 EVOLUTION DES GENERATIONS DE RESEAUX	2
1.1 Introduction.....	2
1.2 Généralités sur les réseaux mobiles.....	2
1.3 Architecture générale d'un réseau mobile.....	3
1.4 La première génération de téléphonie mobile	3
1.5 La deuxième génération de la téléphonie mobile (2G)	4
1.5.1 <i>Le réseau GSM</i>.....	5
1.5.2 <i>Le réseau GPRS</i>	5
1.5.3 <i>Le réseau EDGE</i>	6
1.6 La troisième génération de la téléphonie mobile (3G)	6
1.6.1 <i>Le réseau UMTS</i>	7
1.6.1.1 L'équipement utilisateur	8
1.6.1.2 Le sous-système radio RNS (Radio Network Subsystem)	8
1.6.1.3 Le réseau cœur (UMTS Core Network).....	10
1.6.1.4 Les fréquences utilisées en UMTS.....	11
1.6.1.5 Le débit de l'UMTS	11
1.6.1.6 Technologies utilisées en UMTS	12
1.6.2 <i>Les évolutions HSPA</i>	13
1.6.3 <i>Les évolutions HSPA+</i>.....	14
1.7 Une avancée vers le LTE	14
1.7.1 <i>Architecture du réseau LTE</i>	14
1.7.1.1 Le réseau core EPC.....	15
1.7.1.2 Le réseau d'accès e-UTRAN	16
1.7.2 <i>Capacité</i>.....	17
1.7.3 <i>Les débits</i>.....	17
1.7.4 <i>La latence</i>	17
1.7.5 <i>L'adaptation au spectre disponible</i>	18
1.7.6 <i>Les catégories d'UE d'un système LTE</i>	19
1.8 Conclusion	19

CHAPITRE 2 LE RESEAU D'ACCES DE L'UMTS	20
2.1 Introduction.....	20
2.2 Mécanismes de propagation.....	20
2.3 Les types d'interférences.....	21
2.4 Caractéristiques du canal radio.....	22
2.4.1 <i>La sélectivité en fréquence</i>	22
2.4.1.1 Etalement multivoie	22
2.4.1.2 Bande de cohérence	22
2.4.1.3 Canaux sélectifs en fréquence	23
2.4.1.4 Canaux non sélectifs en fréquence.....	23
2.4.2 <i>Canal à évanouissement rapide et à évanouissement lent.....</i>	23
2.4.2.1 Etalement Doppler	23
2.4.2.2 Temps de cohérence.....	24
2.4.2.3 Canal à évanouissement rapide	24
2.4.2.4 Canal à évanouissement lent	24
2.5 La notion de diversité	24
2.6 Les modes de duplexage	25
2.7 Le réseau d'accès UMTS.....	25
2.7.1 <i>La structure en couches du réseau.....</i>	26
2.7.2 <i>Les protocoles de l'interface radio</i>	27
2.7.3 <i>Les canaux</i>	28
2.7.3.1 Les canaux logiques du système UMTS	29
2.7.3.2 Les canaux de transport du système UMTS.....	29
2.7.3.3 Les canaux physiques du système UMTS.....	29
2.7.4 <i>Description de l'UTRAN.....</i>	30
2.7.4.1 Le CDMA	30
2.7.4.2 Le concept W-CDMA.....	33
2.7.4.3 Le concept TD/CDMA	33
2.7.4.4 Comparaison entre le mode FDD WCDMA et TDD TD/CDMA.....	34
2.8 Les catégories d'UE d'un système UMTS	35
2.9 Conclusion	36
CHAPITRE 3 LE RESEAU D'ACCES DU LTE.....	37
3.1 Introduction.....	37
3.2 Structure de trame de l'interface radio	37
3.3 Principes de l'OFDM.....	39

3.3.1 La modulation OFDM	40
3.3.2 Le préfixe cyclique	41
3.3.3 La démodulation OFDM	43
3.4 L'OFDMA	44
3.5 La modulation SC-FDMA	46
3.6 La dimension fréquentielle en LTE	47
3.7 Les canaux	48
3.7.1 Les canaux logiques	48
3.7.2 Les canaux de transport	50
3.7.3 Les canaux physiques	51
3.7.4 Association des différents canaux	53
3.8 Techniques MIMO	54
3.9 Capacité en LTE	56
3.10 Ordonnancements en LTE	57
3.10.1 Algorithmes d'ordonnancement en downlink	57
3.10.1.1 Les algorithmes opportunistes	57
3.10.1.2 Les algorithmes équitables	58
3.10.1.3 Algorithmes considérant les délais	58
3.10.1.4 Algorithmes optimisant le débit	58
3.10.1.5 Les algorithmes multi-classe	59
3.10.2 Algorithmes d'ordonnancement en uplink	59
3.10.2.1 Ordonnanceurs de flux best effort	59
3.10.2.2 Ordonnanceurs considérant la QoS	59
3.10.2.3 Ordonnanceurs traitant la puissance du signal	60
3.11 Conclusion	60
CHAPITRE 4 HANDOVER ENTRE UMTS ET LTE	61
4.1 Introduction	61
4.2 Les mécanismes de mobilité en mode connecté	61
4.3 Généralités sur le handover	62
4.3.1 Les différents types de handover	62
4.3.2 Les différentes phases d'un handover	63
4.3.3 Le rôle de l'UE dans un handover	64
4.4 Le handover LTE vers UMTS	64
4.4.1 Mécanismes de Direct Forwarding et de Direct Tunnel	65
4.4.2 Procédure du handover en mode paquet	66
4.4.2.1 Les mesures	67

4.4.2.2 La préparation du handover	68
4.4.2.3 L'exécution du handover	72
4.5 Le handover UMTS vers LTE	75
4.5.1 Procédure du handover	75
4.5.1.1 Les mesures LTE	75
4.5.1.2 La préparation	76
4.5.1.3 L'execution du handover	77
4.6 Critères du handover.....	77
4.6.1 Puissance recue.....	78
4.6.2 Le délai.....	78
4.6.3 Echec du handover	79
4.6.3.1 Handover LTE vers UMTS.....	79
4.6.3.2 Handover UMTS vers LTE.....	79
4.7 Conclusion	79
CHAPITRE 5 SIMULATION SOUS MATLAB.....	80
5.1 Introduction.....	80
5.2 Choix du logiciel : MATLAB	80
5.3 Présentation de la simulation.....	81
5.3.1 Paramétrage de la simulation.....	81
5.3.1.1 Cellule LTE	82
5.3.1.2 Cellule UMTS.....	83
5.3.1.3 Equipement utilisateur et autre	84
5.3.1.4 L'environnement.....	85
5.3.2 Déroulement de la simulation	86
5.3.2.1 Paramètres 01	87
5.3.2.2 Paramètres 02.....	96
5.4 Conclusion	99
CONCLUSION GENERALE	100
ANNEXE 1 ARCHITECTURE DE L'EPS	101
ANNEXE 2 ARCHITECTURE EN COUCHES DU RESEAU LTE	102
ANNEXE 3 MODELE DE PROPAGATION : OKUMURA HATA	104
ANNEXE 4 MATRICE DE HADAMARD	105
ANNEXE 5 PROGRAMMATION DE LA SIMULATION.....	106
BIBLIOGRAPHIE	108
FICHE DE RENSEIGNEMENTS.....	111

NOTATIONS

1. Minuscules latines

c	Célérité de la lumière
d	Distance
d_f	Epaisseur des arbres
f	Fréquence
f_d	Fréquence Doppler
f_0	Fréquence porteuse
k	Constante de Boltzmann
n	Vecteur bruit
v	Vitesse
x	Vecteur de transmission
y	Vecteur de réception

2. Majuscules latines

B	Bandé passante
B_s	Largeur de bande du signal
B_C	Bandé de cohérence du canal
B_d	Bandé Doppler
C	Capacité
D_c	Débit chip
D_d	Débit de données
D_f	Diversité fréquentielle.
D_t	Diversité temporelle
G	Gain
H	Matrice de transmission

K_q	Rang de la matrice H (canal MIMO)
L	Perte ou attenuation
P	puissance
PL_{FS}	Atténuation en espace libre
Q	Nombre de sous canal
R	Nombre de bloc de ressource
R_{DL}	Débit descendant
R_{UL}	Débit montant
T	Température
T_c	Temps de cohérence
T_{rame}	Durée de transmission de la trame
T_m	Etalement multivoie
W_i	Délai toléré par le flux

3. Minuscules grecques

α :	Symbole d'entrée sur l'antenne physique
η_{BW}	Efficacité de la bande passante
η_{BW}	Efficacité SNR
θ_n	L'angle entre le signal reçu et la direction du vecteur vitesse

4. Majuscules grecques

$\alpha_{k,q}$	Gain de puissance de sous canal (k,q)
$\beta_{k,q}$	Allocation de puissance pour le sous canal (k,q)
Δ_{coh}	Bande de cohérence
σ_{N_t}	Puissance de bruit

5. Abréviations

AF	Application Function
AMPS	Advanced Mobile Phone System

Auc	AUthentication Center
BCH	Broadcast Channel
BCCH	Broadcast Control Channel
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Sub-system
BTS	Base Transceiver Station
CC	Call Control
CCCH	Common Control Channel
CCPCH	Primary Common Control Physical Channel
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
CP	Cyclic Prefix
CS	Circuit Switched
dB	DeciBel
dBm	DéciBel Milliwatt
DCH	Dedicated CHannel
DCCH	Dedicated Control CHannel
DL	DownLink
DPCCH	Dedicated Physical Circuit CHannel
DPCCH	Dedicated Physical CHannel
DPDCH	Dedicated Physical Data CHannel
DS-CDMA	Direct Sequence CDMA
DSCH	Downlink Shared Channel
DTCH	Dedicated Traffic CHannel
DwPTS	Downlink Pilot Time Slot
EDGE	Enhanced Data rate for GSM Evolution
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ETACS	Extended Total Access Communication System
eUTRAN	evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FACH	Forward Access CHannel
FDD	Frequency Division Duplex

FDMA	Frequency Division Multiplex Access
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMM	GPRS Mobility Management
GMSC	Gateway Mobile Switching Center
GP	Guard Period
GPP	Generation Partnership Project
GPRS	Global Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
GTP	GPRS Tunneling Protocol
GW	GateWay
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HLR	Home Location Register
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSPA+	High Speed Packet Access+
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IES	Interférence Entre Symboles
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunications Union
IuCs	Iu Circuit Switched
IuPs	Iu Packet Swiched
Km	Kilomètre
LA	Location Area
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MAP	Mobile Application Part
MATLAB	MATrix LABoratory

ME	Mobile Equipment
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MM	Mobility Management
MME	Mobility Management Entity
MMS	Multimedia Message Service
MSC	Mobile Switching Center
MTP	Message Transfert Part
MU-MIMO	Multiple User MIMO
NAS	Non Access Stratum
NMT	Nordic Mobile Telephone
NSS	Network Sub System
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PBCH	Physical Broadcast CHannel
P-CCPCH	Primary CCPCH
PCCH	Paging Control CHannel
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PCH	Paging CHannel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDCCH	Physical Downlink Control CHannel
PDN	Packet Data Network
PDP	Packet Data Protocol
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDU	Protocol Data Unit
PFGBR	Proportional Fair with Guaranteed Bit Rate
P-GW	PDN Gateway
PIRE	Puissance Rayonée Isotrope Equivalente
PLMN	Public Land Mobile Network
PN	Pseudo random Noise code
PRACH	Physical Random Access Channel
PRB	Physical Ressource Block
PS handover	Packet-Switched handover

PSS	Primary Synchronisation Signal
P-TMSI	Packet Temporary Mobile Subscriber Identity
PUCCH	Physical Uplink Control CHannel
PUSCH	Physical Uplink Shared CHannel
RAB	Radio Access Bearer
RACH	Random Access CHannel
RA	Routing Area
RAN	Radio Access Network
RANAP	Radio Access Network Application Part
RAT	Radio Access Technologies
RF	RadioFréquences
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network Subsystem
RRC	Radio Ressource Control
RRM	Radio Ressource Management
RSCP	Received Signal Code Power
RSRP	Reference Signal Received Power
RTCP	Réseau Téléphonique Commuté Public
SAE	System Architecture Evolution
SCCP	Signaling Connection Control Part
S-CCPCH	Secondary CCPCH
SDU	Service Data Unit
SF	Spreading Factor
SGSN	Serving GPRS Support Node
SGW/PDNGW	Serving GW /Packet Data Network GateWay
SIM	Subscriber Identity Module
SM	Session Management
SMS	Short Message Service
SNR	Signal to Noise Ratio
SRS	Signaux de Référence de Sonde
SR-VCC	Single Radio Voice Call Continuity

SS	Supplementary Service
SU_MIMO	Single User MIMO
TACS	Total Access Communication System
TCAP	Transaction Capabilities Application Part
TMSI	Temporary Mobile Subscriber Identity
TD-CDMA	Time Division Code Division Multiple Access
TDD	Time Division Duplex
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UL	Uplink
UL-SCH	Uplink Shared CHannel
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UpPTS	Uplink Pilot Time Slot
URA	UTRAN Registration Area
USIM	UMTS Subscriber Identity Module
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access Evaluation
WRC	World Radio Conference
1G	1 ^{ère} Génération
2G	2 ^{ème} Génération
2.5G	2,5 ^{ème} Génération
2.75 G	2,75 ^{ème} Génération
3G	3 ^{ème} Génération
3GPP	3rd Generation Partnership Project
3,5G	3,5 ^{ème} Génération
3,9 G	3,9 ^{ème} Génération

INTRODUCTION GENERALE

Les évolutions technologiques se poursuivent partout de nos jours, et cela nous pouvons le sentir jusque dans les réseaux de télécommunication. Ceux-ci connaissent un essor sans précédent ces dernières années avec le déploiement de plusieurs générations successives. La présence des systèmes de communication sans fil dans notre vie quotidienne tend ainsi à remplacer l'utilisation excessive de câbles.

Après les réseaux de télécommunication dédiés à la téléphonie, un véritable tournant survient avec le multimédia mais aussi l'arrivée du réseau LTE (Long Term Evolution) pour une amélioration du débit, des applications prises en charge par ces réseaux et pour construire un cadre permettant leur interopérabilité.

Dans le contexte de cette nouvelle technologie de réseau, notre travail de mémoire s'est penché sur l'étude de la continuité du réseau UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) avec le LTE, du transfert intercellulaire sans coupure et avec un niveau de qualité de service acceptable ; notre choix s'est porté sur le Handover vertical avec un minimum de délai entre le réseau LTE et le réseau UMTS qui est son prédecesseur, largement déployé avant lui. En effet, le déploiement d'un réseau se faisant progressivement, il est important de gérer une continuité avec les systèmes déjà implantés dans la zone, d'où le titre de ce mémoire « Etude du Handover vertical entre les systèmes LTE et UMTS).

De ce fait, le premier chapitre de notre travail survolera l'évolution des différentes générations de réseaux en partant du réseau de 1^{ère} Génération (1G), jusqu'au réseau LTE, avec une étude plus pointilleuse sur le système UMTS et le LTE. Le deuxième chapitre sera consacré à une étude de l'accès radio du réseau UMTS et le troisième chapitre celui du LTE. Le quatrième chapitre étudiera les étapes de Handover en général, celles du Handover vertical du réseau LTE vers l'UMTS et de l'UMTS vers le LTE, en partant du principe général adopté par le 3GPP (3rd Generation Partnership Project) pour la définition des procédures de Handover en appel que le système source s'adapte au système cible. Le cinquième chapitre sera réservé à la simulation ; pour ce faire, nous avons choisi le logiciel MATLAB (MATrix LABoratory) pour mener à bien notre travail. Enfin, nous dresserons une conclusion générale de notre étude et nous proposerons des perspectives à ce travail.

CHAPITRE 1

EVOLUTION DES GENERATIONS DE RESEAUX

1.1 Introduction

Ce chapitre présente, dans un premier temps, les étapes majeures du développement des réseaux mobiles, de leur premier pas dans les années 1970 à leur dernière évolution. Ces rappels permettront de mieux appréhender le contexte d'émergence du LTE.

Pour ce faire, nous allons présenter les différentes générations de téléphones mobiles, leurs architectures ainsi que d'autres services pouvant être utilisés par chacune de ces générations cellulaires. Nous insisterons sur le réseau UMTS ainsi que le LTE comme ils sont tous deux la base de notre travail.

1.2 Généralités sur les réseaux mobiles

L'usage des services de communications mobiles a connu un essor remarquable, ces dernières années. A la fin de l'année 2012, on compte environ 6.4 milliards d'abonnés à travers le monde et en 2013 6,84 milliards.

C'est véritablement un nouveau secteur de l'industrie mondiale qui s'est créé, regroupant notamment constructeurs de circuits électroniques, de terminaux mobiles, d'infrastructures de réseaux, développeurs d'applications et de services et opérateurs de réseaux mobiles. [1] [2]

Concernant les réseaux mobiles, les réseaux de la 1^{ère} génération ont été intégrés au réseau de télécommunication dans les années 80. Ces systèmes ont cependant été abandonnés il y a quelques années laissant la place à la seconde génération, appelée 2G lancée en 1991. Elle est encore active de nos jours. Nous pouvons distinguer deux autres types de générations au sein même de la seconde : la 2.5G, ou GPRS (*Global Packet Radio Service*) et la 2.75 ou aussi appelée EDGE (*Enhanced Data rate for GSM Evolution*). Le principal standard utilisant la 2G est GSM. A la différence de la 1G, la seconde génération de normes permet d'accéder à divers services, comme l'accès à Internet. Tandis que pour la 3^{ème} génération, elle permet un haut débit pour l'accès à l'internet et le transfert de données. Cette dernière connaît deux évolutions à son sein qui sont la 3,5G ou 3G+ ou encore Super 3G, aussi appelée HSPA (*High Speed Packet Access*) et la 3,9 G connu sous le nom de LTE. En ce qui concerne la nouvelle génération 4G (LTE Advanced), elle n'est déployée jusque-là que par quelques pays. Cependant, le réseau LTE permet déjà un très haut débit, une moindre latence et beaucoup d'autres services que l'on verra dans la suite.

1.3 Architecture générale d'un réseau mobile

L'architecture d'un réseau mobile inclut trois entités fonctionnelles :

- le terminal mobile, appelé aussi équipement utilisateur (ou usager), abrégé en UE (*User Equipment*) ;
- le réseau d'accès ou RAN (*Radio Access Network*) ;
- le réseau cœur ou CN (*Core Network*).

On distingue également deux domaines :

- le domaine de l'UE, qui inclut les équipements propres à l'utilisateur ;
- le domaine de l'infrastructure, constitué des équipements propres à l'opérateur.

La figure suivante présente la structure d'un réseau mobile. L'UE fait partie du domaine de l'équipement utilisateur et est interconnecté au réseau d'accès par l'intermédiaire de l'interface radio. L'élément d'interconnexion du réseau d'accès avec l'interface radio est la station de base. Le réseau d'accès et le réseau cœur sont rattachés au domaine de l'infrastructure et sont interconnectés par une ou plusieurs interfaces terrestres. [1]

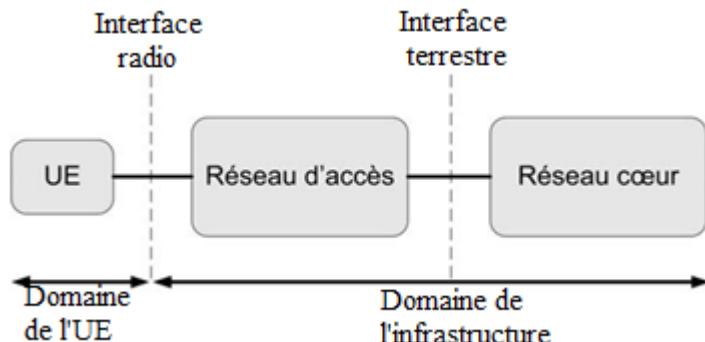


Figure 1.01 : Structure d'un réseau mobile [1]

En effet, l'histoire des réseaux mobiles est jalonnée par quatre, et bientôt cinq, étapes principales auxquelles on donne couramment le nom de génération. Ce sont donc ces trois entités, ou encore ces deux domaines qui seront mise en exergue durant l'étude de l'évolution de ces générations.

1.4 La première génération de téléphonie mobile

La première génération de téléphonie mobile (notée **1G**) possédait un fonctionnement analogique et était constituée d'appareils relativement volumineux.

Il s'agissait principalement des standards suivants [1] [3]:

- AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), apparu en 1976 aux Etats-Unis, constitue le premier standard de réseau cellulaire. Utilisé principalement Outre-Atlantique, en Russie et en Asie, ce réseau analogique de première génération possédait de faibles mécanismes de sécurité rendant possible le piratage de lignes téléphoniques ;
- TACS (*Total Access Communication System*) est la version européenne du modèle AMPS. Utilisant la bande de fréquence de 900 MHz, ce système fut notamment largement utilisé en Angleterre, puis en Asie (Hong-Kong et Japon) ;
- ETACS (*Extended Total Access Communication System*) est une version améliorée du standard TACS développé au Royaume-Uni utilisant un nombre plus important de canaux de communication ;
- NMT (*Nordic Mobile Telephone*) dans les pays scandinaves ;
- Radiocom2000 en France ;
- C-NETZ en Allemagne.

Ces systèmes devaient offrir un service de téléphonie en mobilité. Ils ne parvinrent pas à réellement franchir les frontières de leurs pays d'origine et aucun système ne s'imposa en tant que véritable norme internationale. D'un point de vue technique, ces systèmes étaient basés sur un codage et une modulation de type analogique. Ils utilisaient une technique d'accès multiples appelée FDMA (*Frequency Division Multiplex Access*), associant une fréquence à un utilisateur. La capacité de ces systèmes demeurait très limitée, de l'ordre de quelques appels voix simultanés par cellule. Cette contrainte de capacité, ainsi que les coûts élevés des terminaux et des tarifs de communication ont restreint l'utilisation de la 1G à un très faible nombre d'utilisateurs (60 000 utilisateurs de Radiocom2000 en 1988 en France). Par ailleurs, les dimensions importantes des terminaux limitaient significativement leur portabilité [1]. Les réseaux cellulaires de première génération ont été rendus obsolètes avec l'apparition d'une seconde génération entièrement numérique. [3]

1.5 La deuxième génération de la téléphonie mobile

La seconde génération de réseaux mobiles (notée 2G) a marqué une rupture avec la première génération de téléphones cellulaires grâce au passage de l'analogique vers le numérique qui permet ainsi une sécurisation des données (avec cryptage).

1.5.1 Le réseau GSM

GSM est le standard utilisant les bandes de fréquence 900 MHz et 1800 MHz en Europe. Grâce à ce dernier, il est possible de transmettre la voix ainsi que des données numériques de faible volume, notamment des messages textes (SMS, pour *Short Message Service*) ou encore des messages multimédias (MMS, pour *Multimedia Message Service*). La norme GSM permet un débit maximal de 9,6 kbps. La figure 1.03 présente l'architecture du réseau GSM. [2] [4]

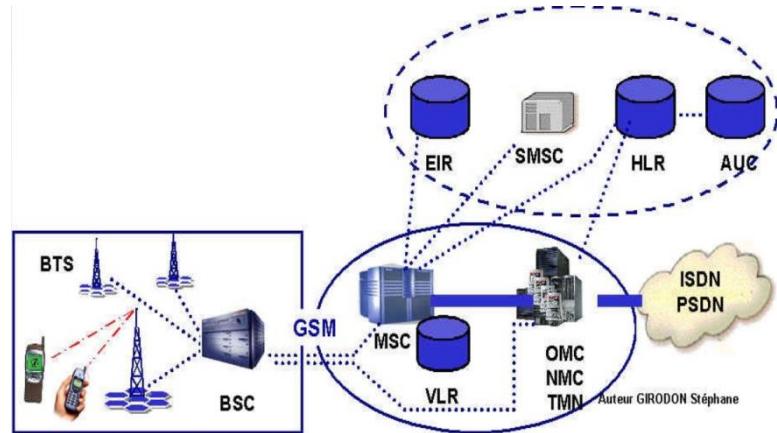


Figure 1.02 : Architecture du réseau GSM [4]

Le réseau GSM est composé de la partie BSS (*Base Station Sub-system*) qui est un sous-système de l'architecture GSM et qui assure les transmissions radioélectriques et gère les ressources radio; elle est composée des stations mobiles, des BTS (*Base Transceiver Station*) et des BSC (*Base Station Controller*) qui contrôlent un ensemble de BTS et permettent une première concentration des circuits. Le réseau est aussi composé de la partie NSS (*Network Sub System*) composée des MSC (*Mobile Switching Center*), VLR (*Visitor Location Register*), HLR (*Home Location Register*) ainsi que de l'Auc (*AUthentication Center*).

Cependant, des extensions de la norme GSM ont été mises au point afin d'en améliorer le débit. C'est le cas notamment du standard GPRS (*General Packet Radio System*).

1.5.2 Le réseau GPRS

Le GPRS est une extension du protocole GSM : il ajoute par rapport à ce dernier la transmission par paquets. Cette méthode est plus adaptée à la transmission des données. En effet, les ressources ne sont allouées que lorsque des données sont échangées, contrairement au mode « circuit » en GSM où un circuit est établi, ainsi que les ressources associées, pour toute la durée de la communication. Le standard GPRS permet alors d'obtenir un débit théorique maximal de l'ordre

de 171,2 kbit/s, plus proche de 50 kbit/s dans la réalité. Cette technologie ne rentrant pas dans le cadre de l'appellation « 3G » a été baptisée 2.5G. [1][2][4]

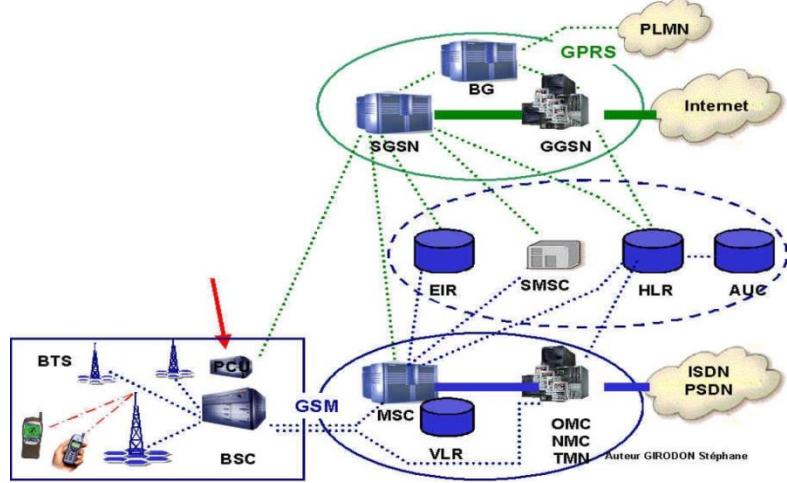


Figure 1.03 : Architecture du réseau GPRS [2]

Son architecture ajoute à celle du GSM, le SGSN (*Serving GPRS Support Node*), routeur permettant de gérer les coordonnées des terminaux de la zone et de réaliser l'interface de transit des paquets avec la passerelle GGSN (*Gateway GPRS Support Node*), qui est une passerelle s'interfaisant avec les autres réseaux de données (internet). Le GGSN est notamment chargé de fournir une adresse IP aux terminaux mobiles pendant toute la durée de la connexion.

1.5.3 Le réseau EDGE

La norme EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*) présentée comme 2.75G quadruple les améliorations du débit de la norme GPRS en annonçant un débit théorique de 384 Kbps, ouvrant ainsi la porte aux applications multimédias. En réalité la norme EDGE permet d'atteindre des débits maximum théoriques de 473 kbit/s, mais elle a été limitée afin de se conformer aux spécifications IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications-2000*) de l'ITU (*International Telecommunications Union*). [4]

1.6 La troisième génération de la téléphonie mobile

Les spécifications IMT-2000 de l'ITU définissent les caractéristiques de la 3G.

Ces caractéristiques sont notamment les suivantes [3]:

- un haut débit de transmission : 144 Kbps avec une couverture totale pour une utilisation mobile, 384 Kbps avec une couverture moyenne pour une utilisation piétonne, 2 Mbps avec une zone de couverture réduite pour une utilisation fixe.
- compatibilité mondiale
- compatibilité des services mobiles de 3ème génération avec les réseaux de seconde génération

La 3G propose d'atteindre des débits supérieurs à 144 kbit/s, ouvrant ainsi la porte à des usages multimédias tels que la transmission de vidéo, la visioconférence ou l'accès à internet haut débit.

1.6.1 Le réseau UMTS

Le réseau coeur de l'UMTS s'appuie sur les éléments de base du réseau GSM et GPRS. Il est en charge de la commutation et du routage des communications (voix et données) vers les réseaux externes. Dans un premier temps, le réseau UMTS devrait donc s'appuyer sur le réseau GPRS.

Le réseau UMTS vient se combiner aux réseaux déjà existants GSM et GPRS, qui apportent des fonctionnalités respectives de Voix et de Données, le réseau UMTS apporte ensuite les fonctionnalités Multimédia. Le réseau coeur se décompose en deux parties: le domaine circuit dans un premier temps et le domaine paquet. La **Figure 1.04** présente l'architecture du réseau UMTS. [2]

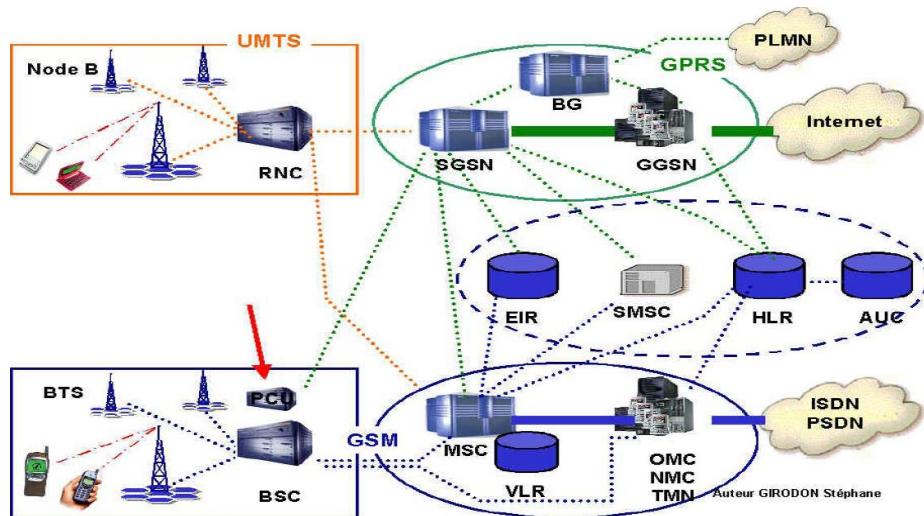


Figure 1.04 : Architecture du réseau UMTS [4]

1.6.1.1 L'équipement utilisateur

L'utilisateur UMTS est équipé d'un UE (User Equipment) qui est composé du *Mobile Equipment* (ME) correspondant au combiné téléphonique (terminal mobile) et de la carte USIM (UMTS Subscriber Identity Module). Le rôle de l'USIM est semblable à celui de la carte SIM en GSM. Elle enregistre les identités de l'abonné telles que l'IMSI (International Mobile Subscriber Identity), le TMSI, le P-TMSI, les données de souscription, la clé de sécurité (Ki) et les algorithmes d'authentification et de génération de clé de chiffrement. L'UE peut se rattacher simultanément aux domaines circuit (MSC) et paquet (SGSN) et peut alors disposer simultanément d'un service GPRS et d'une communication téléphonique. [5]

1.6.1.2 Le sous-système radio RNS (Radio Network Subsystem)

Le sous-système radio se compose de deux éléments distincts, à savoir le nœud B (node B) et le contrôleur de réseau radio RNC (Radio Network Controller).

a) *Le Node B*

Le Node B est l'équivalent de la BTS du réseau GSM. Il peut gérer une ou plusieurs cellules. Il inclut un récepteur CDMA qui convertit les signaux de l'interface Uu (Interface Air) en flux de données acheminées au RNC sur l'interface Iub. Dans l'autre sens, le transmetteur CDMA convertit les flux de données reçues du RNC pour leur transmission sur l'interface Air. Il existe trois types de Node B correspondant aux deux modes UTRA: Node B UTRA-FDD, Node B UTRA-TDD et Node B mode dual, ce dernier pouvant utiliser les deux modes simultanément. [6]

b) *Le RNC*

Le RNC possède et contrôle les ressources radio des Node B auxquelles il est connecté. Le RNC est le point d'accès au service pour tous les services que l'UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) fournit au réseau de base.

Nous pouvons voir sur la **Figure 1.05** que le RNC et les Node B sont connectés entre eux et au réseau de base par trois interfaces.

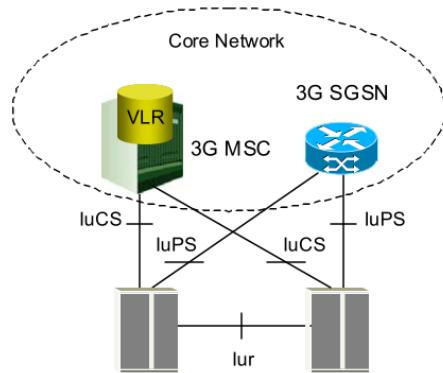


Figure 1.05 : Interface entre l'UTRAN et le réseau de base [6]

L'interface Iu est une interface qui sépare l'UTRAN, domaine spécifique à la radio, du réseau de base, domaine chargé de la commutation, du routage et du contrôle des services. Elle peut être de deux type: IuCs (Iu Circuit Switched) pour le domaine circuit, et IuPs (Iu Packet Swiched) pour le domaine paquet.

Le RNC assure les mécanismes de Handover aussi appelé hard-handover et de macro-diversité, connu sous le nom de soft-handover. Le Handover est la capacité du réseau à maintenir une communication lorsqu'un mobile change de cellule. La macro-diversité est la phase pendant laquelle la station mobile maintient plusieurs liens radio avec des cellules différentes. Cependant, le soft-handover ne s'applique qu'à la technologie W-CDMA. Les technologies HSDPA et HSUPA ne peuvent s'appuyer que sur le hard-handover.

Le RNC gère ces deux mécanismes à travers l'interface Iub, lorsqu'il s'agit d'un déplacement entre cellules de différents Node B sous le contrôle du même RNC, ou à travers l'interface Iur lorsque les deux cellules sont contrôlés par des RNCs différents, ou encore à travers l'interface Iu lorsque par exemple l'interface Iur est absente).

Deux rôles de RNC ont été introduits afin de gérer la macro-diversité et le handover inter-RNC: le Serving RNC et le Drift RNC (un RNC joue l'un ou l'autre des deux rôles pour une communication). Chaque communication met en œuvre un Serving RNC, et passe par 0, 1 ou plusieurs Drift RNC [6]:

- Le Serving RNC gère les connexions radios avec le mobile et sert de point de rattachement au réseau de base via l'interface Iu. Il contrôle et exécute le handover.
- Le Drift RNC, sur ordre du Serving RNC, gère les ressources radios des Node B qui dépendent de lui. Il effectue la recombinaison des liens lorsque du fait de la macro-diversité plusieurs liens radios sont établis avec des Node B qui lui sont attachés. Il “route”

les données utilisateur vers le Serving RNC dans le sens montant et vers les Node B dans le sens descendant.

1.6.1.3 Le réseau cœur

Les opérateurs de réseau qui disposent d'un réseau GSM/GPRS et ayant obtenu une licence UMTS ont deux approches possibles afin d'aborder le déploiement de leur réseau UMTS: approche intégrée ou approche overlay (recouvrement).

Avec l'approche intégrée, leur réseau de base GSM/GPRS est actualisé et réutilisé avec les mêmes entités de commutation (MSC) et routage (GSN) pour les deux interfaces radio GSM et UMTS. La nouvelle interface radio UTRAN est reliée par l'interface IuCs au MSC, qui est actualisé avec une nouvelle interface ATM et les nouveaux protocoles de signalisation, il est appelé 3G MSC, et est rattachée par l'interface IuPS au SGSN qui est actualisé avec une nouvelle interface ATM et les nouveaux protocoles de signalisation, il est appelé 3G SGSN. Cette approche permet la réutilisation des systèmes de gestion existants et des sites de commutation, mais le rattachement d'une nouvelle technologie radio non encore complètement maîtrisée à un réseau existant peut poser des problèmes de capacité, de performance et de stabilité.

Avec l'approche recouvrement (overlay), l'opérateur utilise un autre réseau de base constitué de 3G MSCs et 3G SGSNs pour supporter l'interface UTRAN. Cette solution permet un développement parallèle du réseau UMTS sans impact sur le réseau GSM/GPRS courant. [6]

Le réseau cœur est responsable de la commutation et du routage des communications (voix/données) dans le même réseau ou vers les réseaux externes. Il se décompose en deux parties : le domaine circuit et le domaine paquet.

a) Le domaine circuit

Le domaine circuit permettra de gérer les services temps réels dédiés aux conversations téléphoniques tel que la vidéo-téléphonie, les jeux vidéo, et les applications multimédia. Ces applications ont besoin d'un temps de transfert rapide. Ainsi, lors de l'introduction de l'UMTS le débit du mode domaine circuit pourra atteindre les 384 Kbits/s.

L'infrastructure s'appuie sur les principaux éléments du réseau GSM: le MSC/VLR correspondant à un commutateur téléphonique auquel est rattachée une base de données pour les abonnés

visiteurs de la zone de service de ce MSC et le GMSC afin d'avoir une connexion directe vers les réseaux externes tel que le RTCP (Réseau Téléphonique Commuté Public).

b) Le domaine paquet

Le domaine paquet permettra de gérer les services non temps réels. Il s'agit principalement de la navigation sur Internet, de la gestion de jeux en réseaux ainsi que l'accès et l'utilisation des e-mails. Ces applications sont moins sensibles au temps de transfert, c'est la raison pour laquelle les données transiteront en mode paquet. Le débit du domaine paquet sera sept fois plus rapide que le mode circuit, environ 2Mbits/s. L'infrastructure s'appuie alors sur les principaux éléments du réseau GPRS: SGSN (bases de données existantes en mode paquet GPRS, équivalent des MSC /VLR en réseau GSM) et le GGSN (équivalent du GMSC en réseau GSM) qui jouera le rôle de commutateur vers le réseau Internet et les autres réseaux publics ou privés de transmission de données et qui négociera la qualité de service.

1.6.1.4 Les fréquences utilisées en UMTS

En Février 1992, le World Radio Conference (WRC) avait alloué pour l'usage de l'UMTS les bandes de 1885-2025 et 2110-2200 MHz. Le partage de ces fréquences se fait comme suit [5] :

- 1920-1980 et 2110-2170 MHz : utilisées en mode FDD (Frequency Division Duplex). On parle alors de WCDMA. Les liaisons montantes et descendantes sont appariées; l'espacement des canaux est de 5 MHz. Un opérateur aura besoin de 3 ou 4 canaux (2 x 15 ou 2 x 20 MHz) pour mettre en place un réseau à haut débit et à capacité élevée.
- 1900-1920 et 2010-2025 MHz : utilisées en mode TDD (Time Division Duplex). On parle alors de TD-CDMA. Les canaux ne sont pas appariés, c'est à dire que l'émission et la réception ne sont pas séparées en fréquence. L'espacement des canaux est toujours de 5 MHz.
- 1980-2010 et 2170-2200 MHz: réservées pour les liaisons par satellite (montante et descendante).

1.6.1.5 Le débit de l'UMTS

Avant de parler du débit délivré par le réseau UMTS, il est important de distinguer les interactions entre capacité et débit. La capacité d'une cellule correspond au trafic total maximal qu'elle peut

écouler en situation de forte charge au cours d'une période donnée. La capacité d'une cellule est conditionnée par l'efficacité spectrale du système et la ressource spectrale disponible. Aussi, la présence de plusieurs UE actifs sous une même cellule se traduit par une réduction du débit fourni à chacun. En particulier, le débit moyen par utilisateur en situation de forte charge peut être approché par la capacité divisée par le nombre d'UE actifs dans la cellule. La capacité d'un réseau limite donc la valeur des débits dans un scénario impliquant plusieurs UE actifs, ou le nombre d'UE pouvant être servis simultanément avec un débit donné. [1]

Le débit fourni à un utilisateur dépend de ses conditions radio, liées en particulier à sa position dans la cellule, des techniques de transmission employées et de la ressource spectrale disponible. L'UMTS permet théoriquement des débits de transfert de 1,920 Mbit/s, mais fin 2004 les débits offerts par les opérateurs dépassent rarement 384 Kbit/s. Néanmoins, cette vitesse est nettement supérieure au débit de base GSM qui est de 9,6 kbit/seconde. Le débit est différent suivant le lieu d'utilisation et la vitesse de déplacement de l'utilisateur [5]:

- En zone rurale : 144 kbit/s pour une utilisation mobile (voiture, train, etc.) ;
- En zone urbaine : 384 kbit/s pour une utilisation piétonne.
- En zone bâtiment : 2000 kbit/s depuis un point fixe.

Grâce à son débit, l'UMTS ouvre la porte à des applications et à des nouveaux services tel que l'aspect vidéo: visiophonie, MMS Vidéo, vidéo à la demande, télévision. En effet, l'UMTS permet en particulier de transférer dans des temps relativement courts des contenus multimédia tels que les images, les sons et la vidéo.

1.6.1.6 Technologies utilisées en UMTS

L'UMTS Release 99 utilise la technologie W-CDMA (Wideband CDMA ou CDMA large bande). Cette dernière est basée sur une technique d'accès multiples CDMA et supporte les deux schémas de duplexage FDD et TDD. Le signal utile est étalé sur une largeur de bande de 3.84 MHz avant mise sur porteuse (d'où le nom de large bande), une porteuse occupant un canal de 5 MHz. Chaque appel est associé à un code spécifique connu de la station de base et du terminal, qui permet de le différencier des autres appels en cours sur la même porteuse. Le W-CDMA autorise la connexion simultanée à plusieurs cellules, renforçant la qualité des communications lors du

changement de cellule en mobilité. La Release 99 est limitée à un débit maximal de 384 Kbits/s dans les sens montant et descendant. [1]

Une variante de l'UMTS TDD, appelée TD-SCDMA (Time Division Synchronous CDMA), est également normalisée par le 3GPP. Cette technologie opère sur une largeur de bande de 1.28 MHz, et est principalement déployée en Chine.

L'UMTS connaît deux évolutions qui sont HSPA (High Speed Packet Access), et le HSPA+ (High Speed Packet Access+).

1.6.2 Les évolutions HSPA

Les évolutions HSPA, aujourd’hui connues commercialement sous le nom de 3G+, ont été introduites pour dépasser les limites de la Release 99. On distingue :

- HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) pour la voie descendante ;
- HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) pour la voie montante.

Ces évolutions ont été définies par le 3GPP respectivement en Release 5 (2002) et Release 6 (2005) afin d'accroître les débits possibles et de réduire la latence du système. [1]

L'innovation principale du HSPA concerne le passage d'une commutation circuit sur l'interface radio, où des ressources radio sont réservées à chaque UE pendant la durée de l'appel, à une commutation par paquets, où la station de base décide dynamiquement du partage des ressources entre les UE actifs. L'allocation dynamique des ressources est effectuée par la fonction d'ordonnancement ou scheduling, en fonction notamment de la qualité instantanée du canal radio de chaque UE, de ses contraintes de qualité de service, ainsi que de l'efficacité globale du système. La commutation par paquets optimise ainsi l'usage des ressources radio pour les services de données.

La modulation et le codage sont rendus adaptatifs afin de s'adapter aux conditions radio de l'UE au moment où il est servi, les débits instantanés étant accrus via l'utilisation de modulations à plus grand nombre d'états qu'en Release 99. La modulation 16QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation) est introduite pour la voie descendante en complément de la modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) en vigueur en Release 99. De même, la modulation QPSK est introduite pour la voie montante en complément de la modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying) utilisée en Release 99. Enfin, un nouveau mécanisme de retransmission rapide des paquets erronés, appelé HARQ (Hybrid Automatic Response reQuest), est défini entre l'UE et la

station de base, afin de réduire la latence du système en cas de perte de paquets. Ces évolutions offrent aux utilisateurs des débits maximaux de 14,4 Mbit/s en voie descendante et de 5,8 Mbit/s en voie montante, ainsi qu'une latence réduite. [1]

1.6.3 Les évolutions HSPA+

La technologie UMTS et ses évolutions HSPA n'ont plus satisfait au besoin de certains pays tels que le Japon et les États-Unis en termes de capacité, cela dû à la mise sur le marché de terminaux attractifs comme les Smartphones et l'introduction de nouveaux services impliquant une connexion quasi-continue au réseau. Ainsi, l'augmentation de la charge des réseaux a entraîné la dégradation de la qualité de service fournie aux clients. Afin de répondre à ces contraintes, le 3GPP a défini deux nouvelles normes qui sont l'évolution du HSPA, appelé HSPA+ et le LTE.

Le HSPA+ vise principalement à améliorer les débits fournis aux utilisateurs et la capacité du système par l'introduction de nouvelles techniques, ainsi que la gestion des utilisateurs always-on, qui fait référence aux utilisateurs toujours connectés.

Ainsi, en voie descendante, le HSPA+ utilise la modulation 64QAM, et en voie montante la modulation 16QAM. En plus de cela, deux porteuses peuvent transporter des données vers un utilisateur simultanément en voie descendante, grâce à la fonctionnalité DC-HSDPA (Dual Carrier –HSDPA). De ce fait, la limite du spectre de transmission n'est donc plus limitée à 5 MHz mais à 10 MHz. L'introduction de la fonctionnalité MIMO (Multiple Input Multiple Output) en voie descendante améliore encore plus le débit.

Les évolutions HSPA+ permettent ainsi la perpétuité des réseaux 3G.

1.7 Une avancée vers le LTE

Lors d'un atelier organisé par le 3GPP en novembre 2004, le LTE a été envisagé pour être l'évolution à long terme de l'UMTS.

1.7.1 Architecture du réseau LTE

Les principaux équipements de l'architecture LTE sont ceux cités sur la **Figure 1.06**.

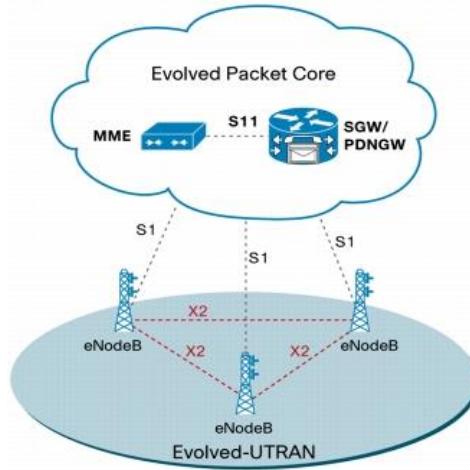


Figure 1.06 : Architecture d'un réseau LTE

Comme tous les réseaux pour mobiles, celui de la LTE se compose de deux parties : l'accès radio eUTRAN (evolved Universal Terrestrial Radio Access Network), composé de l'eNodeB, et le cœur de réseau l'EPC (Evolved Packet Core) tout IP, qui regroupe le MME (Mobility Management Entity) et le SGW/PDNGW (Serving GW / Packet Data Network GW). [2] [4]

1.7.1.1 Le réseau core EPC

L'EPC est le réseau core IP défini par le groupe 3GPP dans la version 8 pour être exploité par LTE et d'autres technologies d'accès. [7] L'objectif de l'EPC est de fournir une architecture tout-IP simplifiée du réseau core afin de fournir un accès efficace à divers services tels que ceux fournis dans IP Multimedia Subsystem (IMS). L'EPC se compose principalement des entités suivantes (**Annexe 01**):

- l'entité de gestion de mobilité (MME), la passerelle de service (S-GW), la passerelle PDN (P-GW),
- l'entité serveur de l'abonné résidentiel ou HSS (Home Subscriber Server) et la fonction de politique de contrôle et de chargement des règles ou PCRF (Policy and Charging Rules Function).

a) L'entité S-GW

L'entité S-GW est une entité chargée d'acheminer les paquets de données de l'utilisateur. Elle sert aussi comme un point d'ancrage de mobilité lors du handover entre eNBs et lors du handover entre LTE et d'autres technologies 3GPP. Lorsque l'UE est en mode veille, le S-GW détermine le

chemin du lien descendant et détecte la pagination lorsqu'un flux de données à télécharger arrive au UE. Il se charge aussi de marquer les paquets de la couche transport sur le lien UL et le lien DL. [7] [8]

b) La passerelle P-GW

La P-GW assure la connectivité de l'usager UE à des réseaux de paquets de données externes, remplissant la fonction d'entrée et de sortie pour les données du UE. Ce dernier peut être connecté à plusieurs P-GW assurant l'accès à différents réseaux de paquets. [7] [9]

c) L'entité HSS

La HSS est l'évolution de l'entité HLR des anciens réseaux. Cette entité contient alors les informations de souscription pour tous les réseaux (GSM, GPRS, UMTS, LTE et IMS). La HSS est donc une grande base de données qui est utilisée simultanément par les réseaux 2G, 3G, LTE et IMS appartenant à un même opérateur. [7]

d) L'entité PCRF

L'entité PCRF est déployée afin de détecter les flux de service et d'y appliquer les politiques de tarification. Cependant, un élément additionnel est requis pour les services et les applications nécessitant une politique de tarification dynamique. Cet élément additionnel est appelé fonction d'applications ou AF (Application Function).

1.7.1.2 Le réseau d'accès e-UTRAN

Le réseau d'accès e-UTRAN est composé principalement de stations de base appelées eNodeB (eNB). Une station de base eNB est responsable de la réception et la transmission radio avec l'UE. De plus, l'eNB prend en charge des fonctions de mesure radio et préparation de rapport de mesures utiles pour la gestion de mobilité ainsi que pour l'ordonnancement. Cet élément du réseau est responsable aussi de la sélection d'un MME pour chaque UE lors de la procédure d'attachement, si la configuration fournie à cet usager ne précise pas de MME. Plusieurs fonctions primordiales pour le fonctionnement du réseau sont prises en charge par l'élément radio eNB que nous verrons dans le chapitre 3.

1.7.2 Capacité

La mise sur le marché de terminaux tels que les Smartphones ou les clés 3G+ a entraîné l'explosion des usages de services de données mobiles. L'utilisation de réseaux mobiles comme alternative aux réseaux de données résidentiels est aussi à l'origine de la très forte croissance du trafic de données mobiles. Face à cette augmentation du trafic, les opérateurs de réseaux 3G doivent activer de nouvelles porteuses s'ils souhaitent maintenir des débits satisfaisants. Ainsi, une raison majeure ayant motivé l'introduction du LTE est par conséquent le besoin d'accroître la capacité des réseaux mobiles.

Le système LTE supporte simultanément un large nombre d'utilisateurs par cellule. Il est attendu qu'au moins 200 utilisateurs simultanés par cellule soient acceptés à l'état actif pour une largeur de bande de 5 MHz, et au moins 400 utilisateurs pour des largeurs de bande supérieures. Un nombre largement supérieur d'utilisateurs devra être possible à l'état de veille. [1]

1.7.3 Les débits

L'évolution des débits suit une progression semblable à celle de la capacité. Les valeurs des débits fournis aux abonnés ont nettement crû avec l'introduction des techniques HSPA et HSPA+. L'introduction de débits supérieurs à ceux fournis par les technologies HSPA est toutefois une demande forte des utilisateurs et donc des opérateurs. Des débits toujours plus élevés ouvrent la porte à l'introduction de nouveaux services, sources de revenus et/ou de différenciation pour les opérateurs. L'augmentation des débits a ainsi connu une très grande augmentation avec la venue du système LTE, soit jusqu'à 300Mbps en débit descendant et 75 Mbps en débit montant.

1.7.4 La latence

La latence d'un système est la mesure du délai introduit par ce système. On distingue deux types de latence :

- la latence du plan de contrôle ;
- la latence du plan usager.

Les plans contrôle et usager du LTE sont définis dans l'**annexe 2**.

La latence du plan de contrôle représente le temps nécessaire pour établir une connexion et accéder au service.

La latence du plan usager représente le délai de transmission d'un paquet au sein du réseau une fois la connexion établie.

D'une manière générale, la latence traduit donc la capacité du système à traiter rapidement des demandes d'utilisateurs ou de services.

Une latence forte limite l'interactivité d'un système et s'avère pénalisante pour l'usage de certains services de données.

L'UMTS et ses évolutions HSPA offrent une latence du plan usager supérieure à 70 ms, valeur trop importante pour offrir des services tels que les jeux vidéo en ligne. L'amélioration de la latence est un des éléments ayant concouru à la décision de définir un nouveau système. [1]

Ainsi, l'objectif fixé pour le LTE est d'améliorer la latence du plan de contrôle par rapport à l'UMTS, via un temps de transition inférieur à 100 ms entre un état de veille de l'UE et un état actif autorisant l'établissement du plan usager. Aussi, le LTE vise une latence du plan usager inférieure à 5 ms dans des conditions de faible charge du réseau et pour des paquets IP de petite taille. [1]

1.7.5 L'adaptation au spectre disponible

La technologie UMTS constraint les opérateurs à utiliser des canaux de 5 MHz. Cette limitation est pénalisante à deux titres [1] :

- Les allocations spectrales dont la largeur est inférieure à 5 MHz ne peuvent pas être utilisées (sauf pour le TD-SCDMA), ce qui limite le spectre disponible.
- En cas de disponibilité de plusieurs bandes spectrales de largeur de 5 MHz, un opérateur est dans l'incapacité d'allouer simultanément plusieurs porteuses à un même UE. Cette contrainte limite le débit maximal potentiel du système ainsi que la flexibilité de l'allocation des ressources spectrales aux utilisateurs. Il faut noter que cette contrainte a été partiellement levée en HSPA+ Release 8 avec la possibilité de servir un UE sur deux porteuses de 5 MHz simultanément.

Ainsi, le LTE doit pouvoir opérer sur des porteuses de différentes largeurs afin de s'adapter à des allocations spectrales variées. Les largeurs de bande initialement requises ont par la suite été modifiées pour devenir les suivantes : 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz dans les sens montant et descendant. Notons que le débit crête est proportionnel à la largeur de

bande. Les modes de duplexage FDD et TDD doivent être pris en charge pour toutes ces largeurs de bande. [1]

1.7.6 Les catégories d'UE d'un système LTE

En effet, la mise en œuvre du LTE a entraîné la nécessité de nouveaux équipements de réseaux, comme de nouveaux terminaux compatibles avec cette nouvelle technologie. De ce fait, différentes catégories d'UE ont ainsi été définies. En comparaison avec l'UMTS, le nombre de catégories d'UE LTE a été réduit au minimum afin de limiter la segmentation du marché et favoriser ainsi les économies d'échelle. Il existe cinq catégories d'UE en Release 8, dont les caractéristiques sont présentées dans le **Tableau 1.01**.

Catégorie d'UE	Débit crête (Mbit/s)		Modulations		Nombre d'antennes de réception	Nombre maximal de couches spatiales en DL
	DL	UL	DL	UL		
1	10	5	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM	2	1
2	50	25			2	2
3	100	50			2	2
4	150	50			2	2
5	300	75		QPSK, 16QAM, 64QAM	4	4

Tableau 1.01 : Catégories des UE du système LTE [1]

Notons que l'UE signale sa catégorie au réseau lors de sa connexion initiale et que les UE LTE sont contraints à une puissance d'émission maximale de 23 dBm.

1.8 Conclusion

Les réseaux de téléphonie n'ont cessé d'évoluer débutant par le transfert de voix et actuellement pouvant transférer du data allant jusqu'à 300Mbps en débit descendant et 75 Mbps en débit montant. Cependant pour supporter de tels débits, certaines exigences sont demandées du côté de l'utilisateur d'où les différentes catégories d'UE. Avant d'entamer l'étude du principe d'Handover vertical entre LTE et UMTS, il est important de voir le fonctionnement du réseau d'accès de ces deux systèmes. Ainsi, nous aborderons ce sujet dans le chapitre suivant, le réseau d'accès UMTS.

CHAPITRE 2

LE RESEAU D'ACCES DE L'UMTS

2.1 Introduction

Ce chapitre décrit les principes de l'interface radio et fournit les connaissances nécessaires à la compréhension de son fonctionnement.

En effet, l'interface radio assure le rôle clé de transférer par la voie des airs les données issues de la couche IP associées au service demandé par l'utilisateur. Ce transfert doit respecter des exigences de qualité de service (latence, débit) malgré un medium extrêmement variable, tout en optimisant l'accès à une ressource spectrale limitée. En outre, la disponibilité du spectre, variable selon les régions du globe, impose de pouvoir s'adapter à différents types de bandes disponibles. Nous verrons dans ce chapitre une étude des mécanismes de propagation en espace libre, tout d'abord, puis les différents types de duplexage, et nous terminerons dans l'explication du fonctionnement du réseau d'accès UMTS.

2.2 Mécanismes de propagation

En communication, le canal de transmission représente toutes les transformations subies par le signal entre l'émetteur et le récepteur, de par sa propagation dans le milieu de transmission, ainsi que dans les équipements d'émission et de réception. Le canal de transmission détermine la manière dont les données doivent être mises en forme à l'émetteur afin de se propager dans de bonnes conditions dans le milieu, ainsi que les traitements à mettre en œuvre au récepteur afin de les détecter correctement. Le canal de transmission est donc d'une importance clé, car il détermine une grande partie de la conception d'un système de communication. [1]

Ainsi, la puissance reçue au récepteur dépend de plusieurs effets :

- Les pertes de propagation ou *path loss* : atténuation du signal en fonction de la distance entre émetteur et récepteur, définie par la formule [9]:

$$PL_{FS} = 32,45 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d) \quad (2.01)$$

Avec d : distance entre l'émetteur et le récepteur [km]

f : fréquence en [Mhz]

- L'effet de masque ou *shadowing* : atténuation du signal du à la présence d'un objet de grande taille entre l'émetteur et le récepteur.

- Les évanouissements rapides provenant du déplacement relatif de l'UE ou des objets dans son environnement. Cet évanouissement est principalement causé par l'effet Doppler qui est un décalage constant de fréquence proportionnelle à la vitesse du récepteur et à la fréquence porteuse. Il sera décrit plus bas.

Des modèles de propagation ont alors été établis pour prédire le niveau du signal reçu à l'émetteur. Le modèle d'Okomura Hata est un des plus populaires pour la prédiction de l'affaiblissement de signaux dans des zones urbaines. (cf. **Annexe 3**).

2.3 Les types d'interférences

En plus des atténuations dues à l'environnement, il existe plusieurs types d'interférences pouvant altérer le signal [1] [9] :

- l'interférence entre symboles : dans le domaine temporel, les trajets distinguables sont reçus différemment atténuer et retardés, ce qui crée un phénomène d'écho. Si les trajets sont de puissance similaire, et/ou s'ils sont en grand nombre, ils créent une interférence dommageable pour les performances de la transmission, appelée interférence entre symboles (IES). Le fait étant que des symboles de modulation émis sur le canal au rythme d'un symbole toutes les T secondes, entraînent des retards de trajet. Si ces derniers sont non négligeables devant T, les symboles reçus sur un trajet seront interférés par ceux qui suivent ou qui précèdent. En revanche, si la durée des symboles est grande devant le retard entre le premier trajet reçu et le dernier trajet d'énergie significative, l'IES sera quasi-inexistante. Cette différence de retards, aussi appelée dispersion des retards ou Delay spread, caractérise la capacité du canal à provoquer de l'IES et donc sa difficulté pour des communications
- l'interférence entre couches spatiales, créée par une transmission MIMO mono-utilisateur, ce qui consiste à transmettre plusieurs flux d'information (ou couches spatiales) indépendants vers un même UE, sur les mêmes ressources temps-fréquence ;
- l'interférence intracellulaire, créée par la transmission d'autres UE dans la cellule; en LTE, la seule source d'interférence intracellulaire est la transmission MIMO multi-utilisateurs, où plusieurs UE sont servis sur les mêmes ressources temps-fréquence en étant séparés dans l'espace;
- l'interférence de canal adjacent, créée par une transmission sur une fréquence adjacente à celle de la porteuse assignée à l'UE ;

- l’interférence intercellulaire, créée par les cellules voisines.

Ainsi, un UE qui s’éloigne de son eNodeB serveur pour s’approcher de la bordure de cellule est soumis à deux mécanismes affectant la qualité de son canal : la puissance de signal utile reçue de l’eNodeB serveur diminue en raison des pertes de propagation et la puissance d’interférence intercellulaire augmente, puisque l’UE se rapproche des stations de base interférentes.

2.4 Caractéristiques du canal radio

Dans le cas général, on remarque que les évanouissements que subit un canal radio se présentent à travers une variation de l’amplitude ou par un retard de l’arrivée du signal. Plusieurs phénomènes qui affectent le canal sur le plan fréquentiel et temporel sont liées au fait que malgré sa variabilité, sa réponse impulsionale reste quasi constante durant une certaine période de la transition et pour certaines bandes de fréquence.

2.4.1 La sélectivité en fréquence

Le phénomène d’écho dans le domaine temporel se traduit dans le domaine fréquentiel par une sélectivité en fréquence, en effet certaines fréquences du signal sont plus atténuées que d’autres. Suite à ces variations, on rencontre deux catégories de canal de propagation : les canaux sélectifs et les canaux non sélectifs en fréquence dont la distinction est liée à la notion d’étalement multivoie et de bande de cohérence du canal.

2.4.1.1 Etalement multivoie

Encore appelé dispersion multivoie ou mutipath spread du canal, elle représente le retard ou écart temporel durant lequel la réponse du canal face à des trajets multiples est constante. [1] [9]

2.4.1.2 Bande de cohérence

La bande de cohérence représente la plage de fréquence sur laquelle la réponse du canal est considérée comme étant à peu près constante. Le canal laisse passer les fréquences contenues dans cette gamme de fréquence avec un même gain et la réponse de phase est linéaire.

La relation entre la bande de cohérence et l’étalement multivoie est la suivante [9] :

$$\Delta_{coh} = \frac{1}{T_m} \quad (2.02)$$

Avec T_m : étalement multivoie

2.4.1.3 Canaux sélectifs en fréquence

Un canal est dit sélectif en fréquence si pour la largeur de bande B_s du signal, on a la relation [9]:

$$\Delta_{coh} \ll B_s \quad (2.03)$$

L'inconvénient d'un canal sélectif en fréquence repose sur la présence d'IES puisque $T_s \ll T_m$, alors le second symbole est déjà transmis tandis que le premier n'est pas encore temporellement étalé.

2.4.1.4 Canaux non sélectifs en fréquence

Un canal est non sélectif en fréquence ou canal plat lorsque la bande de cohérence vérifie [9] :

$$\Delta_{coh} \gg B_s \quad (2.04)$$

Dans ce cas l'amplitude et la phase de toutes les composantes spectrales du signal sont affectées de la même manière par le canal.

2.4.2 Canal à évanouissement rapide et à évanouissement lent

La classification d'un canal en évanouissement rapide ou en évanouissement lent est due à une dispersion fréquentielle du signal qui y transite. Elle est reliée à la notion de temps de cohérence T_{coh} et d'étalement Doppler.

2.4.2.1 Etalement Doppler

Lorsque le transmetteur ou le récepteur est en mouvement, le signal reçu est soumis à un décalage constant de fréquence appelé effet Doppler. Il est défini par la formule suivante [9]:

$$f_d = f_0 \frac{v}{c} \cos \theta_n \quad (2.05)$$

Avec

$c=3\times10^8$: célérité de la lumière

v : vitesse relative du récepteur

f_0 : fréquence du transmetteur

θ_n : l'angle entre le signal reçu et la direction du vecteur vitesse

L'étalement Doppler représente la différence entre le plus grand et le plus petit décalage en fréquence inhérent au trajet multiple. [9]

2.4.2.2 Temps de cohérence

Il est défini comme étant le temps minimal nécessaire pour que les réponses impulsionales du canal soient décorrelées.

2.4.2.3 Canal à évanouissement rapide

On a un canal à évanouissement rapide lorsque le temps de cohérence est inférieur au temps d'un symbole. Dans ce cas un niveau de bruit est présent pour chaque série de symbole transmis.

$$T_{coh} < T_s \quad (2.06)$$

2.4.2.4 Canal à évanouissement lent

Contrairement au canal à évanouissement rapide celui à évanouissement lent à un temps de cohérence supérieur à la durée d'un symbole :

$$T_{coh} > T_s \quad (2.07)$$

2.5 La notion de diversité

La diversité se définit par la présence en réception de plusieurs répliques indépendantes d'une même information. Les grandeurs D_t et D_f représentent respectivement l'ordre de diversité temporelle et fréquentielle. Ces grandeurs correspondent à l'ordre de diversité utilisée lors de la transmission d'un signal d'une trame de durée T_{trame} de signaux de durée T_s , et leurs expressions sont les suivantes [9] :

$$D_t = \frac{T_{trame}}{t_c} \quad (2.08)$$

$$D_f = \frac{B_s}{B_c} \quad (2.09)$$

T_c : Temps de cohérence

T_{trame} : Durée de transmission de la trame

B_s : largeur de bande du signal

B_C : Bande de cohérence du canal

2.6 Les modes de duplexage

Le duplexage définit la manière dont sont séparées les transmissions sur la voie descendante et sur la voie montante. La voie descendante, aussi appelée DownLink (DL), correspond à la transmission de la station de base vers l'UE. La voie montante, aussi appelée UpLink (UL), correspond à la transmission de l'UE vers la station de base. Il existe deux principaux modes de duplexage, tous deux gérés par l'interface radio du LTE [1] [2]:

- le duplexage en fréquence ou Frequency Division Duplex (FDD) ;
- le duplexage en temps ou Time Division Duplex (TDD).

En mode FDD, les voies montante et descendante opèrent sur deux fréquences porteuses séparées par une bande de garde. En mode TDD, les voies montante et descendante utilisent la même fréquence porteuse, le partage s'effectuant dans le domaine temporel, comme illustré sur la **Figure 2.01**.

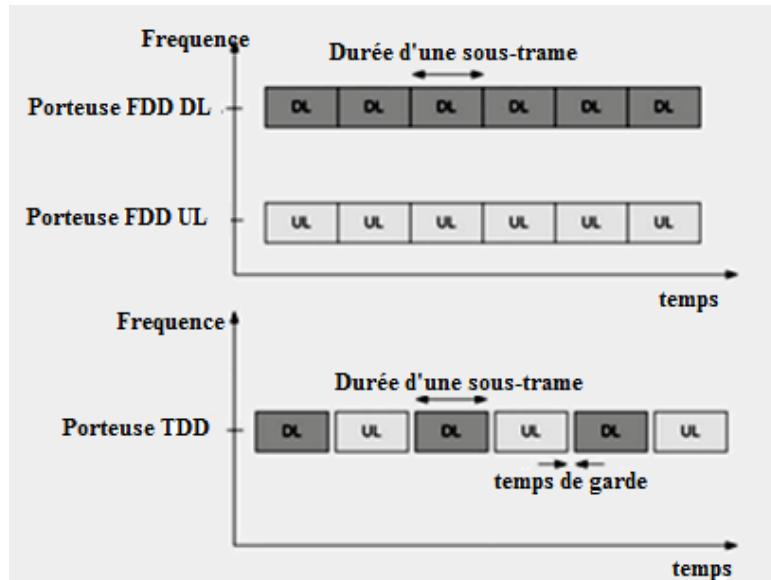


Figure 2.01 : Répartition des voies montante et descendante en temps et fréquence pour les modes de duplexage TDD et FDD [1]

2.7 Le réseau d'accès UMTS

Nous avons déjà pu voir l'architecture de l'UMTS dans le chapitre 1 ainsi que le rôle de chaque entité. Cependant, pour étudier le handover entre le système LTE et UMTS, il est important de connaître les techniques qu'utilisent chacun des systèmes.

2.7.1 La structure en couches du réseau

La structure en couches du réseau UMTS pour les appels circuits est présentée par la **Figure 2.02**. Les couches de transport TCAP (Transaction Capabilities Application Part), SCCP (Signaling Connection Control Part) et MTP (Message Transfert Part) utilisées dans le réseau cœur sur les interfaces C, E, F sont identiques au GSM. La couche applicative MAP de l'UMTS est une évolution par rapport aux nouveaux services définis dans le cadre de l'UMTS. Sur la partie réseau d'accès, de nouveaux protocoles ont été définis. [10]

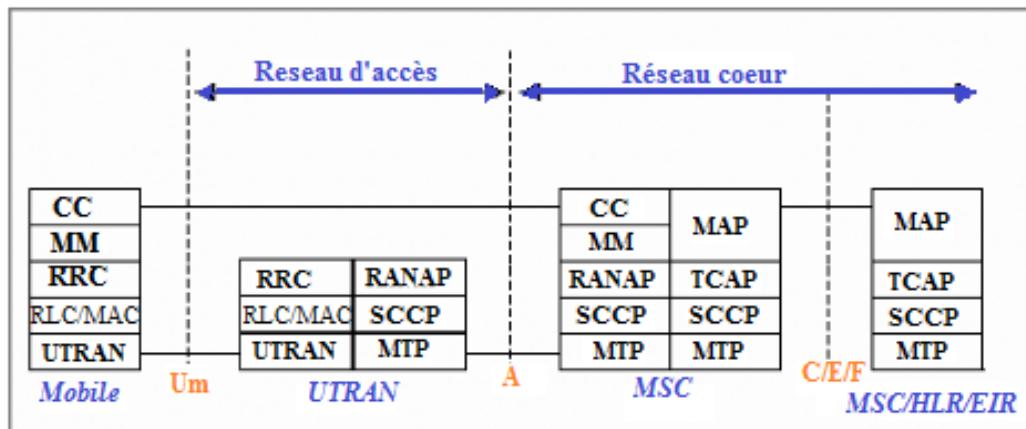


Figure 2.02 :L'architecture en couches des appels circuits [10]

Le plan de transmission des données usager des services en mode paquet est présenté par la **Figure 2.03** qui suit. Comme pour les services en mode circuit, les couches transports du réseau cœur entre le SGSN et GGSN sont inchangées.

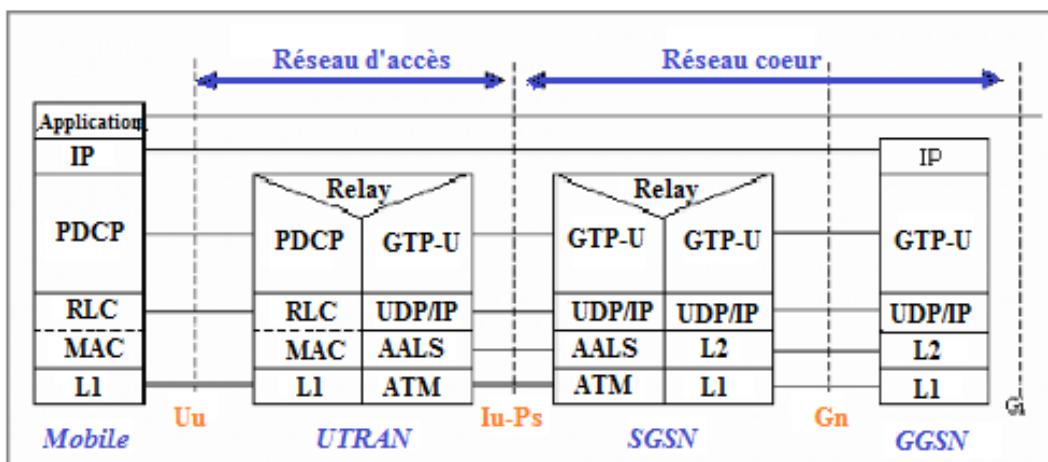


Figure 2.03 : Le plan usager PS [10]

La signalisation appartenant à la couche NAS du réseau, c'est-à-dire les couches CC et MM, pour les appels circuit, et SM (Session Management) et GMM (GPRS Mobility Management), pour les appels paquet sont également identiques à celle utilisées en GSM, à quelques évolution (dues à l'introduction de nouveau service) près.

2.7.2 Les protocoles de l'interface radio

Les protocoles de l'interface radio sont indispensables à l'établissement, à la reconfiguration et au relâchement des services support radio, tant en mode FDD qu'en mode TDD. L'architecture globale des protocoles est composée de plusieurs couches se basant sur les 3 premières couches du modèle OSI (respectivement la couche physique, la couche liaison de données et la couche réseau) [10] :

- **Niveau 1** : il représente la couche physique de l'interface radio et réalise notamment le codage canal, l'entrelacement, la modulation, l'adaptation de débit et le contrôle de puissance.
- **Niveau 2** : Ce niveau est composé du RLC (Radio Link Control), du MAC (Medium Access Control) et du PDCP (Packet Data Convergence Protocol). Voyons alors en détails chacun d'eux.
 - RLC: transfert fiable de données en point à point
 - MAC: assure le multiplexage de différents flux de données issus d'un même utilisateur sur un canal de transport unique ainsi que le multiplexage de flux de données issus d'utilisateurs différents sur un canal de transport commun;
 - PDCP: assure l'indépendance de l'UTRAN vis à vis des protocoles de transport réseau, la compression d'en-tête

Le BMC, « broadcast/multicast control », est la diffusion de message sur l'interface radio. Un exemple est le service type SMS (GSM).

- **Niveau 3 : RRC « radio resource control »** : Ce niveau gère les ressources radio et dispose de fonctions de contrôle de l'ensemble des couches. Il est analogue à la couche RR du GSM, cependant, il couvre le domaine circuit et le domaine paquet.

2.7.3 Les canaux

Les canaux de l'interface radio sont des points d'accès aux services proposés par une couche N, ils permettent à la couche N+1 de délivrer à cette couche N des données qui devront être traitées (et éventuellement marquées) selon les spécificités du canal. [1]

En règle générale, on distingue trois classes de canaux, selon les couches du modèle OSI auxquelles ils sont attachés :

- les canaux logiques, qui opèrent entre les couches RLC et MAC et sont définis selon le type d'information qu'ils transportent (par exemple : signalisation du plan de contrôle ou données du plan usager) ;
- les canaux de transport, qui opèrent entre la couche MAC et la couche physique et sont définis par la manière et les caractéristiques selon lesquelles les données sont transportées par l'interface radio (par exemple la méthode d'accès aux ressources radio) ;
- les canaux physiques qui sont utilisés par la couche physique et sont définis par les caractéristiques physiques de leur transmission (par exemple leur placement dans la trame).

Dans une configuration donnée de l'interface radio (déterminée par le protocole RRC), un canal logique ne peut être porté que par un seul canal de transport, mais ce dernier peut transporter plusieurs canaux logiques. La même règle s'applique pour les canaux de transport et les canaux physiques. Enfin, certains canaux physiques ne sont associés à aucun canal de transport ni canal logique, car ils portent uniquement des informations relatives à la couche physique. Ceci est illustré par la **Figure 2.04**.

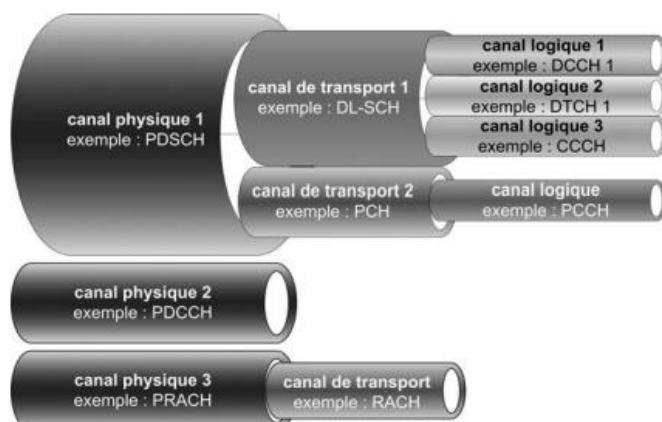


Figure 2.04 : Les canaux de l'interface radio avec quelques illustrations (canaux des systèmes UMTS et LTE)

2.7.3.1 Les canaux logiques du système UMTS

Ce sont des canaux logiques de contrôle, de signalisation et de trafic. Ils transportent les différents types d'information véhiculés par les protocoles radio de l'UTRAN. Ils sont unidirectionnels ou bidirectionnels et sont des canaux offerts aux couches utilisatrices du niveau 2. [10]

2.7.3.2 Les canaux de transport du système UMTS

Ces canaux n'existent pas en GSM et GPRS. Ils sont offerts aux couches utilisatrices du niveau 1 et caractérisent le format de transmission des données sur la voie radio. Ce sont des canaux représentatifs de la qualité de service requise pour un radio. Ils sont unidirectionnels et on distingue deux types de canaux de transport [10] :

- Canaux de transport dédiés : DCH : « *dedicated channel* ».
- Canaux de transport communs : regroupant les canaux BCH(*broadcast channel*), PCH 1- (*paging channel*), RACH 1' (*random access channel*), FACH (*forward access channel*), et DSCH I (*downlink shared channel*).

2.7.3.3 Les canaux physiques du système UMTS

Ils sont caractérisés par les codes de canalisation et de brouillage, une paire de porteuses, une phase relative pour la voie montante, et sont unidirectionnels. Il existe plusieurs types des canaux physiques [5] [10] :

- **P-CCPCH:** Le canal Primary CCPCH (*Primary Common Control Physical Channel*) est le canal physique qui transporte le canal BCH;
- **S-CCPCH:** Le canal physique Secondary CCPCH (*Secondary Common Control Physical Channel*) supporte deux canaux communs de transport: le canal FACH et le canal PCH. Ces deux canaux peuvent partager le même canal CCPCH secondaire ou utiliser deux canaux physiques distincts;
- **DPDCH:** (*Dedicated Physical Data Channel*). Le canal physique DPDCH est en fait composé de deux sous-canaux physiques: le DPDCH et le DPCCH. Le DPDCH est utilisé pour véhiculer toutes les données en provenance des couches de protocole supérieures;
- **PRACH:** (*Physical Random Access Channel*). Le canal logique RACH s'appuie sur le canal physique PRACH ;

- **PDSCH:** (*Physical Downlink Shared Channel*). Le canal logique DSCH s'appuie sur le canal physique PDSCH.

2.7.4 Description de l'UTRAN

L'interface radioélectrique entre le mobile et le Node B peut présenter deux types de solutions CDMA (Code Division Multiple Access) [10]:

- une interface W-CDMA en FDD (Frequency Division Duplex);
- une interface TD-CDMA en TDD (Time Division Duplex).

La bande de fréquences réservée à l'UMTS est divisée en plusieurs sous bandes selon le mode de fonctionnement :

- 1920-1980 MHz pour la voie montante du FDD;
- 2110-2170 MHz pour la voie descendante du FDD;
- 1900-1920 MHz et 2010 -2025 MHz pour le TDD.

En FDD, les voies montantes et descendantes sont affectées à deux bandes de fréquences distinctes, espacées de 190 MHz. Cependant, en TDD, les voies montantes et descendantes sont multiplexées temporellement sur une même porteuse.

Pour chaque mode de fonctionnement, la bande de fréquence est divisée en canaux radio de 5 MHz. Dans la bande de fréquence de 5 MHz, le débit utile par canal est égal à 384 kbit/s en W-CDMA (Wide bande CDMA) et à 144 kbit/s en TD-CDMA. L'augmentation de débit s'obtient en allouant plusieurs canaux en W-CDMA (un canal correspond à un code) ou une bande de fréquence plus large en TD-CDMA (20 MHz pour un débit de 2 Mbit/s).

Comme dit précédemment, le W-CDMA se base sur une technique plus ancienne qui est le CDMA (Code Division Multiple Access). Ainsi, afin de comprendre les concepts du W-CDMA, il est important de comprendre la technique du CDMA.

2.7.4.1 Le CDMA

Le CDMA (Code Division Multiple Access) est utilisé dans de nombreux systèmes de communication. Il permet d'avoir plusieurs utilisateurs sur une même onde porteuse. Les transmissions sont numérisées, dites à étalement de spectre. L'étalement du spectre rend le signal

moins sensible aux fluctuations sélectives en fréquence. Le signal est ainsi transmis sur une bande de fréquences beaucoup plus large que la bande de fréquences nécessaire. [5] [6] [10]

a) Principe de l'étalement de spectre

Le W-CDMA réalise un étalement de spectre selon la méthode de répartition par séquence directe (Direct Sequence). Pour cela, chaque bit de l'utilisateur à transmettre est multiplié (OU exclusif) par un code pseudo aléatoire PN (Pseudo random Noise code) propre à cet utilisateur. La séquence du code (constituée de N éléments appelés "chips") est unique pour cet utilisateur, et constitue la clé de codage. Cette dernière est conservée si le symbole de donnée est égal à 1, sinon elle est inversée. La longueur L du code est appelée facteur d'étalement SF (Spreading Factor). Si chacun des symboles a une durée T_b , on a 1 chip toutes les T_b/N secondes. Le nouveau signal modulé a un débit N fois plus grand que le signal initialement envoyé par l'usager et utilisera donc une bande de fréquences N fois plus étendue. Nous avons donc une relation entre le débit de données et le débit Chips du type :

$$D_c = D_d \times L \quad (2.10)$$

Avec D_c : Débit Chips

D_d : Débit de données

L : Longueur du code

La **relation 2.10** nous permet de dire que plus le facteur d'étalement SF est élevé, plus la longueur L est élevée, et donc plus le débit Chip sera élevé. Cela implique que le débit de données du canal sera élevé. Les canaux à débits variables peuvent être libérés en fonction des besoins de l'utilisateur.

Afin de pouvoir lire le message codé envoyé, le récepteur doit réaliser la même opération que celle présentée sur la **Figure 2.05**. En effet, ce dernier génère la même séquence d'étalement qu'il multiplie au signal reçu afin d'obtenir les données. Les données des autres utilisateurs (pas de multiplication avec la séquence d'étalement) restent étalées.

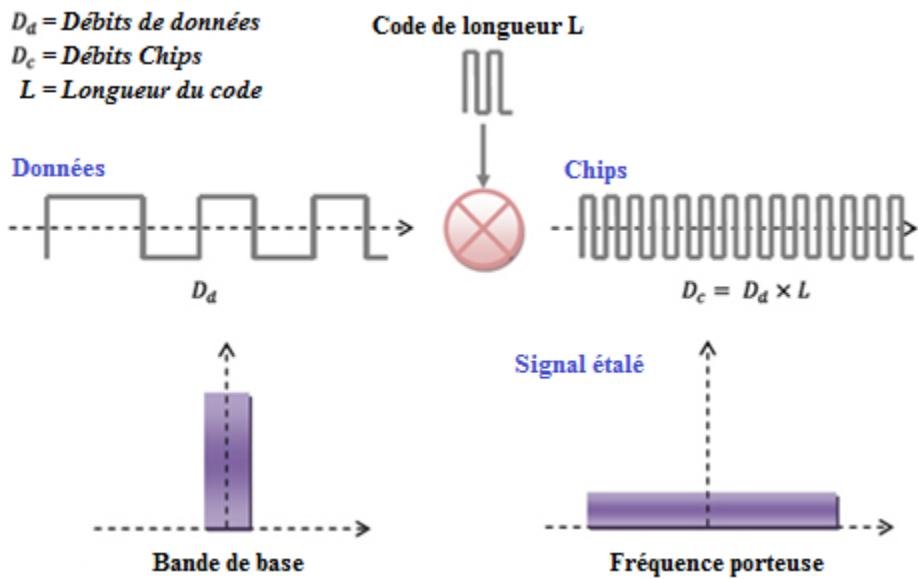


Figure 2.05 : Principe de l'étalement de spectre

b) Code d'étalement

Chaque utilisateur possède un code, il est donc nécessaire de n'avoir aucune interférence entre ceux-ci. Pour cela, nous utilisons des codes orthogonaux dits codes OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor Code) afin de modifier le facteur d'étalement et de conserver l'orthogonalité des différents codes d'étalement. Ces codes sont définis par un arbre OVSF où chaque nœud possède 2 fils. Les codes des 2 fils sont issus du code de leur père commun, c'est-à-dire que leur code est composé par le code du père et de son complémentaire. L'arbre des codes OVSF ainsi créé peut être représenté sous la forme de la matrice de Hadamard. (**cf. Annexe 4**)

L'arbre de la **Figure 2.06**, nous montre la relation entre le facteur d'étalement et le nombre de codes disponibles pour un étalement donné.



Figure 2.06 : Arbres des codes OVSF

Il est important de savoir que le facteur d'étalement SF détermine la longueur du code. Le nombre de bits dans les trames des canaux dédiés pour le transfert des données se trouve par l'intermédiaire de la relation suivante :

$$SF = \frac{256}{2^k} \quad \text{avec } 0 < k < 6 \quad (2.11)$$

2.7.4.2 Le concept W-CDMA

Le concept W-CDMA utilise exactement le mode FDD avec une technique d'étalement de spectre par séquence directe (DS-CDMA). Le mode FDD, comme nous l'avons vu plus haut, consiste à faire un multiplexage en fréquence des deux sens de transmission. Chaque sens de transmission utilise une porteuse distincte. Ce concept utilise donc un débit chips de **3,84 Mchip/s**, et une bande de fréquences importante, allant de **4,4 à 5 MHz**, ce qui permet de bénéficier d'une bonne diversité de fréquences dans la plupart des environnements, et de s'affranchir des évanouissements liés aux trajets multiples. Le W-CDMA utilise un facteur d'étalement variable (de 4 à 256) permettant de supporter facilement une large gamme de débits de services, avec une bonne qualité. Le débit maximal supporté par un seul code est de 384 kbit/s. Pour les services à plus haut débit, plusieurs codes sont alloués à un même utilisateur et transmis simultanément sur le même canal radio, par exemple, 5 codes sont nécessaires pour supporter le 2 Mbit /s. Ce mode est bien adapté pour tout type de cellule mais n'est pas très souple pour la gestion de trafic asymétrique.

Pour le codage de canal, le W-CDMA utilise le codage convolutif ; cependant pour des transferts de données à haut débit, il utilise plutôt les Turbo Codes. Sur la liaison montante, les codes OVSF sont employés pour la séparation des canaux (*channelization codes*, ou encore **codes de canalisation**) de données d'un même terminal, et les codes de Gold de longueur $2^{41}-1$ pour la séparation des utilisateurs (*scrambling codes*, ou encore **codes de brouillage**). Sur la liaison descendant, le choix s'est porté sur les codes OVSF pour la séparation des connexions des différents utilisateurs d'une même cellule, et les codes de Gold à courte séquence, de **longueur $2^{18}-1$** , pour la séparation des cellules.

Ce système utilise également des boucles rapides (1.6 kHz) de contrôles de puissances (ouvertes et fermées). [5] [10] [11]

2.7.4.3 Le concept TD/CDMA

Le concept TD/CDMA utilise une technique d'accès multiple mixte, comprenant une composante TDMA, et une composante d'étalement de spectre à l'intérieur des intervalles de temps «time slot»

avec séparation par codes. Ainsi, un canal de trafic est défini par une fréquence (porteuse), un intervalle de temps, et un code. Grâce à l'étalement de spectre CDMA, des paquets se distinguent par leurs codes d'étalement peuvent être transmis simultanément dans un intervalle de temps. Ces codes peuvent être alloués à différents utilisateurs ou à un même utilisateur selon le débit de service souhaité et offrent ainsi une bonne qualité de service. Ainsi, le concept TD/CDMA offre une large gamme de débits de services allant jusqu'à 2 Mbit/s, en allouant plusieurs codes ou plusieurs intervalles de temps à un même utilisateur. [5]

2.7.4.4 Comparaison entre le mode FDD WCDMA et TDD TD/CDMA

Le **Tableau 2.01** suivant donne la comparaison des deux modes FDD WCDMA et TDD TD/CDMA.

Critère de comparaison	Mode FDD W-CDMA	Mode TDD TD/CDMA
Déploiement et couverture	Plus particulièrement adapté aux grandes cellules.	Limité aux petites cellules à cause de synchronisation et de temps de garde.
Services supportés	Plus particulièrement adapté aux services symétriques (voix et services de données à bas et moyen débit en mode symétrique)	Plus particulièrement adapté aux services de données en mode paquet, à haut débit et asymétrique.
Contrôle de puissance	Contrôle rapide nécessaire pour l'interférence intra cellulaire.	Contrôle lent suffisant grâce à la détection conjointe.
Transfert intercellulaire	Le « soft handover » est obligatoire	Transfert inter cellulaire normal utilisé dans tous les cas
Complexité du terminal	La fonction critique est celle qui assure le désétement du signal (récepteur RAKE). Sa complexité varie proportionnellement avec le débit chip et dépend également des	La fonction critique est la détection conjointe, dont la complexité croît avec le nombre de code transmit simultanément sur le même

	caractéristiques de propagation (nombre de multi trajet, vitesse de variation du canal, etc...)	slot. La complexité croît avec le débit de service, et dépend également des caractéristiques de propagation (retard lié aux multi trajets).
Synchronisation entre stations de base	Aucune synchronisation n'est requise	Synchronisation au niveau trame requise. Elle devrait être réalisée sans recours au GPS.
Planification	La couverture d'une cellule varie fortement en fonction du trafic supporté. La planification doit donc prendre en compte couverture et capacité dans un même temps. Pas de plan de fréquence.	La couverture d'une cellule est à peu près indépendante du trafic supporté, grâce à la détection conjointe. Couverture et capacité peuvent être planifiées en deux temps. Plan de fréquence nécessaire.

Tableau 2.01 : Comparaison des modes FDD/WCDMA et TDD/CDMA [10]

2.8 Les catégories d'UE d'un système UMTS

Les UE du système UMTS sont classés en fonction de la puissance d'émission, ou de l'interopérabilité avec la 2G ou encore en fonction de la capacité de débit.

Voyons alors ces classements selon chaque critère cité précédemment :

Classe	Puissance Max FDD	Puissance Max TDD
1	+33dBm (2w)	+30 dBm (1W)
2	+ 27 dBm (0.5 W)	+24 dBm (0.25W)
3	+24 dBm (0.25W)	+21 dbm (0.126W)
4	+21 dBm (126W)	+10 dBm (0.01W)

Tableau 2.02 : Classification des UE en UMTS en fonction de leur puissance d'émission [12]

Type 1	Nous sommes soit en 2G soit en 3G mais si un mode est sélectionné l'autre radio est inactive
Type 2	On peut faire des mesures radio sur les 2 modes, le basculement est automatique mais on ne peut pas recevoir dans les 2 modes
Type 3	Type 2 + réception sur les 2 modes en même temps
Type 4	Type 3+ émission sur les 2 modes en même temps

Tableau 2.03 : Classification des UE en UMTS en fonction de l'interopérabilité avec la 2G [12]

	Classe 32 Kbits/s	Classe 64 Kbits/s	Classe 128 Kbits/s	Classe 768 Kbits/s	Classe 2048 Kbits/s
Voie descendante (en Kbits/s)	32	64	128	768	2048
Voie Montante (en Kbits/s)	32	64	128	768	

Tableau 2.04 : Classification des UE en UMTS en fonction de la capacité de débit

2.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier les différents comportements d'un canal radio, qui, en effet, est aléatoire du fait de son support qui est l'air. Nous avons parlé des différents types d'interférences ainsi que des différents modes de duplexages employés par les systèmes et également ceux employés par l'UMTS. Le réseau d'accès UTRAN a été décrit en détails, notamment la structure en couches du réseau, les protocoles de l'interface radio, et les différents canaux employés. Ces différentes techniques sont primordiales à savoir pour une bonne étude de l'handover. Passons alors à l'étude de différentes techniques employées par le second système de notre étude, le LTE.

CHAPITRE 3

LE RESEAU D'ACCES DU LTE

3.1 Introduction

Le chapitre précédent nous a permis de voir les différentes caractéristiques d'un canal radio ainsi que les différentes techniques employées par le système UMTS dans son réseau d'accès. La rupture du système LTE avec ce dernier fut l'introduction de l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), un mode de transmission numérique à haut débit qui reparti un string binaire sur un grand nombre de sous-porteuses. Le présent chapitre expliquera les principes de cette technique, ceux du SC-FDMA utilisé dans la liaison montante du réseau d'accès LTE, ceux de la technique MIMO et des différents canaux employés en LTE et enfin l'allocation des ressources radio.

3.2 Structure de trame de l'interface radio

L'opération de l'interface radio dans le domaine temporel est découpée en trames radio consécutives de 10 ms. Une trame radio est divisée en dix sous-trames de 1 ms chacune, numérotées de 0 à 9. La sous-trame constitue un TTI (Transmission Time Interval), c'est-à dire l'intervalle de temps de transmission élémentaire pouvant être alloué à un UE. Il existe deux types de structures de trame, illustrés sur les deux figures suivantes [1]:

- Le type 1 est adapté au FDD et au FDD half-duplex.
- Le type 2 est adapté au TDD.

Dans la structure de trame de type 1, chaque sous-trame est divisée en deux slots de 0,5 ms chacun. Les slots d'une trame radio sont numérotés de 0 à 19. En FDD, dix sous-trames sont disponibles pour la voie montante et dix sous-trames sont disponibles pour la voie descendante par période de 10 ms, puisque les voies montante et descendante opèrent sur des fréquences différentes. En FDD half-duplex, un UE ne peut transmettre et recevoir simultanément, ce qui restreint le nombre de sous-trames utilisables dans chaque direction de transmission.

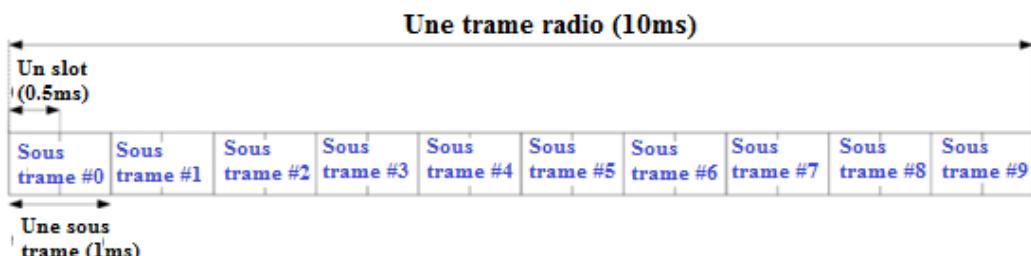


Figure 3.01 : Structure en FDD et FDD half duplex [1]

En TDD, certaines sous-trames sont réservées pour la voie montante tandis que d'autres le sont pour la voie descendante. Il existe de plus une sous-trame spéciale, qui contient notamment un temps de garde nécessaire au basculement entre la voie descendante et la voie montante. Ce temps de garde est noté GP (Guard Period) sur la figure suivante. Le temps de garde nécessaire au basculement de l'eNodeB entre la réception d'une sous-trame montante et l'émission d'une sous-trame descendante est créé par l'eNodeB en avançant dans le temps les sous-trames montantes par rapport aux sous-trames descendantes. L'UE est informé de ce décalage par la commande d'avance de temps, qui lui indique de démarrer sa transmission un peu plus tôt (ou un peu plus tard). Une avance de temps par défaut de 20 μ s est ainsi spécifiée en TDD, car cette durée est attendue comme la valeur maximale potentiellement nécessaire aux équipements pour basculer de réception à émission [1] [12]. Afin de limiter la perte d'efficacité du système due au temps de garde, il est nécessaire d'avoir au plus deux sous-trames spéciales présentes par trame.

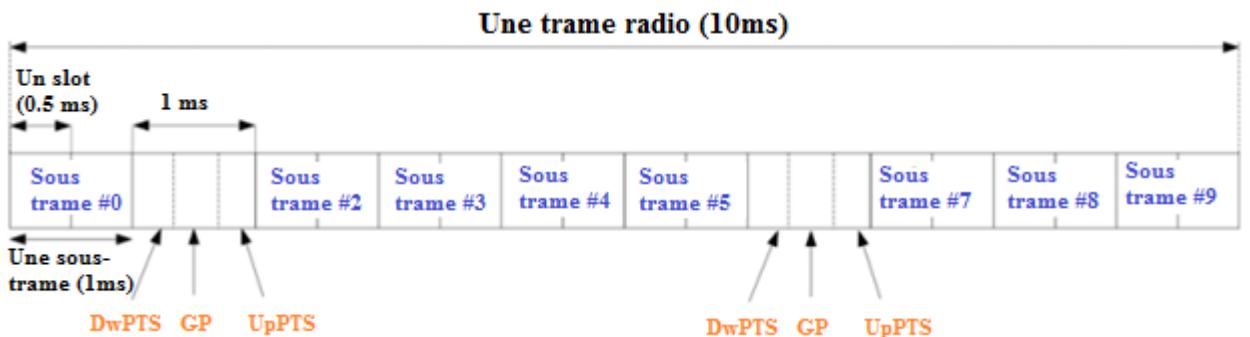


Figure 3.02 : Structure de trame en TDD

Les configurations TDD voie montante/voie descendante possibles en LTE sont données dans le tableau suivant.

Configuration voie montante/voie descendante	Périodicité du basculement de la voie descendante vers la voie montante	Numéro de la sous-trame									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Tableau 3.01 : Configurations voie montante (U)/voie descendante (D). S note la sous-trame spéciale [1]

On note que les sous-trames 0 et 5 sont toujours réservées pour une transmission en voie descendante.

Cependant, outre le temps de garde, la sous-trame spéciale porte les champs DwPTS (Downlink Pilot Time Slot) et UpPTS (Uplink Pilot Time Slot), réservés pour les transmissions respectivement en voie descendante et en voie montante. Malgré la signification de leurs acronymes, héritée de l'UMTS TDD, ces champs ne contiennent pas que des signaux de référence [1] :

- Le champ DwPTS porte la signalisation de contrôle (PCFICH, PDCCH, PHICH) ainsi que les données (PDSCH) comme une sous-trame descendante normale, à la différence près qu'il est plus court. De plus, il porte le Primary Synchronisation Signal (PSS).
- Le champ UpPTS peut porter le PRACH de préambule court et/ou des signaux de référence de sonde (SRS), ou uniquement des SRS en fonction de la longueur du champ. Aucune donnée ni signalisation ne peut être transmise sur ce champ.

Les durées des champs DwPTS et UpPTS sont configurables et signalées par les couches supérieures. Il existe 8 configurations possibles, se différenciant par différentes longueurs de GP et deux longueurs possibles (courtes : 1 ou 2 symboles SC-FDMA) du champ UpPTS, le champ DwPTS occupant la durée de la sous-trame restante. Les différentes configurations sont données dans [13].

Le mode FDD half-duplex requiert également un temps de garde afin que l'UE puisse basculer de l'émission à la réception, et inversement. Pour la transition voie descendante vers voie montante, ce temps de garde est créé par l'UE en ne recevant pas la fin d'une sous-trame descendante précédent immédiatement une sous-trame montante où il transmet. Cette perte doit être compensée par une adaptation de lien appropriée par l'eNodeB, ou par une retransmission. Pour la transition voie montante vers voie descendante, le temps de garde est assuré par l'eNodeB via la commande d'avance de temps, comme en TDD. La manière de réaliser le half-duplex n'est pas spécifiée, c'est au scheduler de l'eNodeB d'assurer qu'un UE n'est pas servi simultanément sur les voies montante et descendante. [1]

3.3 Principes de l'OFDM

L'introduction de l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) constitue une rupture avec l'UMTS, qui était basé sur une modulation monoporteuse avec étalement de spectre et accès multiple à répartition de code CDMA (Code Division Multiple Access). [1] [5] [14]

Ce multiplexage est une combinaison de modulation et de multiplexage fréquentiel.

L'OFDM découpe la bande du système en un grand nombre de porteuses individuelles appelées sous-porteuses. [14] [15]. Dans le cas d'une seule couche spatiale, un symbole de modulation (par exemple QPSK), précodé dans le cas du MIMO, est transmis par sous- porteuses à un instant donné.

3.3.1 La modulation OFDM

La modulation OFDM est réalisée en bande de base par une transformée de Fourier discrète inverse IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) des symboles de modulation afin de passer du domaine fréquentiel au domaine temporel. Le schéma du modulateur OFDM est décrit à la figure qui suit, où S/P et P/S désignent respectivement des convertisseurs série/parallèle et parallèle/série. Le bloc d'échantillons complexes $\{d_n\}$ obtenus en sortie de l'IDFT, qui représente le signal dans le domaine temporel correspond au bloc de symboles de modulations $\{a_n\}$ émis sur les différentes sous-porteuses, est appelé un symbole OFDM. A ce bloc, on ajoute un préfixe cyclique (CP) de longueur P , exprimé en nombre d'échantillons temporels. Les échantillons de signal dans le domaine temporel sont ensuite mis en forme par un filtre ayant pour réponse impulsionnelle une fonction porte avant de subir les autres traitements radiofréquences (RF) puis d'être envoyés sur l'antenne correspondante. [1]

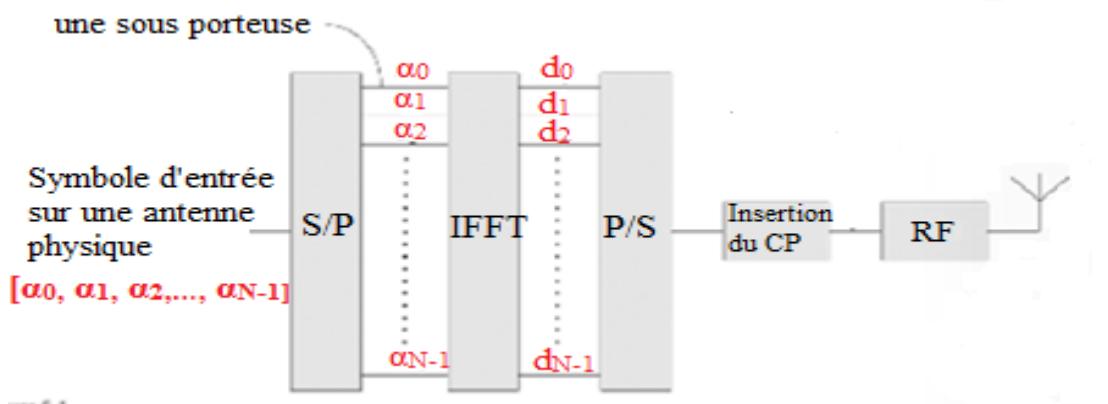


Figure 3.03 : Schéma du principe d'un modulateur OFDM [1]

En pratique, l'IDFT est assurée par une transformée de Fourier rapide inverse IFFT (Inverse Fast Fourier Transform), qui permet une implémentation de faible complexité dans les circuits réalisant les fonctions élémentaires pour le traitement du signal. [16]

En fait, chaque flux de données en bande de base est associé à une sous porteuse. Le signal modulé sur la k-ième sous-porteuse s'écrit sous la forme complexe [5]:

$$s_k(t) = \alpha_k e^{j2\pi f_k t} \quad (3.01)$$

α_k : k-ième symbole d'entrée sur l'antenne physique

f_k : fréquence de la k-ième sous porteuse

Le signal résultant $s(t)$ correspondant à l'ensemble des N symboles réassemblés en un symbole OFDM est donc [5]:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k e^{j2\pi f_k t}, \quad 0 < t < T \quad (3.02)$$

3.3.2 Le préfixe cyclique

Pour éviter qu'ils s'interfèrent, on laisse entre deux symboles OFDM consécutifs un intervalle de garde qui absorbe les répliques du signal dues aux trajets multiples. En réalité, au lieu d'un intervalle de garde vide, on recopie la fin du symbole OFDM à son début, formant ainsi ce qu'on appelle un préfixe cyclique. En plus d'effectivement supprimer l'interférence entre symboles OFDM, le CP fait apparaître le signal comme périodique (ou cyclique) sur l'horizon temporel formé du CP et du symbole OFDM. On peut montrer que cette dernière propriété à l'effet bénéfique de pouvoir exprimer le filtrage du symbole OFDM par le canal comme la multiplication dans le domaine fréquentiel du symbole porté par chaque sous-porteuse par un scalaire complexe égal à la réponse en fréquence du canal sur cette sous-porteuse. [14]

Ainsi, le CP assure une orthogonalité entre sous porteuses dans le domaine fréquentiel et donne les moyens au récepteur de récupérer l'intégralité du signal utile porté par chaque trajet du canal dans la fenêtre de traitement de la FFT, dans le domaine temporel. Il permet également à la transmission de tolérer des erreurs de synchronisation en temps. [1]

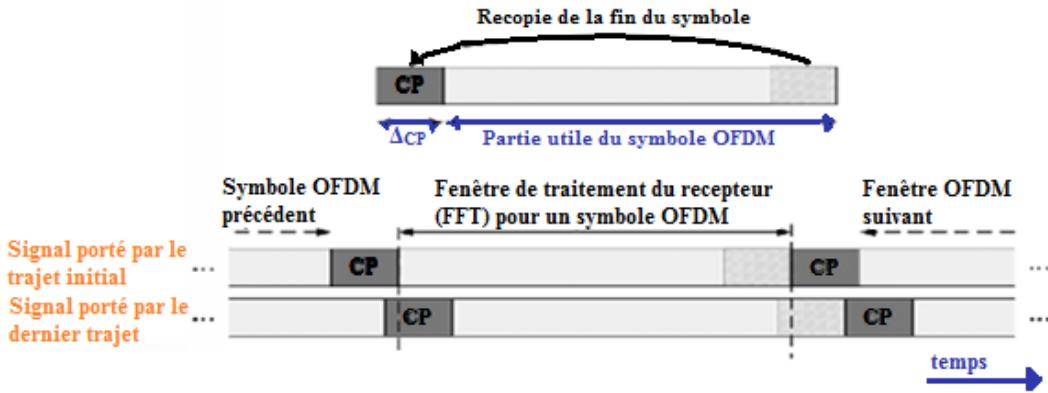


Figure 3.04 : Illustration de la protection contre l'interférence entre symboles assurée par le préfixe cyclique CP

Les paramètres importants d'un système OFDM sont ainsi résumés ci-après et leur relation illustrés à la **Figure 3.05** [1]:

- La durée du préfixe cyclique Δ_{CP} qui doit être supérieur à la dispersion des retards du canal ;
- La durée de la partie utile du symbole OFDM : T ;
- Le nombre de sous porteuses N_{FFT} égal à la taille de FFT/IFFT ;
- La période d'échantillonnage des symboles modulés en entrée du modulateur/démodulateur OFDM, égal à T/N_{FFT} ;
- L'espacement entre sous porteuse, égal à $1/T$;
- Le nombre de sous porteuses utiles et nulles ;

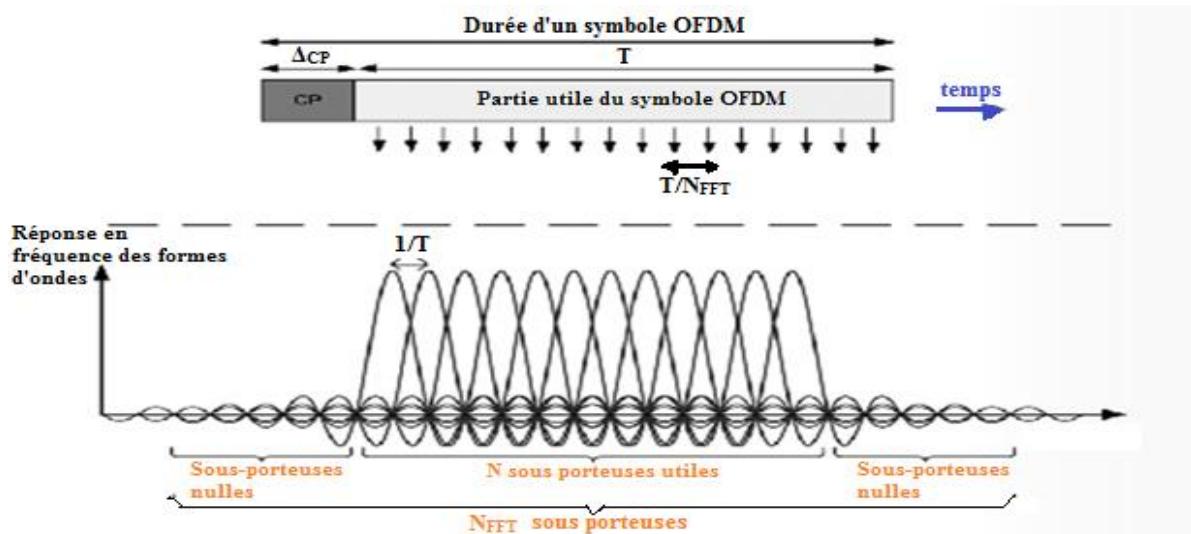


Figure 3.05 : Relation entre les paramètres temporels (haut) et fréquentiel (bas) d'un signal OFDM

3.3.3 La démodulation OFDM

Chaque sous porteuse occupe une largeur de bande faible devant la bande de cohérence du canal, de sorte que la réponse en fréquence du canal puisse être considérée comme plate sur la sous porteuse. En effet, contrairement à une transmission mono porteuse où la sélectivité en fréquence du canal distord sévèrement le signal émis, le signal reçu sur chaque sous porteuse en OFDM est simplement affecté par une atténuation. En effet, d'une part le préfixe cyclique permet d'exprimer la composante de signal utile reçue sur chaque sous porteuse, et d'autre part, le canal vu par une sous porteuse est plat en fréquence.

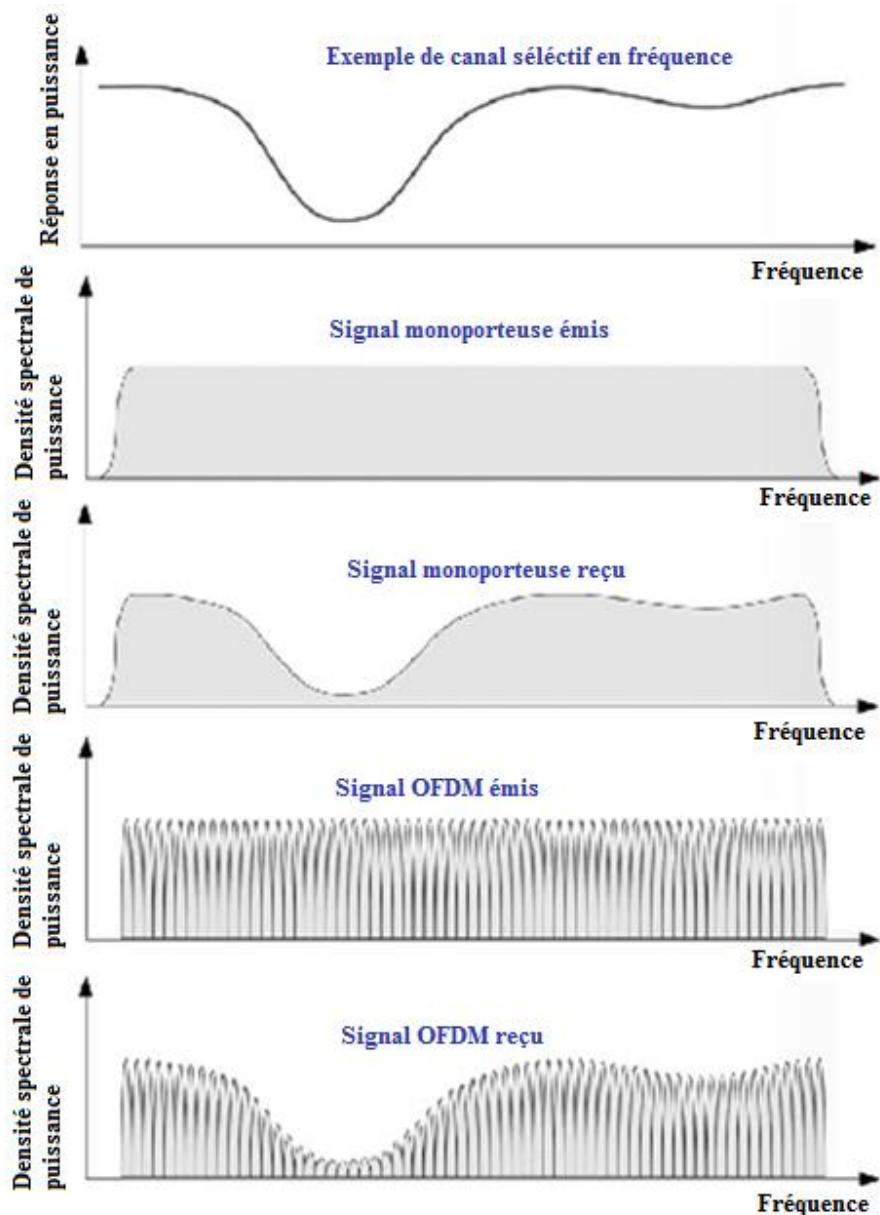


Figure 3.06 : Représentation de l'influence d'un canal sélectif en fréquence sur un signal OFDM et un signal monoporteuse

En réception, le démodulateur effectue les opérations inverses à celles de la modulation, comme décrit à la figure ci-dessous. Par commodité, N_{FFT} est simplement noté N sur la figure. Le signal reçu sur une sous porteuse i entre une antenne d'émission et une antenne de réception s'exprime comme la somme du symbole émis multiplié par un coefficient de canal scalaire complexe h et un terme d'interférence de bruit z . L'opération d'égalisation, qui vise à compenser l'effet du canal, peut ainsi être réalisée simplement dans le domaine fréquentiel, en multipliant l'échantillon reçu sur chaque sous porteuse par un scalaire complexe. Il est important de remarquer que le traitement d'égalisation s'effectue indépendamment pour chaque sous porteuse. Dans le cas du MIMO, l'égalisation sur une sous porteuse traite conjointement les signaux reçus des différentes antennes de réception. En sortie de l'égalisateur, les symboles estimés sont finalement délivrés au décodage de canal. [5] [15]

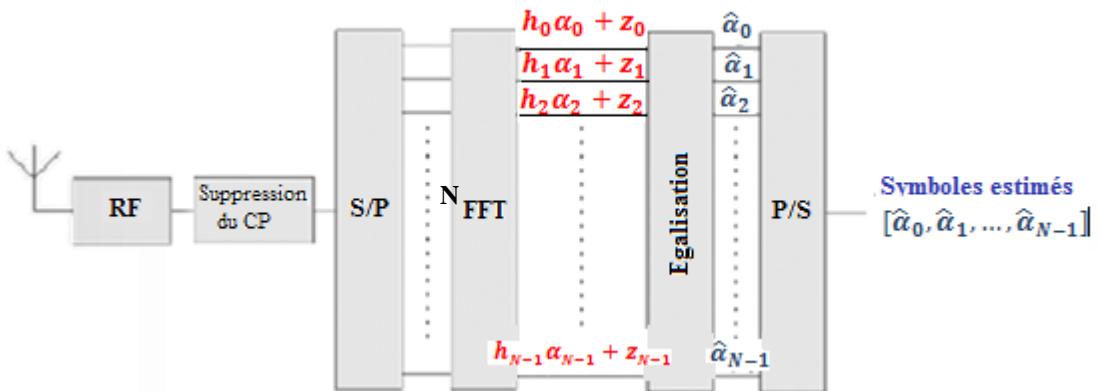


Figure 3.07 : Schéma du principe d'un démodulateur OFDM

3.4 L'OFDMA

L'OFDM permet de multiplexer différents utilisateurs, ou différents canaux, en leur allouant des sous-porteuses différentes. L'accès multiple selon ce principe est appelé OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) et est employé dans la liaison descendante du LTE. La **Figure 3.08** illustre le principe de l'OFDMA. [1]

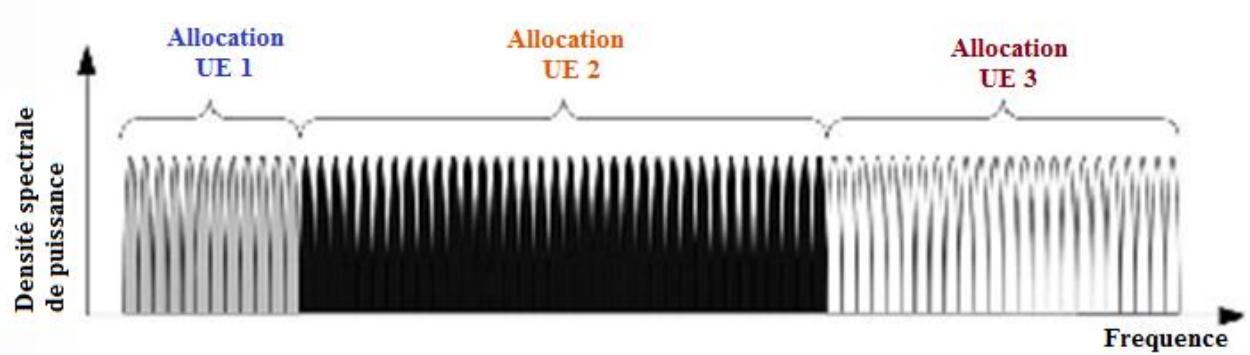


Figure 3.08 : Partage de la bande du système entre plusieurs UE en OFDMA

En particulier, l'OFDMA permet de dimensionner le nombre de sous porteuse allouées à un UE en fonction de ses besoins en débit. Par exemple, un UE effectuant un appel voix, qui ne nécessite qu'un faible débit, se verra allouer un nombre de sous porteuse inférieur à un UE téléchargeant un fichier volumineux. La **Figure 3.08** représente des allocations dites localisées, où les sous porteuses allouées à un UE sont contiguës.

Alternativement, lorsque l'émetteur ne dispose pas d'une connaissance suffisamment précise des conditions de canal d'un UE dans les différents sous bandes du système, on a généralement recours à une allocation distribuée. Ce type d'allocation repartit les sous porteuses allouées à un UE sur la bande du système afin de bénéficier de la diversité en fréquence. [1]

Ces deux types d'allocation en fréquence sont représentés sur la **Figure 3.09**.

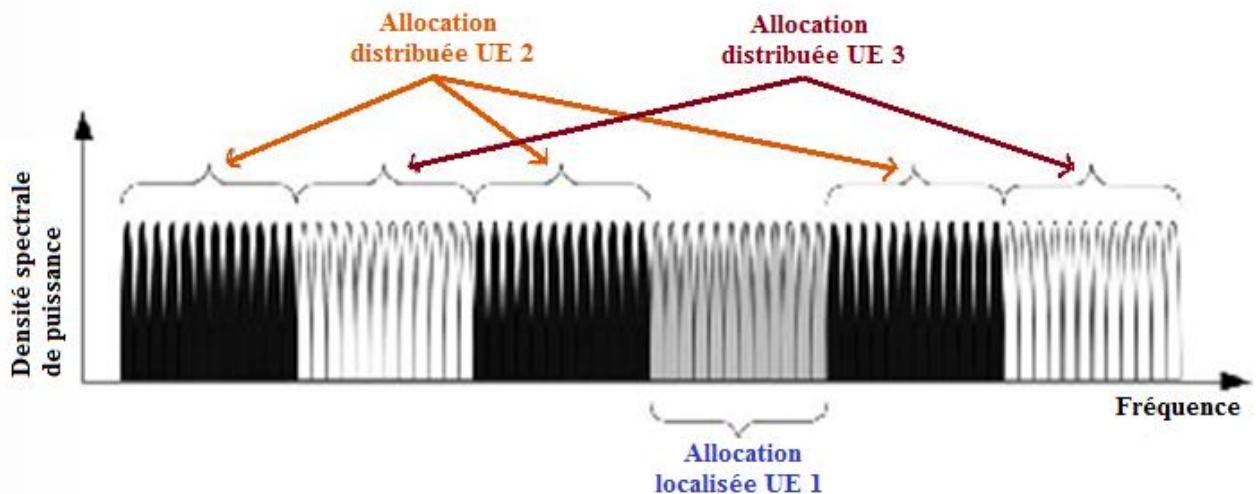


Figure 3.09 : Allocations localisées et distribuées en OFDMA

Du fait de l'attribution de sous porteuses orthogonale et exclusives aux UE d'une même cellule, l'OFDMA ne présente pas d'interférence intracellulaire.

3.5 La modulation SC-FDMA

Le SC-FDMA est une variante de l'OFDM pouvant être mis en œuvre à l'aide d'un modulateur OFDM même auquel on ajoute un précodage des symboles à transmettre par une DFT, entre la conversion série-parallèle et l'opération d'IFFT. C'est de cette manière qu'est spécifié le SC-FDMA en LTE [17]. De manière similaire à l'OFDM, le signal dans le domaine temporel $\{d_0 \dots d_{N-1}\}$ correspondant au bloc de symboles de modulations d'entrée $\{a_n\}$ est un symbole SC-FDMA.

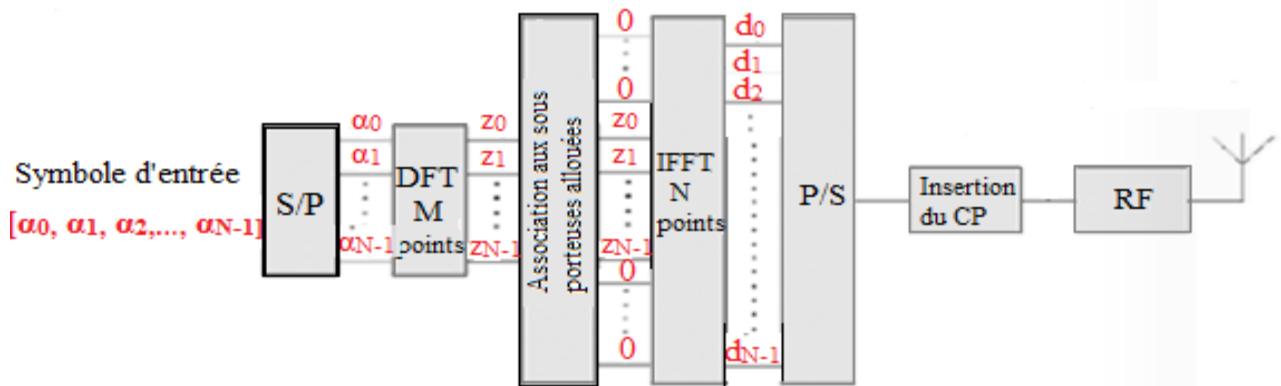


Figure 3.10 : Schéma de principe d'un modulateur SC-FDMA

On remarque qu'un symbole émis sur une sous-porteuse est maintenant une combinaison linéaire de symboles modulés du bloc d'entrée. Par ailleurs, les sous-porteuses allouées à un UE donné ont la contrainte d'être toutes contiguës. Le précodage DFT et la contrainte de contiguïté ont pour effet de restaurer la propriété de transmission monoporteuse. On appelle ainsi cette variante le FDMA monoporteuse ou encore le DFT-Spread OFDM qui signifie littéralement OFDM étalée par DFT. [18]

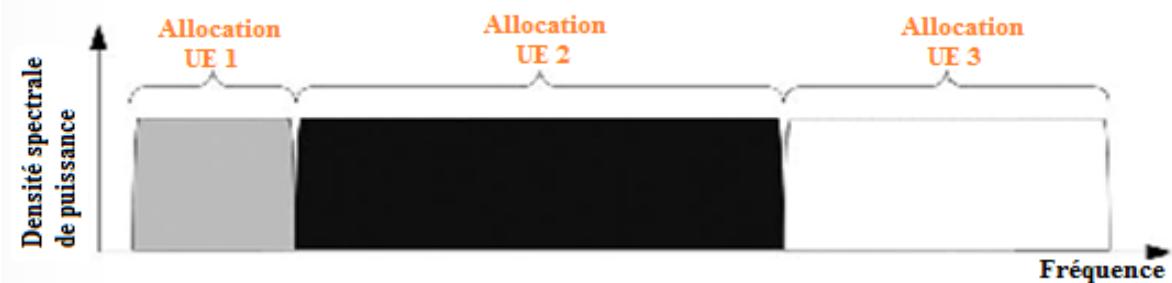


Figure 3.11 : Partage de la bande du système entre plusieurs UE en SC-FDMA

3.6 La dimension fréquentielle en LTE

De par la dimension fréquentielle introduite par l'OFDM et le SC-FDMA, l'allocation de ressources en LTE s'effectue à la fois dans les dimensions temporelle et fréquentielle. Les ressources radio en voie descendante et voie montante se présentent ainsi sous la forme d'une grille temps-fréquence représentée à la figure suivante. La plus petite unité de ressource fréquentielle pouvant être allouée à un UE par le scheduler est le PRB (Physical Ressource Block).

Un PRB dure 0,5 ms, soit un slot, et est constitué de plusieurs symboles OFDM (ou SC-FDMA). Rappelons qu'un symbole OFDM représente le signal dans le domaine temporel correspondant à un bloc de symboles de modulation émis sur les différentes sous-porteuses de la bande du système. La durée d'un symbole dépend de la valeur du préfixe cyclique (CP). La largeur de bande d'un PRB est de 12 sous-porteuses, soit 180 KHz.

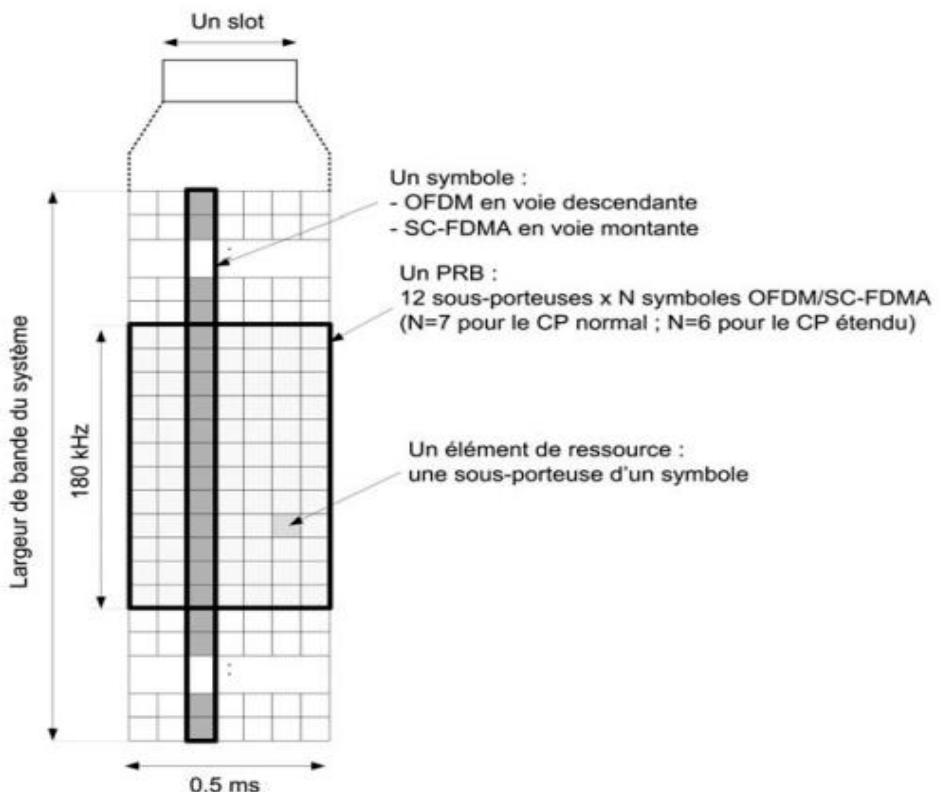


Figure 3.12 : Grille de ressources temps fréquence en voie montante et descendante

Une sous-porteuse d'un symbole OFDM/SC-FDMA est appelée un élément de ressource. Un élément de ressource porte un symbole de modulation en OFDM. Les ressources s'allouent par

paire de PRB, les PRB d'une paire étant alloués dans deux slots consécutifs d'une même sous-trame. Le nombre de PRB dans la dimension fréquentielle dépend de la largeur de bande du canal, comme indiqué dans le **Tableau 3.02**.

	Largeur de bande du canal (MHz)					
	1.4	3	5	10	15	20
Largeur de bande du système en nombre de PRB	6	15	25	50	75	100

Tableau 3.02 : Largeur de bande du système en nombre de PRB

La largeur de bande disponible pour la transmission est appelée la largeur de bande du système. Elle est inférieure à la largeur de bande du canal, comme décrit à la figure suivante, afin de laisser des bandes de garde de part et d'autre pour limiter l'interférence de canal adjacent.

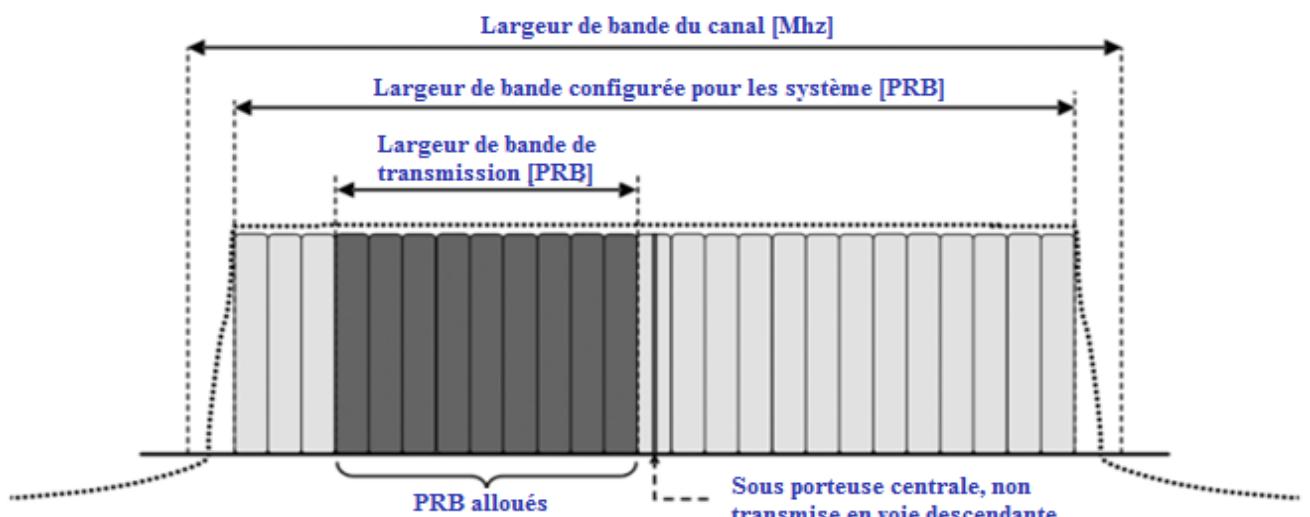


Figure 3.13 : Bande du canal et bande du système [1]

3.7 Les canaux

Nous décrivons ci-après l'ensemble des canaux utilisés par l'interface radio du LTE, pour chacune des trois catégories que nous avons vu dans le chapitre 2.

3.7.1 Les canaux logiques

Lorsque la couche RLC construit une unité de données ou Protocol Data Unit (PDU), elle la communique ensuite via le canal logique adéquat à la couche MAC. Cette dernière peut alors ajouter dans l'en-tête MAC l'identifiant de ce canal, si nécessaire. Après les traitements par la

couche MAC, celle-ci délivre la PDU MAC à la couche physique via le canal de transport associé au canal logique. Le marquage du canal logique dans l'en-tête MAC permet à l'entité MAC distante de restituer cette information à la couche RLC, qui traite et aiguille ensuite correctement cette unité de données. Il est rendu nécessaire par le fait que, dans certains cas, plusieurs canaux logiques peuvent être multiplexés sur le même canal de transport. L'identification par l'entité paire du canal de transport n'est donc pas suffisante pour un aiguillage correct des données. La correspondance canal de transport-canal logique est configurée par la couche RRC lors de l'établissement de la connexion RRC ou de sa reconfiguration.[1]

Le **Tableau 3.03** présente les différents canaux logiques définis pour l'interface radio du LTE.

CANAL LOGIQUE	ACRONYME	CANAL DE CONTROLE (PLAN DE CONTROLE)	CANAL DE TRAFIC (PLAN USAGER)	USAGE	EXEMPLES D'INFORMATION TRANSMISE
Broadcast Control Channel	BCCH	x		Pour la diffusion d'informations de contrôle sur la cellule.	Identifiant de la cellule, largeur de bande DL, ...
Paging Control Channel	PCCH	x		Pour la notification d'appels.	Identifiant de l'UE dans la zone de localisation, type d'appel.
Common Control Channel	CCCH	x		Pour la transmission de la signalisation quand elle ne peut être transmise sur un canal dédié (DCCH).	Demande d'établissement d'une connexion RRC.
Dedicated Control Channel	DCCH	x		Porte la signalisation dédiée à un utilisateur (RRC et NAS).	Message commandant à l'UE de réaliser un Handover.
Dedicated Traffic Channel	DTCH		x	Porte les informations de trafic dédiées à un utilisateur.	Données d'un flux de Streaming video.

Tableau 3.03 : Canaux logiques fournis par la couche MAC

3.7.2 Les canaux de transport

Un canal de transport est caractérisé par la façon dont les données sont transportées sur les ressources physiques, notamment :

- la méthode d'accès aux ressources radio (scheduling dynamique, semi-persistant ou statique) ;
- les formats de transport autorisés, qui définissent les traitements de la couche physique à appliquer (type de codage de canal, schéma de transmission MIMO, etc.) ;
- la possibilité d'effectuer des retransmissions d'HARQ, et si oui, de quel type.

Plusieurs canaux de transport sont définis dans l'interface radio du LTE pour les sens montant et descendant, dont les caractéristiques sont résumées dans le **Tableau 3.04**.

CANAL DE TRANSPORT	ACRONYME	SENS	CARACTERISTIQUES	USAGE	EXEMPLES D'INFORMATION TRANSMISE
Broadcast Channel	BCH	DL	Ressources, périodicité et format de transport fixes et prédefinis. Doit être transmis sur toute la zone de couverture de la cellule.	Diffusion d'informations sur la cellule. Le BCH porte exclusivement le BCCH.	Master Information Block (MIB) : largeur de la bande DL sur la cellule, System Frame Number (SFN)
Downlink Shared Channel	DL-SCH	DL	Permet l'HARQ et l'adaptation de lien, l'allocation dynamique ou semi-persistante de ressources et l'utilisation de la réception discontinue par l'UE.	Transmission de données dédiées de contrôle et du plan usager. Egalement pour transmettre les informations non portées par le BCH.	Canaux DCCH, DTCH, CCCH Canal BCCH : diffusion des informations cellules autres que celles du MIB.

Paging Channel	PCH	DL	Doit être transmis sur toute la zone de couverture de la cellule. Partage les mêmes ressources physiques que le DL-SCH.	Diffusion des informations de paging sur l'ensemble de la cellule.	Canal PCCH
Random Access Channel	RACH	UL	Basé sur l'accès partagé aléatoire qui implique un risque de collision entre plusieurs UE lors de la procédure d'accès au réseau.	Etablissement d'une connexion RRC avec la station de base, son rétablissement, lors d'un Handover ou pour transmettre des données, ou encore sur ordre de la station de base si la synchronisation en voie montante été perdue.	Préambule choisi de façon aléatoire par l'UE dans un jeu de préambule prédéfinis.
Uplink Shared Channel	UL-SCH	UL	Permet l'HARQ et l'adaptation de lien, l'allocation dynamique ou semi-persistante de ressources	Pour la transmission de données dédiées de contrôle et du plan usager.	Canaux DCCH, DTCH, CCCH

Tableau 3.04 : Canaux de transport fournis par la couche physique [1]

3.7.3 Les canaux physiques

Les canaux physiques fournissent le moyen de transmettre par radio les données des canaux de transport. Une SDU reçue de la couche MAC via un canal de transport donné est appelée un bloc

de transport. Un canal physique correspond à un ensemble d'éléments de ressource temps-fréquence (un élément de ressource est une sous-porteuse d'un symbole OFDM) dans la sous-trame. De plus, il est associé à des caractéristiques physiques particulières, comme une séquence d'embrouillage, des schémas de codage et modulation, des schémas MIMO (en voie descendante uniquement). Les **Tableau 3.05 et 3.06** présentent de manière synthétique les différents canaux physiques, pour la voie montante et la voie descendante respectivement.

CANAL PHYSIQUE	ACRONYME	CARACTERISTIQUES	USAGE
Physical Uplink Shared Channel	PUSCH	Ses paramètres de transmission sont déterminés dynamiquement par l'adaptation de lien	Pour la transmission du UL-SCH : porte également les informations de contrôle du PUCCH en cas de collision de ces deux canaux sur le même intervalle de temps.
Physical Uplink Control Channel	PUCCH	N'est jamais transmis simultanément au PUSCH d'un même UE (en Release 8)	Pour la transmission d'informations de contrôle nécessaires à l'HARQ et à l'allocation de ressources.
Physical Random Access Channel	PRACH	Est formé d'un préambule spécifique à l'UE	Porte le RACH

Tableau 3.05 : Canaux physiques pour la voie montante

CANAL PHYSIQUE	ACRONYME	CARACTERISTIQUES	USAGE
Physical Downlink Shared Channel	PDSCH	Ses paramètres de transmission sont déterminés dynamiquement par l'adaptation de lien.	Pour la transmission du DL-SCH et du PCH
Physical Broadcast Channel	PBCH		Pour la transmission du BCH
Physical Control Format Indicator Channel	PCFICH	Le PCFICH est placé dans le premier symbole OFDM de chaque sous trame	Indique le nombre de symboles OFDM utilisés pour la transmission du PDCCH dans une sous trame

Physical Downlink Control Channel	PDCCH	Le PDCCH est placé dans le premier symbole OFDM de chaque sous trame	Pour la transmission d'informations de contrôle : schéma de modulation et codage et allocation de ressources du DL-SCH, PCH et UL-SCH, informations d'HARQ pour le DL-SCH. Ordre de déclenchement d'une procédure d'accès aléatoire.
Physical Hybrid ARQ Indicator Channel	PHICH	Le PHICH est placé dans le premier symbole OFDM de chaque sous trame	Porte les acquittements d'HARQ.

Tableau 3.06 : Canaux physiques pour la voie descendante

3.7.4 Association des différents canaux

Les figures suivantes décrivent l'association entre les canaux logiques, de transport et physiques, respectivement pour la voie montante et la voie descendante.

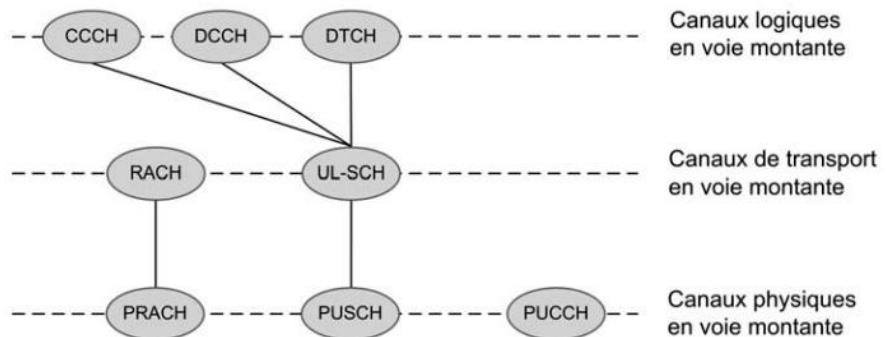


Figure 3.14 : Association entre canaux logiques, de transport et physiques en voie montante

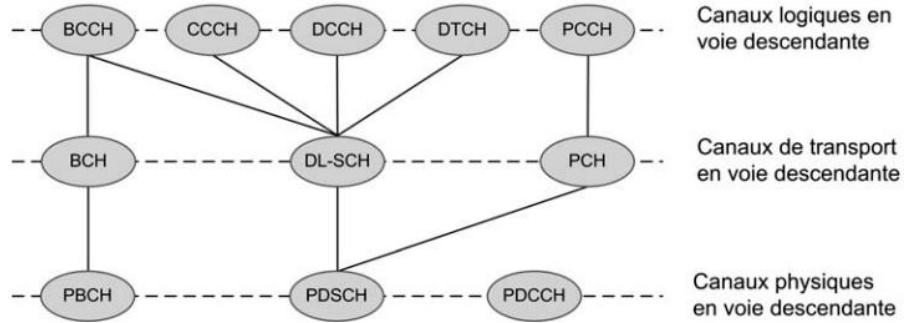


Figure 3.15 : Association entre canaux logiques, de transport et physiques en voie descendante

3.8 Techniques MIMO

La technologie MIMO (Multiple input Multiple Output) constitue une partie essentielle de la technologie LTE pour atteindre les exigences en matière de débit et d'efficacité spectrale. [19]

MIMO se réfère à l'utilisation de plusieurs antennes au niveau du côté émetteur et du récepteur.

Il existe deux modes de fonctionnalité en MIMO. Différents gains peuvent être réalisés en fonction du mode utilisé. Le premier mode est le mode de multiplexage spatial qui permet de transmettre différents flux de données simultanément sur le ou les même(s) bloc(s) de ressources par l'exploitation de la dimension spatial et ainsi augmenter la capacité ou le débit de donnée.

Le second mode est le mode de transmission utilisant la diversité. Ce mode exploite la diversité et augmente la robustesse de transmission de données. En effet, chaque antenne d'émission émet essentiellement le même flux de données, de sorte que le destinataire reçoit des répliques du même signal. Cela augmente le rapport signal sur bruit au niveau du récepteur ainsi que la robustesse de la transmission de données, en particulier dans des scénarios d'évanouissement.

Prenons exemple d'un système MIMO 4*4, le rapport de transmission peut être décrit au moyen d'une matrice du canal H . Les coefficients h_{ij} signifie l'antenne d'émission j recevant de l'antenne d'émission i , ainsi, tous les chemins possibles entre le côté émetteur et récepteur sont décrits.

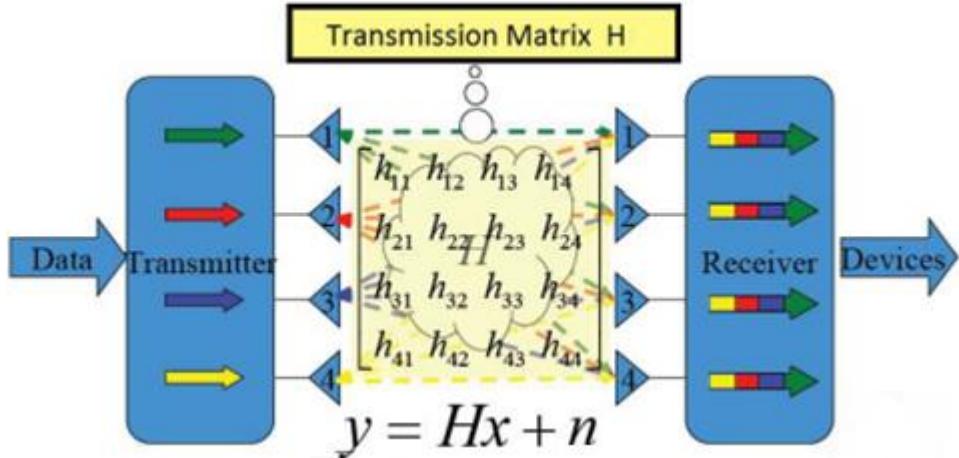


Figure 3.16 : Transmission MIMO

Supposons le vecteur de réception y , le vecteur de transmission serait x , le vecteur bruit n et la matrice du canal de transmission H . La transmission MIMO peut être décrite par la formule :

$$y = Hx + n \quad (3.03)$$

Dans une configuration d'antenne $M \times N$, le nombre de flux de données qui peut être transmise en parallèle sur le canal MIMO est donné par la valeur minimale de M et N et est limité par le rang de la matrice de transmission H .

Dans le mode de multiplexage spatial, les flux de données transmis peuvent appartenir à un seul utilisateur (MIMO mono utilisateur/SU_MIMO) ou aux différents utilisateurs (MIMO multi-utilisateurs/MU-MIMO)

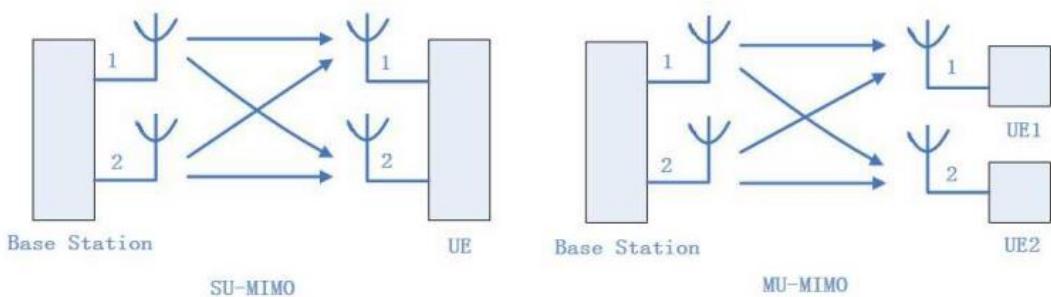


Figure 3.17 : SU-MIMO et MU-MIMO

Nous avons vu précédemment les différents types de canaux de transport. En effet, un canal de transport est défini par : « comment et avec quelles caractéristiques l'information est transmis sur l'interface radio ». [20] Les données transmises sur un canal de transport sont organisées en blocs

de transport. Dans chaque intervalle de temps de transmission (TTI), au plus un bloc de transport d'une certaine taille peut être transmis sur l'interface radio vers/depuis un terminal mobile sans multiplexage spatial. Cependant, en cas d'utilisation d'un système MIMO, jusqu'à deux blocs de transport peuvent être transmis par TTI, où chaque bloc de transport correspond à un mot de code en cas de liaison descendante. Cela signifie que même si le LTE supporte le multiplexage spatial allant en liaison descendante jusqu'à quatre couches, le nombre de blocs et de mots de code de transport est encore limité à deux. [19]

3.9 Capacité en LTE

D'après la théorie de Shannon, la capacité, comme indiquée sur la formule qui suit, est utilisée pour calculer la quantité maximale de données numériques sans erreur en bits/s/Hz qui peut être transmis avec une bande passante spécifiée en fonction de la présence de l'interférence de bruit.

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3.04)$$

Avec C : capacité du canal

B : Bande passante

S/N: Signal to Noise ratio (SNR)

Cependant, cette capacité ne peut être atteinte dans la pratique en raison de plusieurs questions de mise en œuvre. Pour représenter les mécanismes de perte de décision, l'expression de Shannon modifiée dans la liaison descendante est utilisée [19]:

$$C = \frac{\eta_{BW}}{Q} \sum_{K=1}^{K_q} \sum_{q=1}^Q \log_2 \left(1 + \eta_{SNR} \alpha_{K,q} \frac{\beta_{K,q}}{\sigma_{N_t}^2} \right) \quad (3.05)$$

Avec

η_{BW} : efficacité de la bande passante

Q : nombre de sous canal

K_q : Rang de la matrice H (canal MIMO)

η_{SNR} : Efficacité SNR

$\alpha_{k,q}$: Gain de puissance de sous canal (k,q)

$\sigma_{N_t}^2$: Puissance de bruit

$\beta_{k,q}$: Allocation de puissance pour le sous canal (k,q)

$$\beta_{k,q} = \frac{P_{TX}}{RQ} \quad (3.06)$$

avec P_{TX} : puissance totale émise

R : Nombre de bloc de ressource

Comme vu précédemment, le système MIMO n'est pas utilisé dans le sens montant décrit par la 3GPP version8, ainsi, la capacité totale du sens montant est calculée comme suit :

$$C = \frac{\eta_{BW}}{Q} \sum_{q=1}^Q \log_2 \left(1 + \eta_{SNR} \alpha_{k,q} \frac{\beta_{k,q}}{\sigma_{N_t}^2} \right) \quad (3.07)$$

3.10 Ordonnancements en LTE

Nous survolerons dans cette partie les algorithmes d'ordonnancement existant dans les deux sens dowlink et uplink.

3.10.1 Algorithmes d'ordonnancement en downlink

Les algorithmes d'allocation de ressources radio ont pour objectif d'améliorer les performances du système en augmentant l'efficacité spectral et l'équité dans le réseau. Il est donc essentiel de trouver un compromis entre l'efficacité (augmentation en débit) et l'équité entre les utilisateurs.

3.10.1.1 Les algorithmes opportunistes

Ce type d'algorithme utilise des files d'attentes infinies, ces files d'attente sont utilisées dans le cas de trafic non temps réel. L'objectif principal de ce type d'algorithmes est de maximiser le débit global du système.

Exemple : Exponential Proportional Fair (EXP-PF)

Cet algorithme priorise les flux temps réel par rapport aux autres [17]. Un utilisateur k est désigné pour l'ordonnancement suivant la relation suivante :

$$k = \max_i a_i \frac{d_i(t)}{d_i} \exp\left(\frac{\alpha_i w_i(t) - x}{1 + \sqrt{x}}\right) \quad (3.08)$$

$$X = \frac{1}{N} \sum_i a_i W_i(t) \quad (3.09)$$

Avec

$W_i(t)$: Délai toléré par le flux

α_i : paramètre strictement positive pour tous i

3.10.1.2 Les algorithmes équitables

Plusieurs travaux de recherche ont visé l'équité entre les utilisateurs dans les réseaux LTE, ces algorithmes présentent généralement une insuffisance au débit. A noter que l'équité ne veut pas dire l'égalité.

Exemple : Max-Min Fair (MMF)

L'algorithme distribue les ressources entre les utilisateurs successivement en vue d'augmenter le débit de chaque utilisateur. Une fois que l'utilisateur alloue les ressources demandées pour atteindre son débit, on passe à l'utilisateur suivant. L'algorithme s'arrête par épuisement des ressources ou que les utilisateurs soient satisfaits. [1]

3.10.1.3 Algorithmes considérant les délais

Ce type d'algorithme traite les délais d'arrivés et de délivrance des paquets. Conçue principalement pour traiter les flux temps réel (multimédia et VoIP). Si un paquet dépasse ces valeurs de retard toléré, il sera supprimé de liste des flux à ordonner ce qui dégrade considérablement la QoS. [1]

3.10.1.4 Algorithmes optimisant le débit

Ce type d'algorithme essaye de maximiser la fonction objective qui représente le débit, cette approche traite les flux temps réel et non temps réel, l'allocation de ressources dépend de la taille de la file de chaque utilisateur. Exemple d'algorithme de cette famille EXP Rule, Max-Weight etc.

3.10.1.5 Les algorithmes multi-classe

Cette approche considère les classes de flux où le traitement est différent pour chaque classe RT et NRT. Ce type d'algorithme privilégie les flux temps réel par rapport aux non temps réel, ce qui le rend les plus adéquats et plus efficace pour l'ordonnancement en LTE, par contre l'équité n'est vraiment pas considérée. [1]

3.10.2 Algorithmes d'ordonnancement en uplink

Contrairement à l'ordonnancement côté downlink, l'ordonnancement côté uplink est bien plus compliqué pour plusieurs raisons, premièrement, c'est l'UE qui envoie les données et nous savons très bien que l'UE est doté d'une source d'énergie limitée, deuxièmement, c'est très difficile de prévoir le nombre de ressources radio nécessaires à un UE pour qu'il puisse échanger ces données avec la station de base. Suivant la fonction objectif prise en considération et suivant les classes de trafic qui passe par-dessus les canaux radio, nous avons trois grandes catégories d'ordonnanceurs: ceux traitant les flux best-effort, ceux prenant en considération la QoS et ceux optimisant la puissance d'émission. Dans cette partie nous allons essayer de faire le tour sur les principales familles d'algorithmes d'allocation de ressources en LTE uplink. [1]

3.10.2.1 Ordonnanceurs de flux best effort

Cet algorithme utilise la métrique PF et il essaye de maximiser la fonction objective suivante :

$$U = \sum_{u \in U} \ln R(u) \quad (3.10)$$

Avec

$R(u)$: Débit moyen de l'UE u à l'instant t .

L'utilisation de la fonction logarithme est pour avoir une équité proportionnelle.

3.10.2.2 Ordonnanceurs considérant la QoS

Parmi les algorithmes proposés, il y a PFGBR (Proportional Fair with Guaranteed Bit Rate). Depuis son nom, on distingue deux métriques PF et GBR, la métrique PF est utilisée pour ordonner les UEs avec flux non GBR et pour ceux ayant un flux GBR, l'algorithme change la métrique pour pouvoir différencier les UE (donner des priorités aux UEs). [21]

3.10.2.3 Ordonnanceurs traitant la puissance du signal

Le but principal de cette catégorie d'algorithmes est de minimiser la puissance du signal émis, pour essayer de rallonger la durée d'activité de l'UE, ce qui coïncide avec l'objectif de la méthode d'accès SC-FDMA. Cette approche n'a pas été vraiment trop traitée par les chercheurs, ainsi il n'y a que peu d'algorithmes dans la littérature. Citons par exemple les travaux [22] et [23].

3.11 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de comprendre les différentes techniques utilisées dans le canal radio d'un réseau LTE, notamment la technologie MIMO, la modulation OFDM pour la voie montante et SC-FDMA pour la voie descendante, mais également l'accès multiple OFDMA. Nous avons parlé en plus des structures des couches, des protocoles utilisés, mais aussi des différents canaux utilisés par ce système. Nous pouvons donc entamer l'étude du handover entre le système LTE et UMTS en ayant pris connaissance des techniques vues dans les chapitres précédents.

CHAPITRE 4

HANOVER ENTRE UMTS ET LTE

4.1 Introduction

Comme nous l'avons mentionné plus haut, la mobilité en mode connecté entre le LTE et les réseaux UMTS est essentiel en s'appuyant sur le fait que le déploiement du réseau LTE se faisant progressivement, et que ses zones de couverture sont habituellement limitées aux grands centres urbains dans un premier temps et à des surfaces géographiques limitées de façon générale. Cela implique donc, pour une technologie dite mobile, de mettre en place dès le début des mécanismes de continuité de service depuis le nouveau réseau vers le réseau existant.

Ce chapitre nous conduira ainsi vers une meilleure compréhension des mécanismes de handover générale, des différents types de handover, et enfin des mécanismes de handover entre le LTE et l'UMTS.

4.2 Les mécanismes de mobilité en mode connecté

En effet, il est important de distinguer les différents mécanismes de mobilité en mode connecté qui varie en fonction du choix de l'opérateur. Ainsi, on distingue 3 différents mécanismes[1] :

- La resélection, qui repose sur les mêmes principes que ceux utilisés en mode veille, est employée par exemple en GPRS et en UMTS dans des états transitoires ou dormants. L'UE envoie ou reçoit peu de données (faible activité) et les périodes d'inactivité lui permettent alors de réaliser des mesures sur des cellules voisines. Lors d'une resélection, le réseau n'effectue aucune préparation sur la cellule cible.
- La redirection consiste à envoyer l'UE vers une cellule cible, sans dialogue préalable entre la station de base d'origine et celle de destination. Cette cellule cible peut se trouver sur une autre fréquence ou appartenir à un autre système. Aucune ressource radio, logique ou de transmission n'est réservée sur la cellule ou sur le système cible. Cela réduit donc la probabilité de succès de l'opération. Par ailleurs, la procédure de bascule peut être longue et conduire à des pertes de données, donc à une dégradation de la qualité de service perçue par l'usager. En revanche, elle est simple pour le réseau et n'entraîne pas de charge de signalisation entre les nœuds source et cible.

- Le handover se distingue de la redirection par une phase de préparation de la station de base de destination et par une bascule du flux de données plus rapide et souvent plus fiable (car plus proche de l'interface radio): il suit le principe désigné en anglais *make before break*, c'est-à-dire de préparer l'environnement radio cible avant de relâcher l'existant.

La redirection comme le handover peut être déclenché à la suite de mesure sur des cellules voisines (du même système ou d'un système différent), ou de façon aveugle, c'est-à-dire sans aucune mesure préalable sur ces cellules candidates. On parle dans ce dernier cas de *blind handover* ou *blind redirection*. Ce mode présente l'inconvénient d'un risque plus élevé d'échec, puisqu'on ne vérifie pas que le niveau de signal reçu par l'UE sur la cellule cible est suffisant pour maintenir la connexion radio, et donc l'appel en cours.

4.3 Généralités sur le handover

4.3.1 Les différents types de handover

On peut caractériser un handover à partir des critères qui sont la technologie d'accès radio ou RAT (Radio Access Technologie) et/ou la fréquence respective des cellules source et cible, mais aussi l'interruption ou non du lien radio lors de la bascule.

Ainsi, pour le premier critère cité précédemment, un handover entre deux cellules du même système sera dit intrafréquence si les cellules sont portées par la même fréquence radio et interfréquence dans le cas contraire. On parle de handover inter-RAT ou intersystème lorsque les deux cellules appartiennent à deux systèmes différents. Les fréquences sont alors nécessairement différentes.

Le second critère de caractérisation indique que si le lien radio sur la cellule source est relâché avant l'établissement du lien radio sur la cellule cible, la bascule est réalisée avec une interruption de la transmission sur l'interface radio entre l'UE et le réseau. C'est le type de handover utilisé en GSM, ou en UMTS pour les handover interfréquences. Pour rappel, en GSM un handover est nécessairement interfréquence puisque les cellules voisines sont portées sur des fréquences différentes.

Au contraire, si le second lien radio est établi entre la cellule cible et l'UE alors que le lien sur la cellule source est toujours actif, la transmission radio ne sera pas interrompue. L'UE a alors deux liens radio actifs, qui portent les mêmes données depuis et vers l'UE, et qui lui offrent un gain de diversité: les deux liens empruntent des chemins radio différents et ne sont donc pas soumis aux mêmes perturbations. La station de base peut alors réduire sa puissance d'émission vers l'UE, ou

la maintenir pour améliorer la réception de l'UE. Le lien initial peut donc être conservé au-delà de cet ajout et être supprimé par exemple lorsque sa qualité deviendra trop faible pour apporter une information utile à l'UE (voir la **Figure 4.01**). Le terme soft handover a été choisi pour désigner cette bascule opérée sans interruption du lien radio entre l'UE et le réseau. Par opposition, on a alors consacré la dénomination hard handover au type de handover précédent, illustré sur la partie droite de la **Figure 4.01** : le lien radio sur la cellule C1 est relâché avant l'établissement du lien sur la cellule C2. [1]

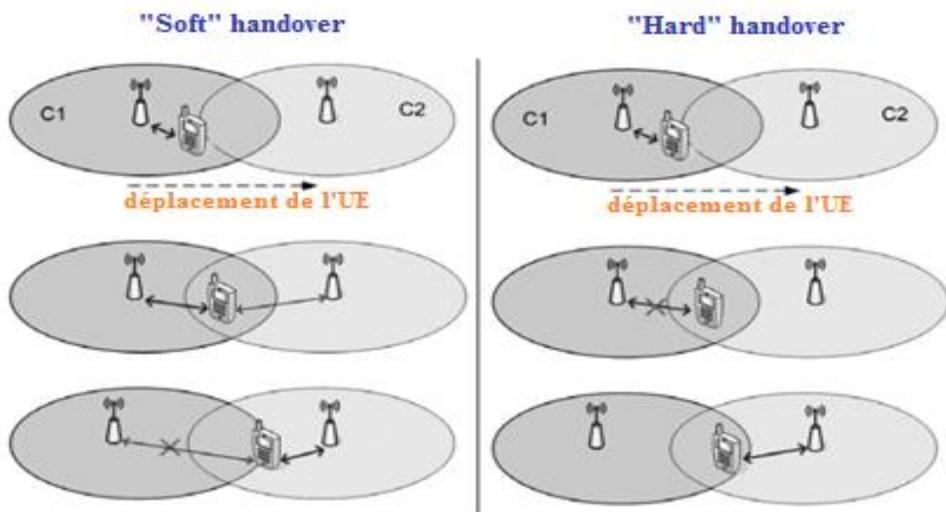


Figure 4.01 : Principe du soft handover et du hard handover

4.3.2 Les différentes phases d'un handover

On peut distinguer trois phases dans la réalisation d'un handover :

1. la phase de mesure sur la cellule serveuse et sur les cellules voisines ;
2. la phase de préparation de la cellule cible, qui met en jeu des échanges entre les contrôleurs de stations de base source et destination, ainsi qu'entre ces contrôleurs et le réseau cœur ;
3. la phase d'exécution, c'est-à-dire la bascule de l'UE et des flux de données, puis la relâche des ressources dans la cellule d'origine.

La **Figure 4.02** montre le séquencement de ces phases, les nœuds impliqués et les principales actions réalisées.

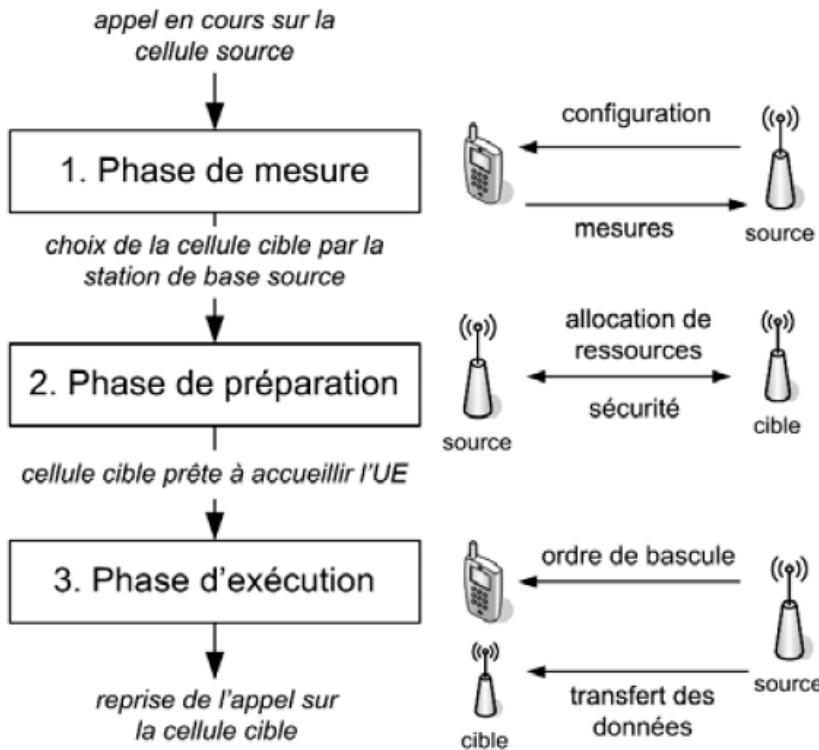


Figure 4.02 : Les phases d'un handover

4.3.3 Le rôle de l'UE dans un handover

Le rôle de l'UE dans la procédure de handover est crucial à deux égards :

- pour réaliser des mesures fiables sur son environnement et les remonter au contrôleur de la station de base ;
- pour la bascule proprement dite sur la cellule cible.

La performance radio de l'UE est donc un élément clé du succès de cette procédure. Il est donc primordial, pour un opérateur, de s'assurer que les UE utilisés sur son réseau sont capables de réaliser cette procédure radio dans un délai minimal, afin de limiter le temps d'interruption du service.

4.4 Le handover LTE vers UMTS

Rappelons que le système LTE/EPC a été conçu pour utiliser l'architecture de service IMS, entièrement basée sur le protocole IP : cela signifie que tous les services, y compris ceux de type conversationnel (voix, visiophonie), sont destinés à être portés de bout-en-bout par ce protocole

(VoIP pour la voix). Le handover en mode paquet est donc la procédure adéquate pour basculer un appel VoIP entre les systèmes LTE et UMTS tout en le maintenant sur l'IMS pour la signalisation. Cependant, lors de la définition des systèmes LTE/EPC, certains opérateurs ont souhaité permettre une mobilité vers le mode circuit de l'UMTS, afin de ne pas avoir à déployer une infrastructure IMS dès le déploiement de leur réseau LTE/EPC. Cela a conduit à la définition de la procédure CS Fallback, qui transfère un appel VoIP en LTE vers la technologie la plus utilisée en UMTS ou en GSM/GPRS pour la voix : le mode circuit (CS). [1]

Ainsi, on distingue plusieurs mécanismes de mobilité en mode connecté pour couvrir différents cas d'usages (voix, données) et de déploiement :

- Handover en mode paquet (PS handover, pour Packet-Switched handover), similaire au mécanisme existant entre 3G et 2G pour la continuité des sessions de données, qui peut être utilisé pour la mobilité entre le LTE et le domaine PS des technologies 3G et 2G.
- Handover de type « paquet vers circuit » (SR-VCC pour Single Radio Voice Call Continuity), transférant un appel VoIP en LTE vers le domaine CS de la 3G ou de la 2G.
- Resélection commandée par la station de base (Cell Change Order).
- Redirection lors de l'établissement ou de la relâche de la connexion RRC, similaire à la redirection existant en UMTS.

Cependant, ce mémoire étant réservé à l'étude du handover vertical du LTE, nous avons choisi de l'étude du handover en mode paquet.

4.4.1 Mécanismes de Direct Forwarding et de Direct Tunnel

Deux mécanismes complémentaires peuvent être utilisés pour accélérer l'envoi des données du plan usager au RNC :

- l'un pour le transfert des données déjà reçues, de l'eNodeB vers le RNC lors du handover uniquement (Direct Forwarding) ;
- le second, plus général, pour la transmission directe des données depuis le GGSN ou la S-GW au RNC (Direct Tunnel), dès qu'un service implique un transfert de données vers l'UE.

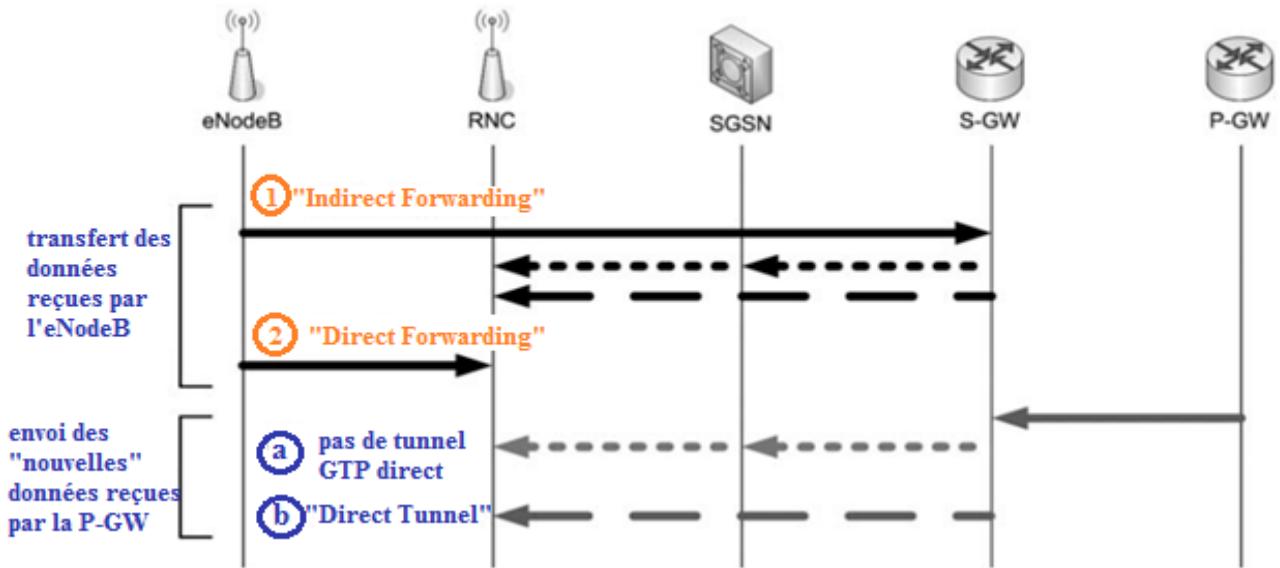


Figure 4.03 : Mécanismes Direct Forwarding et Direct Tunnel [1]

Le mécanisme Direct Forwarding désigne ainsi le transfert de données du plan usager pendant le handover, directement de l'eNodeB vers le RNC cible, sans transiter par la ou les S-GW. Dans le cas contraire (Indirect Forwarding), ces données sont d'abord envoyées par l'eNodeB à la S-GW. Ensuite, cette dernière transmet les données soit au SGSN, qui les envoie lui-même au RNC, soit directement au RNC si le mécanisme Direct Tunnel est utilisé, via un tunnel GTP entre la S-GW et le RNC. Ce mécanisme peut déjà être mis en œuvre en UMTS, entre le GGSN et le RNC, afin de réduire la latence des données et de diminuer la charge du SGSN. Ce tunnel, s'il est utilisé, est maintenu pour la suite de l'appel et jusqu'à sa relâche.

En LTE, la séparation des plans de données et de contrôle dans le réseau cœur implique que les données sont toujours transmises par la S-GW à l'eNodeB et inversement, sans jamais transiter par le MME.

On voit sur la **Figure 4.03** que le tunnel (direct ou indirect) sert toujours à délivrer au RNC les données issues de la P-GW, mais qu'il peut être utilisé également pour transmettre les données envoyées par l'eNodeB à la S-GW dans le cas d'un mode Indirect Forwarding (flèche noire en pointillés longs).

4.4.2 Procédure du handover en mode paquet

Le handover en mode paquet est essentiel pour assurer une véritable continuité de service lors du déploiement d'un réseau LTE. En effet, il s'agit du seul mécanisme de mobilité comprenant une

phase de préparation. Nous décrirons dans cette partie les étapes du handover vertical en mode paquet du LTE vers le système UMTS. Ces étapes sont, comme ceux cités plus haut, les suivantes :

- les mesures ;
- la préparation du handover ;
- l'exécution du handover ;
- l'échec du handover

4.4.2.1 Les mesures

a) *Liste des cellules UMTS voisines*

Remarquons que l'UE n'a pas besoin de recevoir de liste de cellules pour réaliser des mesures sur les cellules voisines LTE, cependant, il n'en est pas de même pour les mesures intersystèmes. En effet, la norme 3GPP prévoit que l'UE reçoit de l'eNodeB une liste complète de cellules voisines UMTS et/ou GSM et qu'il peut effectuer des mesures uniquement sur ces cellules.

La principale raison de cette différence entre les cas intra et intersystèmes est que la détection autonome de cellule, prévue dans les spécifications UMTS, n'a pas ou très peu été utilisée en UMTS et par conséquent n'a été que peu testée voire peu mise en œuvre au sein des terminaux. C'est ainsi que le mode de mesure basé sur une liste de cellules existantes a été conservé.

b) *Activation et remontée des mesures*

La configuration des mesures intersystèmes et des intervalles de mesure éventuels est décidée par l'eNodeB, le plus souvent sur un critère de niveau de signal (RSRP) remonté par l'UE. En effet, lorsque l'UE n'a plus dans son voisinage de cellule LTE suffisamment bonne pour y basculer, le niveau du signal radio reçu par l'UE sur la cellule serveuse peut continuer à se dégrader sans que l'eNodeB puisse déclencher de handover intra-LTE, jusqu'à la rupture du lien. Un seuil absolu de ce niveau RSRP est de ce fait associé à un événement déclenchant la configuration de mesures intersystèmes. [1]

Dans le cas où ces mesures sont périodiques, ce seuil est configuré au sein de l'eNodeB ainsi que les intervalles de mesure. La configuration de ces derniers étant primordiale pour la réalisation des mesures.

La configuration des mesures et des intervalles peut être réalisée dans la même procédure, par l'envoi du message RRC Connection Reconfiguration, qui indique notamment à l'UE l'objet de la

mesure inter-RAT ou plus précisément, dans notre cas, la liste des cellules. Ce message indique également le mode de remontée (sur événement, périodique) et enfin la quantité mesurée sur ces cellules UMTS (soit le RSCP, équivalent du RSRP, soit le rapport signal sur bruit Ec/No du canal pilote).

Pour mieux illustrer ces configurations, prenons un exemple de type de mesure UMTS. Soient deux fréquences porteuses UMTS indiquées comme objet de mesure, portant chacune trois cellules identifiées par leur code d'embrouillage (Scrambling Code en anglais). Par ailleurs, deux configurations de remontée sont fournies à l'UE (périodique et sur événement).

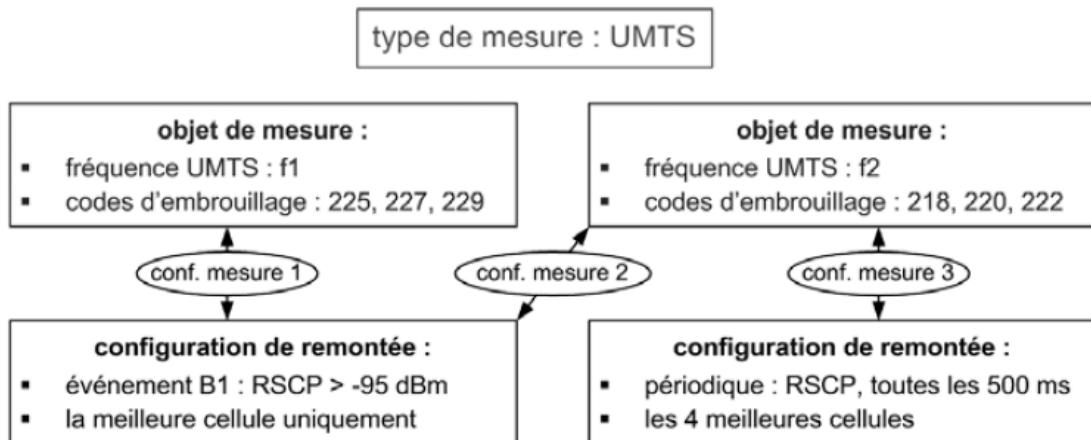


Figure 4.04 : Exemple de configuration de mesure sur la RAT UMTS [1]

On notera cependant que l'eNodeB peut utiliser plusieurs critères pour décider du déclenchement du handover, l'algorithme de décision étant du ressort de l'implémentation de la partie RRM. [1]

4.4.2.2 La préparation du handover

Dans la plupart des cas, un handover est démarré suite à la réception d'un événement spécifique et/ou de mesures remontées par l'UE. Cependant, d'autres facteurs peuvent déclencher un tel mécanisme, par exemple un état de congestion sur la cellule LTE serveuse et ses voisines immédiates.

Cette phase de préparation implique l'UE, l'eNodeB, le RNC cible et le cœur de réseau LTE et UMTS, à la fois pour la gestion du plan de contrôle (signalisation) et pour celle du plan usager (données). À l'issue de cette phase, le RNC et le SGSN sont informés de l'arrivée de l'UE et sont préparés à le recevoir.

Les étapes de cette phase sont décrites ci-après [1] :

Etape a) En premier lieu, l'eNodeB décide de déclencher un handover vers une cellule UMTS. Un plan usager existe dans les sens montant et descendant pour le transfert de données, qui implique l'existence des éléments suivants : radio bearer(s) entre l'UE et l'eNodeB, tunnels GTP entre l'eNodeB, la S-GW et la P-GW.

Etape b) L'eNodeB envoie le message S1-AP Handover Required au MME pour qu'il demande des ressources au RNC cible, au SGSN et à la S-GW cible, si celle-ci change. Ce message indique notamment :

- le type de handover, "LTE-to-UTRAN" ici, permettant au MME de savoir quel protocole suivre pour la formation du message suivant (vers le SGSN dans le cas présent) ;
- la cause de cette procédure, qui indiquera « Handover desirable for radio reasons » dans le cas d'un handover déclenché par les conditions radio ;
- l'identifiant Target ID de la cible, qui contient l'identifiant du RNC, de la zone de localisation (LA) et de la zone de routage (RA), et que le MME transmettra ensuite au SGSN ;
- l'indication si un chemin est disponible pour effectuer du Direct Forwarding vers le RNC ;
- le bloc transparent Source to Target RNC Transparent Container. Ce bloc suit le protocole UMTS RANAP (entre RNC et réseau cœur) et est formaté comme s'il s'agissait d'un handover entre deux RNC, l'eNodeB jouant ainsi le rôle du RNC source, conformément au principe « la source s'adapte à la cible ». En outre, il est transparent pour le réseau cœur, c'est-à-dire qu'il n'est pas interprété par le MME ou le SGSN, mais est inséré par ces nœuds dans les messages ultérieurs pour être transmis tel quel au RNC cible. Il fournit notamment l'identifiant de la cellule cible et un conteneur RRC, destiné à la couche RRC du RNC et qui contient les capacités radio de l'UE pour les deux systèmes (UMTS et LTE). Les capacités LTE sont utiles dans la perspective d'un handover ultérieur vers le LTE; elles seront alors fournies à l'eNodeB par le RNC de façon similaire.

Les éléments de sécurité (clés et algorithmes) seront fournis au RNC par le SGSN, après dérivation des clés UMTS CK et IK par le MME (voir les étapes c et d).

Etape c) Le MME associe à chaque contexte de bearer EPS un contexte PDP (équivalent en UMTS) ainsi que des paramètres de QoS: les paramètres de QoS EPC sont traduits en paramètres de QoS UMTS selon la correspondance définie par [19']. Le MME envoie alors un message Forward Relocation Request au SGSN, contenant notamment l'IMSI de l'abonné, le ou les contexte(s) PDP, l'identifiant Target ID fourni par l'eNodeB, le bloc Source RNC to Target RNC Transparent Container, les clés CK/IK et ses propres coordonnées (adresse et point de terminaison) pour l'échange de signalisation avec le SGSN. Le MME peut déterminer le SGSN cible à partir de la zone de routage du domaine paquet (RA) incluse dans le paramètre Target ID. Le MME informe également le SGSN dans ce message si le Direct Forwarding est utilisé pour le transfert de données. On notera que, si l'UE a un bearer dédié actif, celui-ci sera décliné en UMTS sous la forme d'un contexte PDP secondaire (Secondary PDP Context), équivalent du contexte EPS dédié défini en LTE. Le maintien de ce bearer dédié lors d'une mobilité vers l'UMTS implique donc la prise en charge de la fonctionnalité Secondary PDP Context par le réseau UMTS et par l'UE.

Etape d) Le SGSN détermine si une S-GW différente doit être utilisée (par exemple en cas de changement de PLMN). Nous supposerons ici que la même S-GW est utilisée. On notera que même si la S-GW change, elle reste le point d'ancrage du plan usager pour l'UE. Le SGSN vérifie qu'il peut accueillir le ou les RAB demandé(s) (contrôle d'admission). Le cas échéant, il demande à son tour au RNC cible d'établir les ressources pour les Radio Acces Bearers correspondant aux contextes PDP qui doivent être maintenus en UMTS, par l'envoi du message RANAP Relocation Request. Ce dernier contient notamment les données de sécurité, les paramètres du ou des RAB (un RAB par contexte PDP), le bloc Source RNC to Target RNC Transparent Container et l'identifiant de l'abonné (IMSI). On notera que le SGSN peut réduire la QoS associée à un RAB par rapport à celle indiquée par le MME, en fonction de ses capacités propres et de sa charge. L'envoi des clés de sécurité UMTS au RNC par le SGSN évite d'effectuer une authentification UMTS AKA à l'arrivée de l'UE sur la cellule UMTS et donc accélère la reprise du transfert de données.

Etape e) Le RNC alloue les ressources logiques, radio et réseau pour les RAB et radio bearers qu'il peut établir, à l'issue du contrôle d'admission. Il retourne alors au SGSN dans le message RANAP (Relocation Request Acknowledge) la liste de ces RAB qui peuvent être maintenus. En

outre, il insère dans ce message le bloc Target RNC to Source RNC Transparent Container, destiné à l'eNodeB (qui opère comme le RNC source ici) et qui n'est ensuite modifié ni par le SGSN ni par le MME. Ce bloc contient en fait le message RRC Handover to UTRAN Command, destiné à l'UE, qui précise l'algorithme de chiffrement UMTS choisi, la configuration de la connexion RRC et les paramètres des radio bearers établis par le RNC, dont l'UE a besoin lors de son accès à la cellule UMTS. À partir de ce moment, le RNC doit être prêt à recevoir des paquets de données à destination de l'UE.

Etape f) Le SGSN traite ce message du RNC et transmet au MME le message Forward Relocation Response, qui contient le bloc transparent fourni par le RNC. Si le mode Direct Forwarding n'est pas utilisé, le SGSN indique également dans ce message les coordonnées du tunnel GTP avec la S-GW (adresse IP et point de terminaison GTP): si le mode Direct Tunnel est employé, ces coordonnées correspondent à une terminaison de tunnel sur le RNC, sinon, sur le SGSN.

La **Figure 4.05** résume ce qui a été dit précédemment, les a,b,c,d,e,f correspondant aux différentes étapes citées au-dessus.

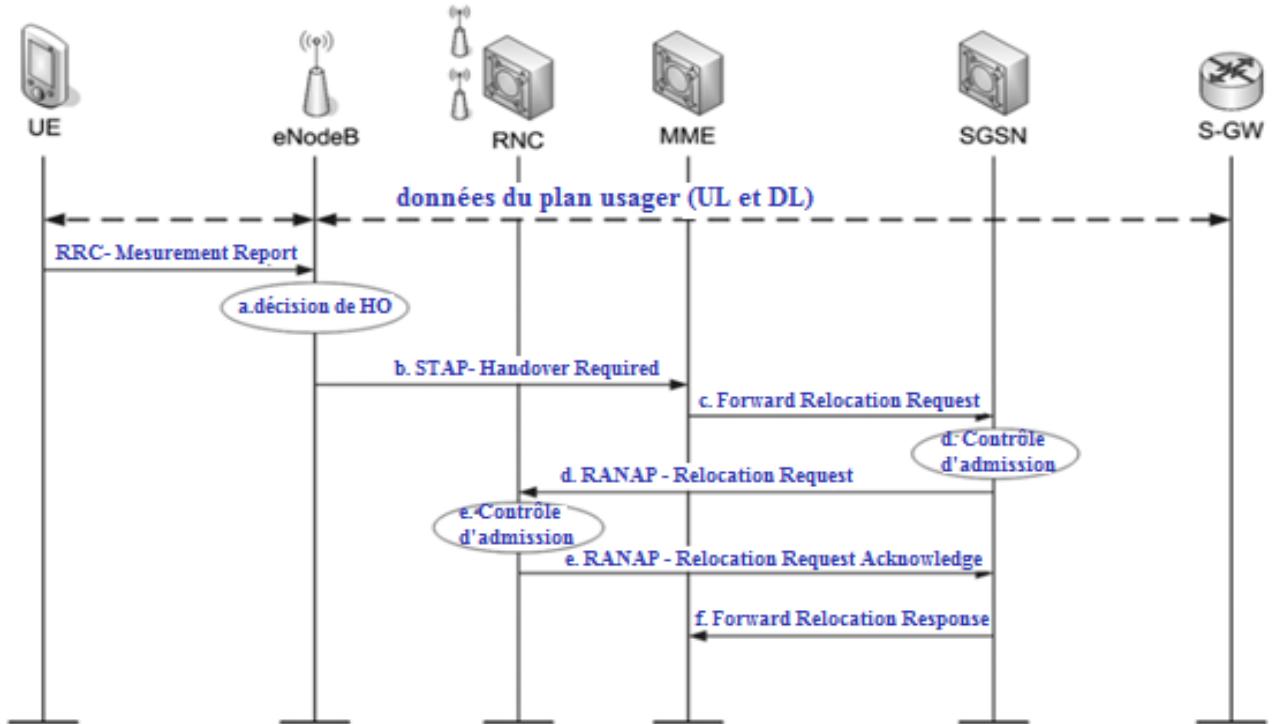


Figure 4.05 : Cinématique de la phase de préparation du handover LTE vers UMTS [1]

4.4.2.3 L'exécution du handover

À cette étape de la procédure, l'eNodeB continue de recevoir des unités de données sur le plan usager, de la part de la S-GW (sens descendant) et de la part de l'UE (sens montant). Le transfert de données vers le RNC n'a pas commencé et l'eNodeB n'a pas encore commandé à l'UE de basculer sur la cellule cible: il attend pour cela la réponse du RNC cible, qui est transmise par le MME. Celle-ci indiquera à l'eNodeB si le handover est possible et déclenchera l'envoi par l'eNodeB à l'UE de la commande de bascule. Dès qu'il aura donné cet ordre à l'UE, l'eNodeB pourra démarrer le transfert vers le RNC des données reçues de la S-GW et non transmises à l'UE, suivant le schéma de transfert permis par le réseau. Les données de l'UE reçues par l'eNodeB seront quant à elles toujours transmises à la S-GW.

L'accès de l'UE à la cellule cible déclenchera d'abord le basculement effectif du plan de données sur le réseau UMTS (la S-GW envoie alors les données au SGSN, ou directement au RNC), ainsi que la relâche des ressources et de la session dans le réseau LTE (eNodeB, MME, S-GW). Le handover s'achève lorsque l'eNodeB a transféré toutes les données qu'il a en mémoire.

Dans cette phase d'exécution, l'étape la plus critique est la bascule radio de l'UE, du fait du risque d'échec et de l'effet de sa durée sur la qualité de l'expérience utilisateur. D'une part, il est possible que l'UE ne reçoive pas le message de commande, du fait d'une dégradation (ou d'une rupture) du lien radio sur la cellule LTE. Si le lien continue de se dégrader, l'appel en cours est interrompu.

D'autre part, la réception par l'UE de la cellule UMTS a pu elle aussi évoluer, rendant plus difficile l'accès de l'UE aux ressources de la cellule. Ces deux phénomènes peuvent simplement être provoqués par le déplacement de l'utilisateur (par exemple le passage d'un angle de rue), ou par l'évolution de son environnement (cas d'obstacles mobiles). Par ailleurs, le service en cours est interrompu pendant une durée au moins égale à celle de cette bascule, d'où l'importance de sa durée. Selon le service utilisé, l'effet sur l'expérience de l'utilisateur sera plus ou moins important: il peut être imperceptible entre deux messages de chat par exemple. Le transfert des données de l'eNodeB au RNC pendant cette période vise à réduire l'interruption du service, en permettant au RNC d'envoyer des données à l'UE dès son accès sur la cellule UMTS.

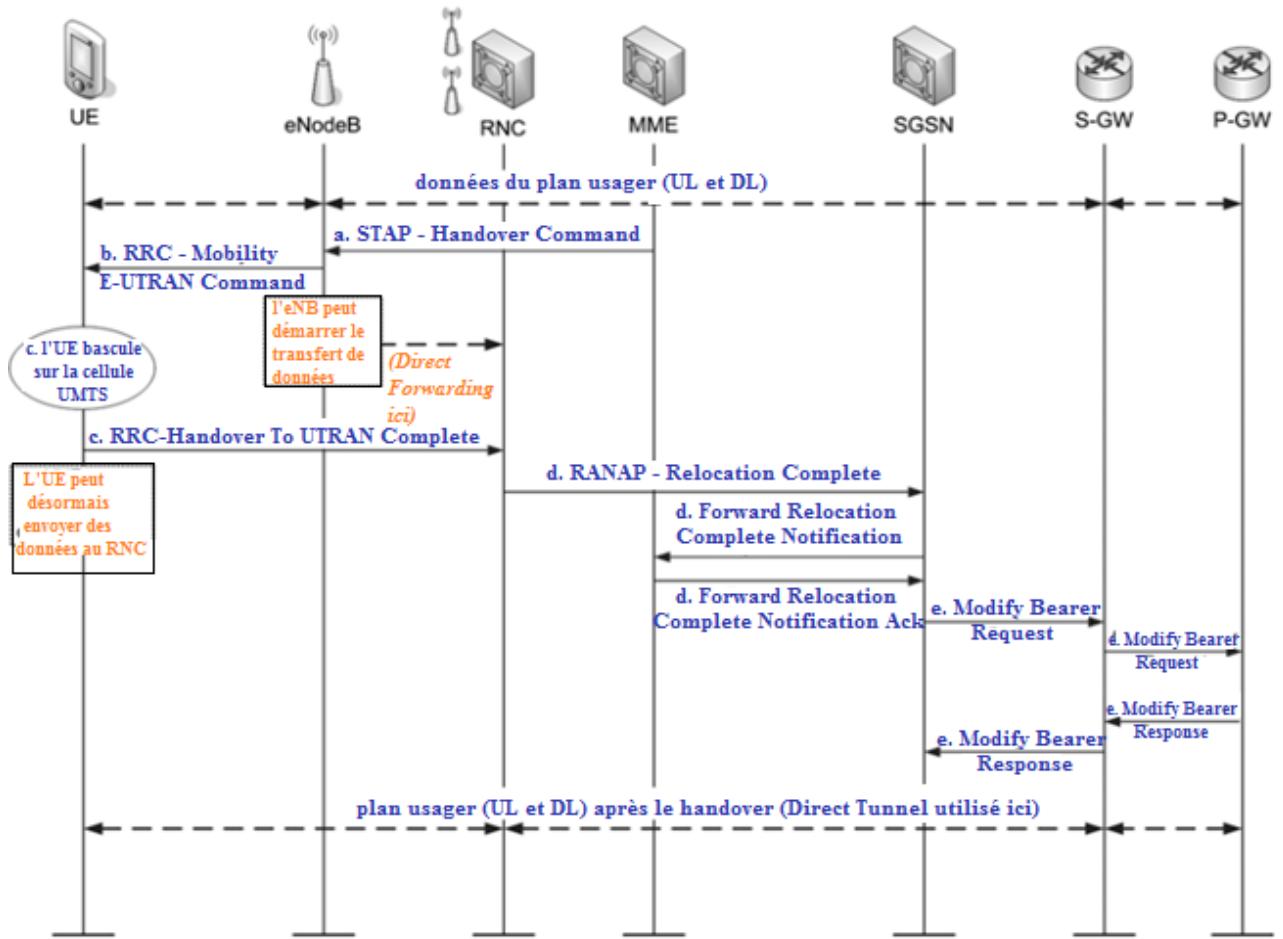


Figure 4.06 : Cinématique de la phase d'execution du handover LTE vers UMTS [1]

Les étapes suivies durant cette phase sont les suivantes :

Etape a) Le MME envoie à l'eNodeB le message S1-AP Handover Command, qui contient essentiellement le message RRC envoyé par le RNC (Handover to UTRAN)

Etape b) Sur réception de ce message, l'eNodeB envoie à l'UE le message RRC Mobility from E-UTRAN Command, dans lequel il insère le message RRC du RNC et indique à l'UE la cellule UMTS cible. L'eNodeB peut dès lors démarrer le transfert des données au RNC. Nous supposons ici que le Direct Forwarding est utilisé. On notera que, à la différence du handover intra-LTE, la couche PDCP est ici réinitialisée et, par conséquent, les numéros de séquence éventuellement attribués par l'eNodeB aux unités de données PDCP ne sont pas conservés. Ceci implique que le RNC et l'UE ne peuvent envoyer l'un à l'autre de rapport de réception PDCP. En outre, la couche

PDCP délivre à la couche supérieure, dès la commande de bascule, les SDU PDCP reçues sur la cellule LTE, même si la remise en séquence ne peut être assurée (SDU intermédiaire non reçue).

Pour le sens descendant, l'eNodeB peut transmettre au RNC les SDU PDCP qu'il n'a pas encore envoyé à l'UE, ou que ce dernier n'a pas acquitté (pour le mode RLC-AM uniquement), afin de limiter les pertes de données lors du handover. Ainsi, ces unités de données seront retransmises à l'UE par le RNC. Du fait de l'absence de rapport de réception PDCP, il est possible en mode RLC-AM que l'UE reçoive et délivre deux fois le même paquet à la couche IP (une fois sur la cellule LTE et une autre fois sur la cellule UMTS). On peut donc avoir des doublons dans le sens descendant, mais les pertes de données peuvent être évitées grâce au transfert des données de l'eNodeB au RNC.

Pour le sens montant, l'UE considère les unités de données PDCP déjà transmises comme reçues par l'eNodeB. Cela constitue donc une différence avec le comportement de l'eNodeB, qui peut transférer au RNC les données non acquittées. De ce fait, des pertes de données peuvent survenir dans le sens montant. Il sera du ressort des couches supérieures de les corriger si besoin. En revanche, ce comportement évite des doublons dans le sens montant.

Etape c) L'UE suspend le transfert de données sur la cellule LTE et bascule sur la cellule indiquée, sans acquitter la réception des unités RLC à l'eNodeB. L'UE recherche la cellule UMTS, récupère les Informations Système diffusées par la cellule et nécessaires à son accès, puis transmet au RNC le message RRC Handover To UTRAN Complete sur les ressources de la cellule qui lui ont été allouées. Ce message signale au RNC que l'UE a réussi à accéder à ces ressources et que le plan usager dans le réseau peut être à son tour basculé vers la cellule UMTS, afin de délivrer à l'UE les nouvelles données reçues par la S-GW. Le RNC peut alors commencer à envoyer des données à l'UE, même si le transfert des données par l'eNodeB n'est pas terminé. De même, l'UE peut à son tour transmettre des données sur le ou les radio bearer(s) établi(s), en commençant par le premier paquet IP qui n'a pas encore été transmis.

Etape d) Le RNC informe alors le SGSN de l'arrivée de l'UE par le message RANAP Relocation Complete. À partir de ce moment, le SGSN doit accepter les données envoyées par le RNC pour cet UE (sens montant) et les transmettre immédiatement à la S-GW. Le SGSN informe le MME du succès de la procédure, ce qui conduira à la relâche des ressources associées à l'UE dans le MME et l'eNodeB.

Etape e) Le SGSN contacte ensuite la S-GW pour lui demander de basculer le flux de données : celles-ci ne doivent plus être envoyées à l'eNodeB mais au RNC si le mécanisme Direct Tunnel est utilisé, au SGSN sinon. Dans le cas d'un tunnel direct, le SGSN indique l'adresse IP et le point de terminaison sur le RNC pour chaque bearer maintenu. Sur réception de ce message, la S-GW met à jour sa table de routage et oriente les données destinées à l'UE vers le RNC. La S-GW peut informer la P-GW du changement de RAT, en envoyant le message Modify Bearer Request.

Après l'étape e, le plan usager est basculé et implique l'UE, l'UTRAN, la S-GW, la P-GW et éventuellement le SGSN si un tunnel direct n'est pas employé.

4.5 Le handover UMTS vers LTE

Le handover UMTS vers LTE peut être réalisé pour les appels sur le domaine PS de l'UMTS, pour que l'utilisateur bénéficie d'un débit supérieur et d'une latence réduite en LTE. Les appels voix établis sur le domaine circuit (CS) ne peuvent être basculés sur le système LTE, d'abord parce qu'il n'existe pas de tel domaine en LTE/EPC et ensuite parce que la procédure de transfert d'appel CS vers VoIP n'est pas définie en Release 8.

Cela étant, si le réseau LTE/EPC ne permet pas de réaliser des appels VoIP, par choix de l'opérateur cette fois (pas d'infrastructure IMS déployée par exemple), les appels VoIP établis en UMTS ne devront pas non plus être envoyés sur le système LTE. On comprend qu'il est important que le système UMTS sache s'il peut basculer ou non un RAB vers le système LTE. C'est le rôle de l'indicateur E-UTRAN Service Handover, grâce auquel le réseau cœur indique au RNC que le RAB ne doit pas être basculé. Ce paramètre est par exemple signalé lors de l'établissement d'un RAB CS pour un appel voix, que l'opérateur souhaite maintenir en UMTS.

4.5.1 Procédure du handover

Le handover peut être utilisé lorsque l'UE est dans l'état Cell_DCH (un des états RRC du mode connecté en UMTS). Dans les états Cell_PCH et URA_PCH, l'UE utilise la resélection de cellule, comme en mode veille. Dans l'état Cell_FACH, l'UTRAN doit faire passer l'UE à l'état Cell_DCH avant d'effectuer le handover. Ces états UMTS sont définis dans [23].

4.5.1.1 Les mesures LTE

Comme pour les mesures en mode veille, les cellules voisines LTE ne sont pas indiquées individuellement à l'UE lorsque le RNC lui demande de remonter des mesures de cellules LTE.

Seule la fréquence est fournie à l'UE, qui se débrouille ensuite pour détecter les cellules présentes sur cette fréquence dans l'environnement de la cellule UMTS. Ce fonctionnement est donc identique au cas des mesures effectuées en LTE sur des cellules voisines LTE.

Les UE LTE auront probablement besoin du mode compressé pour effectuer des mesures sur des cellules LTE alors qu'ils sont connectés à l'UMTS. Cette adaptation de la trame radio est déjà utilisée aujourd'hui par la grande majorité des UE UMTS pour réaliser les mesures GSM ou UMTS interfréquences en appel. Il s'agit donc surtout pour le RNC de s'assurer que la durée et la fréquence des intervalles sont suffisantes à l'UE pour détecter des cellules LTE et les mesurer.

On peut s'attendre à ce que ces mesures LTE soient demandées à l'UE dès qu'il a une connexion RRC active sur une cellule UMTS en zone de couverture LTE. Le RNC peut en effet prendre comme critères pour faire cette demande la déclaration comme voisines d'une ou plusieurs fréquences LTE d'une part, et une priorité supérieure associée à la RAT LTE d'autre part. Ainsi, l'UTRAN peut activer ces mesures dès l'établissement de la connexion RRC ou d'un radio bearer de données, afin de basculer l'UE sur la RAT LTE dès que le signal radio d'une cellule est suffisant.

4.5.1.2 La préparation

Pour la préparation du handover, le RNC contacte le SGSN en lui indiquant l'identifiant de l'eNodeB cible, ce qui lui permet de relayer la demande de handover au MME gérant cet eNodeB. Pour rappel, le MME et le SGSN peuvent être un seul et même nœud physique. Ce message du RNC contient notamment un conteneur destiné à l'eNodeB cible (Source eNodeB to Target eNodeB Transparent Container). Comme les autres conteneurs, il est transmis de façon transparente par les équipements du réseau cœur (SGSN et MME ici) et indique en particulier à l'eNodeB la cellule cible ainsi que les capacités radio de l'UE pour le LTE. Celles-ci servent par exemple à l'eNodeB pour adapter la configuration des mesures ou le scheduling des envois de données. Le MME sollicite ensuite l'eNodeB cible, qui retourne alors un message S1AP incluant le conteneur Target eNodeB to Source eNodeB Transparent Container, lequel contient en fait le message RRC destiné à l'UE pour la bascule vers la cellule cible. Ce message lui indique la configuration radio à appliquer lors de son accès à la cellule LTE, ainsi que les paramètres de sécurité LTE nécessaires pour la dérivation des nouvelles clés. Le RNC, recevant ce message RRC dans la réponse du SGSN, ne l'interprète pas; il n'en est d'ailleurs pas capable a priori,

s'agissant du protocole RRC LTE. Il l'intègre à la commande de bascule qu'il envoie à l'UE (message RRC Handover From UTRAN Command).

4.5.1.3 L'exécution du handover

Le RNC est autorisé à démarrer le transfert à l'eNodeB des données reçues du SGSN dès qu'il a envoyé l'ordre de bascule à l'UE. Comme pour le sens LTE vers UMTS, les données peuvent être transférées directement de la station de base source (RNC) à l'eNodeB cible sans transiter par le SGSN et la Serving-GW, à l'aide du mécanisme Direct Forwarding. En cas de transfert indirect, les données transitent nécessairement par la S-GW et éventuellement par le SGSN, si le mécanisme Direct Tunnel n'est pas non plus utilisé. Comme nous l'avons évoqué plus haut, il est possible que des RAB actifs de l'UE ne puissent pas être basculés en LTE. Si l'UE a un appel voix CS et une session de données en cours, le handover ne pourra être déclenché, l'appel voix CS ne pouvant être basculé en LTE. Le RNC indique à l'UE dans la commande de handover le ou les RAB maintenu(s). L'UE doit alors désactiver localement les autres RAB. Le MME peut également refuser un ou plusieurs RAB, en cas de congestion par exemple sur l'eNodeB ou sur le réseau cœur.

4.6 Critères du handover

La principale raison d'exécution d'un handover est le fait que l'interface radio ne répond plus aux critères définis pour le terminal et/ou le réseau. Les critères d'exécution du handover dépendent principalement de la stratégie implantée dans le système :

- Qualité du Signal
- Niveau de trafic
- Mobilité usager

La cause du handover peut alors être le déplacement du mobile et/ou des éléments environnants ou la dégradation du lien courant. Le handover permet donc le déplacement de l'utilisateur tout en restant connecté, l'équilibrage du trafic entre cellules, le maintien d'une qualité acceptable, l'optimisation de l'utilisation de ressources radio, mais il permet également d'éviter la rupture du lien pour causes radio.

Comme nous l'avons vu dans le **paragraphe 4.3.2**, l'UE effectue les mesures de puissances dans son environnement. Les puissances reçues par l'UE sont en fonction de son environnement ainsi que de la puissance d'émission de l'antenne de la cellule sur laquelle la mesure est faite.

4.6.1 Puissance reçue

Le signal reçu à la station mobile provenant de l'antenne d'émission enodeB pour le LTE (respectivement nodeB pour l'UMTS) est définie par :

$$\mathbf{Pr}_{MS} = Pe_{eNB} - Lc_{eNB} - Lf_{eNB} + Ga_{eNB} - L_p + G_{MS} - Lf_{MS} \quad (4.01)$$

Avec

Pr_{MS} : Puissance reçue à la MS [dBm]

Pe_{eNB} : Puissance émise à l'enodeB [dBm]

Lc_{eNB} : Perte du coupleur à l'enodeB [dB]

Lf_{eNB} : Perte de câble d'alimentation à l'enodeB [dB]

Ga_{eNB} : Gain de l'antenne enodeB [dBi]

L_p : Perte de propagation entre la MS et l'enodeB [dBm]

G_{MS} : Gain de l'antenne de la MS [dBi]

Lf_{MS} : Perte de câble d'alimentation à la MS [dB]

Le signal reçu à l'antenne à l'enodeB(respectivement au nodeB) est dans ce cas :

$$\mathbf{Pr}_{eNB} = Pe_{MS} - Lf_{eNB} + Ga_{eNB} - L_p + G_{MS} - Lf_{MS} \quad (4.02)$$

Avec

Pr_{eNB} : Puissance reçue à l'enodeB [dBm]

Pe_{MS} : Puissance émise à la MS [dBm]

Les cellules UMTS sur lesquelles doivent être effectuées les mesures sont communiquées à l'UE comme décrit dans le **paragraphe 4.4.2**, et si le niveau de seuil de puissance est atteint alors le handover est déclenché. Les critères de déclenchement sont donc :

- La puissance relative des signaux
- La puissance relative des signaux avec utilisation d'un seuil
- La puissance relative des signaux avec utilisation d'un hystérésis
- La puissance relative des signaux avec hystérésis et seuil

4.6.2 Le délai

Le temps d'interruption de service lors d'une procédure de handover entre le système LTE et les systèmes GSM ou UMTS doit rester inférieur à 300 ms pour les services temps-réel et inférieur à

500 ms pour les autres services. Au delà de ce délai le handover subit un échec et l'UE effectue une deuxième demande de handover vers la cellule cible. [1]

4.6.3 Echec du handover

4.6.3.1 Handover LTE vers UMTS

Si l'UE ne parvient pas à établir la connexion RRC sur la cellule UMTS, il doit revenir sur la cellule LTE et appliquer la configuration utilisée avant l'ordre de handover, à l'exception de la configuration des couches PHY et MAC, et entamer une procédure de rétablissement RRC.

Le délai d'accès à la cellule UMTS que s'autorise l'UE peut varier d'une implémentation à l'autre. Lorsque l'eNodeB détecte le retour de l'UE, il annule la procédure de handover en cours dans le réseau par l'envoi au MME du message S1-AP Handover Cancel. [1]

4.6.3.2 Handover UMTS vers LTE

Si l'UE ne parvient pas à accéder aux ressources de la cellule LTE, il doit revenir à la cellule UMTS et à la configuration précédemment utilisée, puis envoyer un message RRC au RNC afin de l'informer de cet échec. On précisera cependant que la norme n'indique pas de critère temporel et l'UE ne déclenche pas de temporisation à la réception de l'ordre de bascule. Le délai au bout duquel l'UE revient sur la cellule UMTS est lié en fait au mécanisme d'accès aléatoire du LTE, l'UE effectuant plusieurs tentatives sur la cellule LTE. [1]

4.7 Conclusion

Nous avons pu voir dans ce chapitre quelles sont les étapes d'un handover en générale, la phase de mesure, de préparation et d'exécution. De là, nous avons décrit les procédures du handover LTE vers UMTS, faisant basculer le plan usager du P-GW S-GW eNodeB UE vers P-GW S-GW SGSN RNC et UE. De même, le plan de contrôle entre l'UE et le réseau évolue de LTE : MME eNodeB UE vers l'UMTS : SGSN RNC UE et inversement pour le handover UMTS vers LTE. Les critères de déclenchement ont également été étudiés en particulier la puissance reçue par l'UE. Le prochain chapitre sera réservé pour la simulation.

CHAPITRE 5

SIMULATION SOUS MATLAB

5.1 Introduction

La simulation en question va montrer le fonctionnement du handover vertical entre le LTE et l'UMTS. Un UE en mouvement sera donc représenté et les puissances de signal qu'il reçoit de chaque cellule calculées. A partir de cela, le handover sera déclenché en fonction du niveau de signal reçu par l'UE qui variera dans le milieu où ce dernier sera. Nous verrons par la suite les puissances de bruits dans chaque cellule en fonction du milieu, les puissances reçues dans chaque cellule ainsi que le débit et le délai du handover.

5.2 Choix du logiciel : MATLAB

MATLAB, acronyme de « MATrix LABoratory » est un logiciel développé par Mathworks. C'est un environnement puissant, complet et facile à utiliser, destiné au calcul scientifique. Il apporte ainsi aux ingénieurs, chercheurs et à tout scientifique un système interactif intégrant calcul numérique et visualisation. C'est un environnement performant, ouvert et programmable qui permet de remarquables gains de productivité et de créativité.

MATLAB est un environnement complet, ouvert et extensible pour le calcul et la visualisation. Il dispose de plusieurs centaines (voire milliers, selon les versions et les modules optionnels autour du noyau Matlab) de fonctions mathématiques, scientifiques et techniques. L'approche matricielle de MATLAB permet de traiter les données sans aucune limitation de taille et de réaliser des calculs numériques et symboliques de façon fiable et rapide. Grâce aux fonctions graphiques de MATLAB, il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon nos souhaits.

L'approche ouverte de MATLAB permet de construire un outil sur mesure. Nous pouvons inspecter le code source et les algorithmes des bibliothèques de fonctions (Toolboxes), modifier des fonctions existantes et ajouter d'autres.

MATLAB peut résoudre des catégories spécifiques de problèmes. Les domaines couverts sont très variés et comprennent notamment le traitement du signal, l'automatique, l'identification de systèmes, les réseaux de neurones, la logique floue, le calcul de structure, les statistiques, etc.

Notre choix s'est naturellement fait sur ce logiciel de la version 2012 pour mener à bien notre simulation.

5.3 Présentation de la simulation

Une fois le logiciel MATLAB lancé, il suffit d'ouvrir le fichier « main.m », puis de lancer le programme, ce qui devra faire apparaître la fenêtre d'accueil (cf. figure 5.01).



Figure 5.01 : Fenêtre d'accueil du programme

Arrivé à la fenêtre d'accueil, il nous suffit de cliquer sur le bouton « Lancer » pour lancer notre simulation ou « Quitter » pour interrompre notre simulation.

5.3.1 Paramétrage de la simulation

En cliquant sur le bouton « Lancer » de la fenêtre principale, nous basculons vers la fenêtre de la **Figure 5.02**.

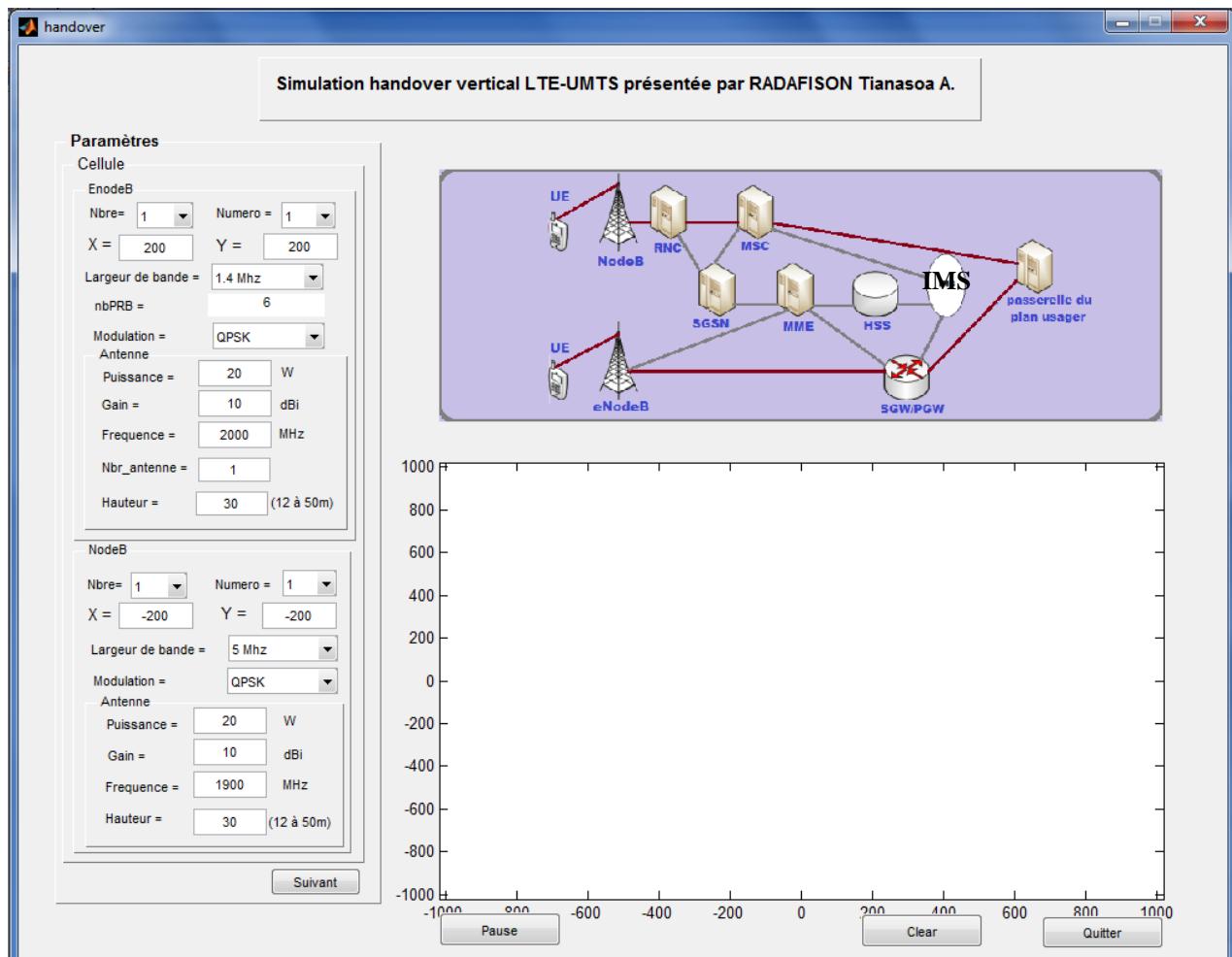


Figure 5.02 : Fenêtre de paramétrage de la simulation

Nous remarquons en haut, à droite dans la fenêtre, l'architecture LTE interopérable avec celle de l'UMTS. La liaison se faisant au niveau du MME du côté LTE et du SGSN du côté UMTS.

Cette fenêtre nous permet de paramétriser tout d'abord notre simulation avant de la lancer. Les premiers paramètres se font donc au niveau de chaque cellule, LTE et UMTS.

5.3.1.1 Cellule LTE

La simulation permet de positionner jusqu'à deux (02) enodeB à l'aide du champ « **Nbre** » et le choix de la cellule à paramétriser se fait au moyen du champ « **Numero** ».

Pour chaque cellule LTE, il nous faut paramétrer tout d'abord le système LTE proprement dit :

- **la position de l'enodeB** : il est important de savoir que pour l'échelle de notre simulation nous avons choisi une (01) unité sur la simulation pour 10m sur le terrain réel. Nous configurons la position selon l'axe x et selon l'axe y.
- **la largeur de bande** : la largeur de bande de du système LTE est choisi entre {1.4, 3, 5, 10, 15, 20} MHz ;
- **le choix de la modulation** : la technologie LTE utilise trois types de modulations qui sont le QPSK, le 16-QAM et le 64-QAM modulant respectivement 2bits par symbole, 4bits par symbole et 6bits par symbole ;
- **le nombre de PRB** : le nombre de PRB est en fonction de la bande passante choisie. En effet, leur relation est définie dans le **Tableau 3.02**.

Ensuite, le paramétrage se fait au niveau de l'antenne utilisé dans la cellule, citons :

- **la puissance de l'antenne** : ou encore la puissance d'émission de l'antenne qui sera exprimée en Watt ;
- **le gain de l'antenne** : exprimé en dBi
- **la fréquence de l'antenne** : exprimée en MHz
- **le nombre d'antenne** : ici l'on définit le nombre d'antenne à l'émission du système MIMO employé par notre cellule LTE
- **et la hauteur de l'antenne** : pour une meilleure couverture elle est placée entre 12 et 50m de hauteur.

5.3.1.2 Cellule UMTS

De même que pour les cellules LTE, nous pouvons avoir jusqu'à deux (02) cellules UMTS pour notre simulation.

La configuration de chaque cellule UMTS est presque identique à celle des cellules LTE. Comme précédemment, on configure tout d'abord la cellule proprement dite :

- **la position du NodeB** : idem à celle de l'enodeB ;
- **la largeur de bande** : en UMTS, la largeur de bande est toujours égale à 5MHz ;
- **et le type de modulation** : le choix se fait entre la modulation BPSK pour 1bit par symbole et la modulation QPSK pour 2bits par symbole.

Toujours comme précédemment, nous configurons par la suite l'antenne du NodeB :

- **la puissance de l'antenne** : exprimée en Watt ;
- **le gain de l'antenne** : exprimé en dBi
- **la fréquence de l'antenne** : exprimée en MHz,
- **le nombre d'antenne** : ici l'on définit le nombre d'antenne à l'émission du système MIMO employé par notre cellule LTE
- **et la hauteur de l'antenne** : placée entre 12 et 50m de hauteur.

5.3.1.3 Equipement utilisateur et autre

Après le paramétrage des cellules, nous pouvons appuyer sur le bouton « Suivant » et nous aurons la fenêtre de la **Figure 5.03** :

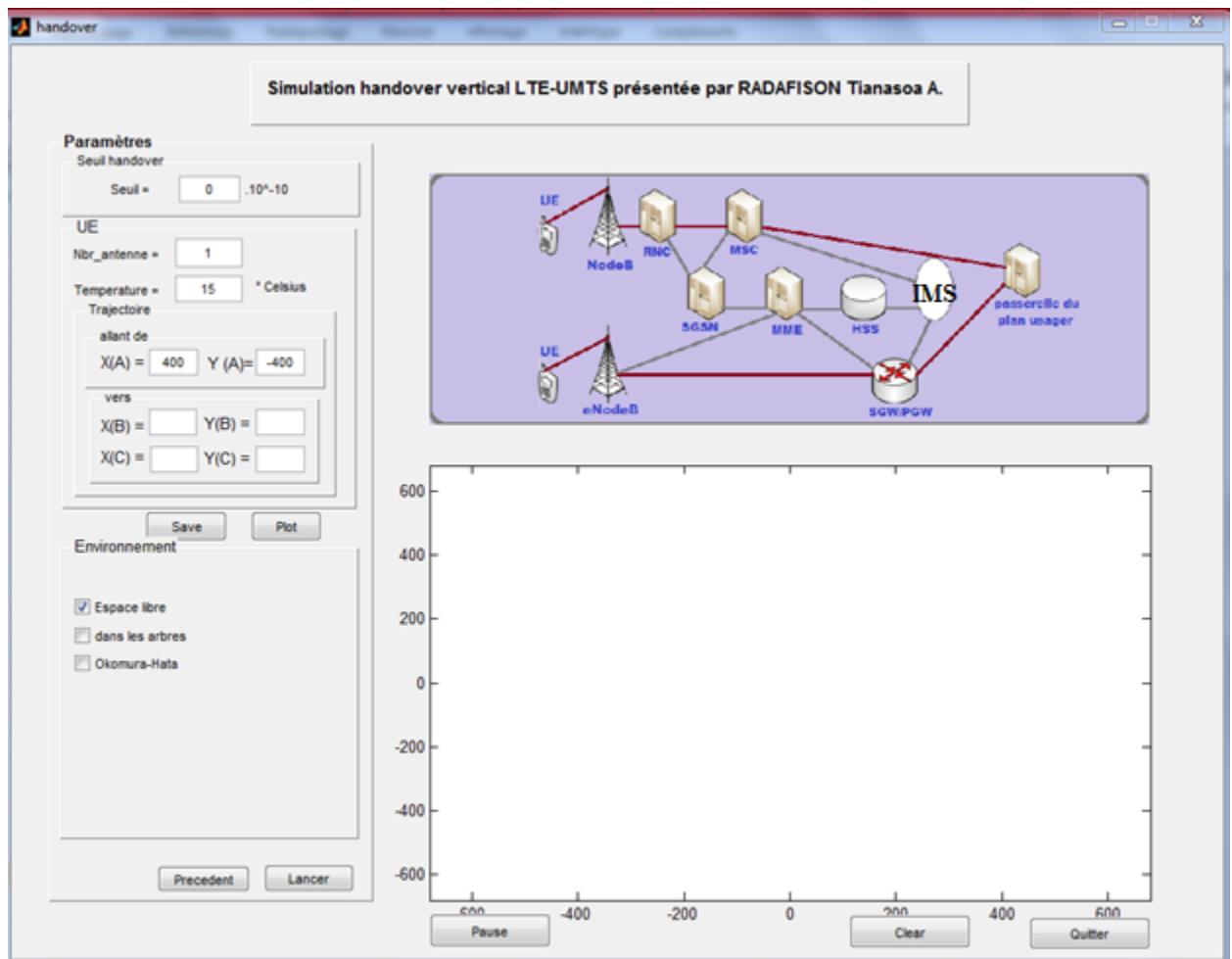


Figure 5.03 : Fenêtre de paramétrage 02 de la simulation

Cette fenêtre nous permettra de paramétriser le seuil du handover, les paramètres de l'utilisateur ainsi que l'environnement où se trouvent les cellules.

Le paramétrage du **seuil** est important pour assurer la qualité de service du handover. En effet, un seuil élevé permet à l'utilisateur de rester connecté à l'enodeB plus longtemps étant donné que ce dernier offre un débit élevé que la cellule UMTS.

Pour le paramétrage de l'équipement de l'utilisateur on cite :

- **le nombre d'antenne** : en effet, comme nous avons vu dans le **chapitre 1**, les équipements des utilisateurs en LTE peuvent avoir jusqu'à 4 antennes d'émission pour la catégorie 5. (**cf Tableau 1.01, page 19**)
- **la température** : cette température permet de déterminer le bruit thermique. En effet la formule de ce dernier étant définie par [9]:

$$N_0 = 10 \log 10(kT) \quad (5.01)$$

Avec N_0 : Puissance du bruit [dBm/Hz]

k : Constante de Boltzmann, $k = 1.38 \times 10^{-23} J / ^\circ K$

T : Température de l'UE [$^\circ K$]

- **la trajectoire de l'UE** : en précisant son point de départ et son point d'arrivée, par les coordonnées x et y.

5.3.1.4 L'environnement

La simulation permet de définir dans quel environnement baigne la cellule précisée. Nous avons le choix entre :

- **la propagation en espace libre** : elle est définie par la **Formule (2.01)**, page 20 ;
- **un milieu rempli d'arbres** : une forêt en l'occurrence. L'atténuation dans les arbres étant définie par la formule [9] [11]:

$$L = 0.45F^{0.284}df \quad (5.02)$$

Avec L : atténuation [dB]

F : Fréquence [Ghz]

df : Epaisseur moyenne des arbres [m]

- **ou les modèles d'Okumura Hata** : en cochant cette case, le modèle se précise et le choix se fait entre un milieu urbain (petite ou moyenne ville), un milieu urbain (grande ville), un milieu suburbain (petite ou moyenne ville), un milieu suburbain (grande ville), une zone ouverte (petite et moyenne ville), et enfin, une zone ouverte (grande ville). Les différentes formules de ces propagations sont définies dans l'**annexe 3** (Tableau A3.01).

Après tous ces différents paramétrages, il est recommandé de sélectionner le bouton « *Plot* » pour placer l'enodeB, le nodeB, ainsi que l'utilisateur avec son point de départ A et son point d'arrivée B. Cela permet de rectifier les emplacements en cas d'insatisfaction avant le lancement de la simulation. Si les paramètres conviennent, le bouton « *Save* » permet d'enregistrer les paramètres de positionnement pour une utilisation ultérieure.

5.3.2 Déroulement de la simulation

Le bouton « *Lancer* » permet de lancer la simulation. Au cas où un champ n'a pas été rempli, une fenêtre d'erreur apparait invitant à remplir tous les champs avant de continuer :

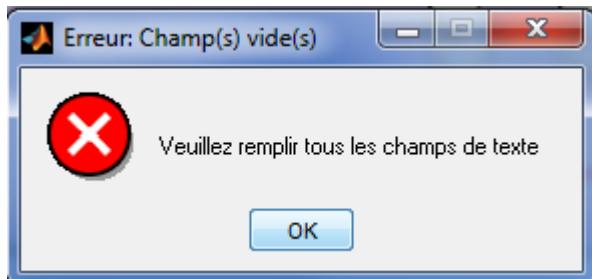


Figure 5.04 : Fenêtre d'erreur pour un ou plusieurs champs non remplis

Egalement, dans le cas où aucune atténuation n'a été sélectionnée, une fenêtre d'erreur apparait pour rappeler d'effectuer ce choix.

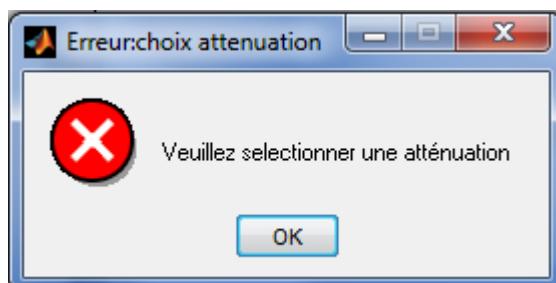


Figure 5.05 : Fenêtre d'erreur pour l'atténuation non sélectionnée

Pour le déroulement de la simulation, nous avons fait le choix de paramètres pour une meilleure illustration.

5.3.2.1 Paramètres 01

Nous prendrons deux cellules LTE et une cellule UMTS.

Pour le choix des paramètres 01, nous utiliserons la largeur de bande minimale, et donc un nombre de PRB égale à six (06), pour la première cellule LTE 1 et une largeur de bande de 15Mhz, soit 75PRB pour la seconde cellule LTE 2.

a) *Paramètres*

Ces paramètres sont les suivants :

Pour la cellule LTE 1 :

- **la position de l'enodeB 1** : suivant x on prendra 200 et -400 suivant y ;
- **la largeur de bande** : 1.4MHz ;
- **le choix de la modulation** : QPSK donc 2bits par symbole;
- **le nombre de PRB** : 06 PRB
- **la puissance de l'antenne** : 30 Watts qui équivaut à 43dbm ;
- **le gain de l'antenne** : 10 dBi
- **la fréquence de l'antenne** : 2000MHz
- **le nombre d'antenne** : 1 antenne
- **et la hauteur de l'antenne** : en générale elle est de 30m.

Pour la cellule LTE 2 :

- **la position de l'enodeB 2** : suivant x on prendra 600 et 500 suivant y ;
- **la largeur de bande** : 15MHz ;
- **le choix de la modulation** : QPSK donc 2bits par symbole;
- **le nombre de PRB** : 75 PRB
- **la puissance de l'antenne** : 20 Watts qui équivaut à 43dbm ;
- **le gain de l'antenne** : 10 dBi
- **la fréquence de l'antenne** : 2010MHz
- **le nombre d'antenne** : 2 antennes
- **et la hauteur de l'antenne** : en générale elle est de 30m.

Pour la cellule UMTS :

- **la position du NodeB :** (-100,300)
- **et le type de modulation :** nous faisons le choix du BPSK qui signifie 1bit par symbole ;
- **la puissance de l'antenne :** comme précédemment 20Watts ;
- **le gain de l'antenne :** 10dbi
- **la fréquence de l'antenne :** 1900 MHz,
- **et la hauteur de l'antenne :** toujours de 30m.

Pour l'équipement utilisateur :

- **le nombre d'antenne :** Nous prendrons 1 antenne pour le côté utilisateur
- **la température :** la température générale d'un UE est de 15°C soit 288,4°K. En effet, l'échelle de température Celsius est, par définition, la température absolue qui correspond à 0°K, décalée en origine de 273,15°K :

$$K = ^\circ C + 273,15 \quad (5.03)$$

- **la trajectoire de l'UE :** Il partira du point A(400,-400) , passera au point B(-200,400) et s'arrêtera au point C(800 ,600)

Nous utiliserons l'atténuation en espace libre et le seuil sera de 10^{-10} .

La simulation terminée, nous obtenons la **Figure 5.06** :

Les handovers ont été effectué et les puissances finales sont :

- venant de l'enodeB_1 : 2.63288×10^{-10} Watts
- venant de l'enodeB_2 : 7.09035×10^{-09} Watts
- venant du NodeB_1 : 4.40839×10^{-10} Watts

En effet, l'UE continu de mesurer les puissances venant de l'enodeB_1 et de l'enodeB_2 même après handover vers la cellule UMTS car ces dernières font toujours parti des cellules à mesurer.

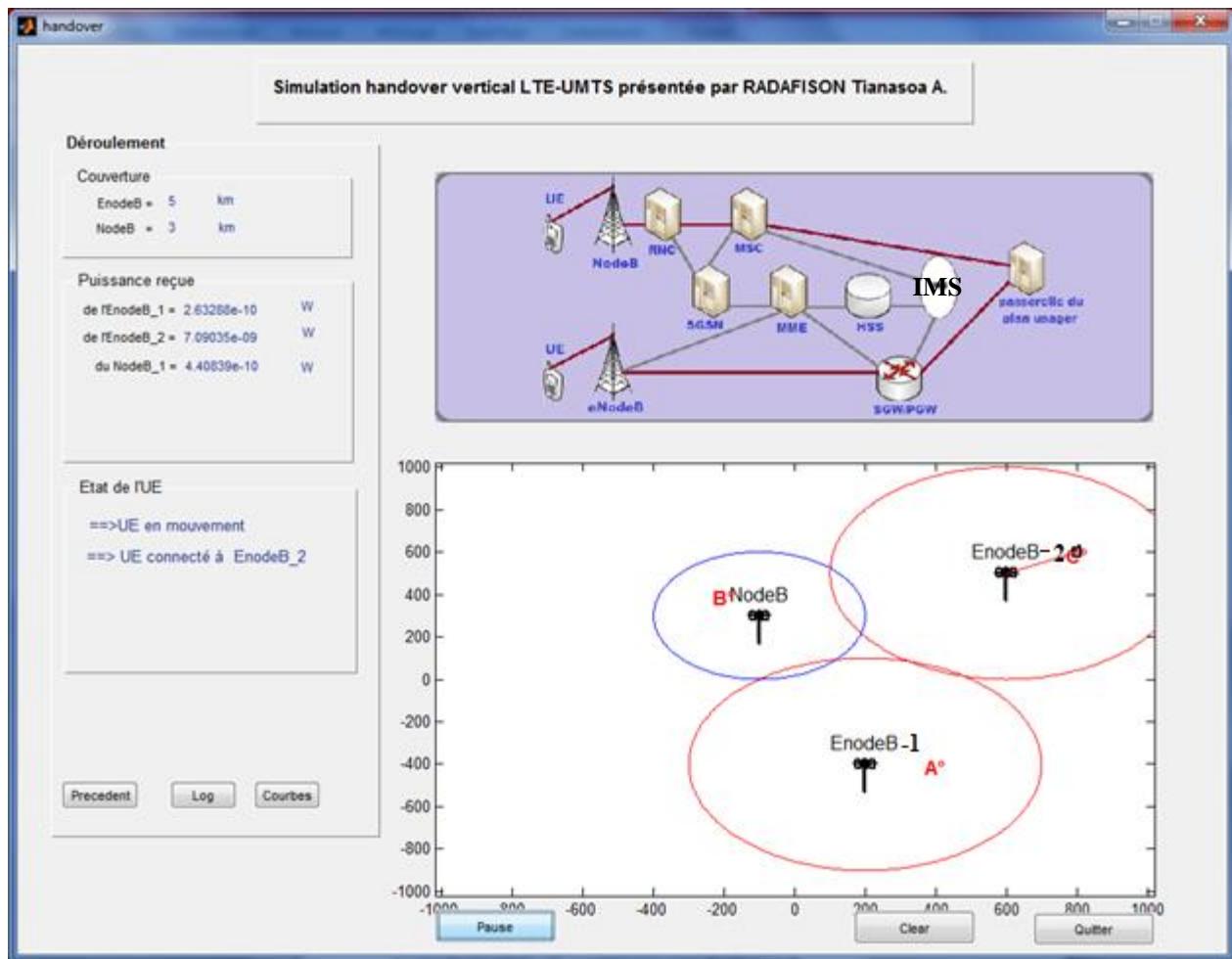


Figure 5.06 : Après simulation avec paramètres 01

Le bouton « Courbes » nous permet de tracer quelques courbes résultant de la simulation.

b) Résultats et interprétations

En appuyant sur le bouton « Courbes » de la fenêtre illustrée sur la **Figure 5.06**, nous pouvons faire le choix des courbes que nous voulons tracer.

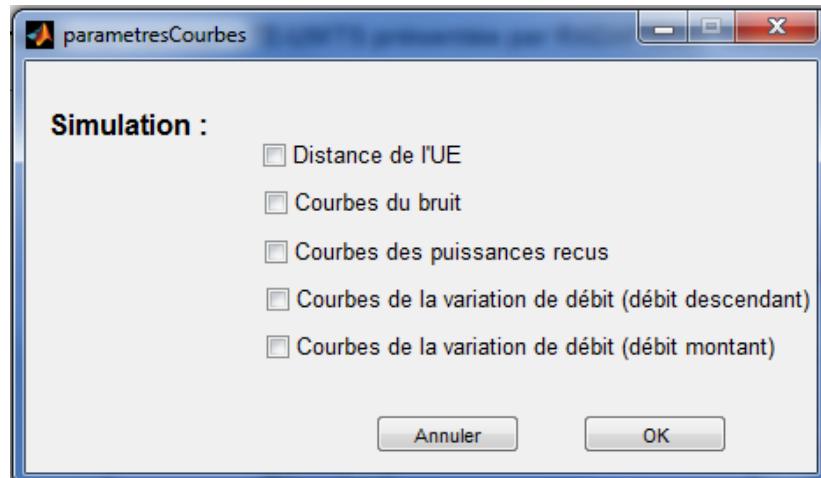


Figure 5.07 : Choix des courbes à tracer

Les premières courbes que nous allons tracer, les distances de l'UE par rapport aux enodeB et par rapport au NodeB en partant du point A vers le point B puis le point C, nous permettront de situer l'UE à un instant t quelconque de la simulation.

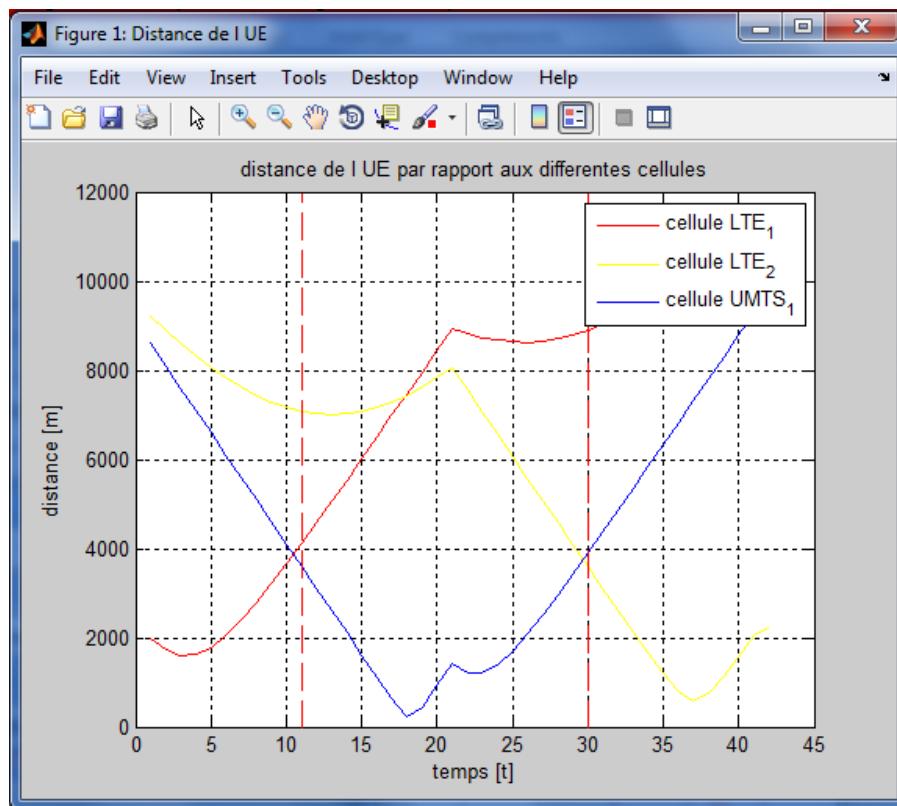


Figure 5.08 : Variation de la distance de l'UE par rapport aux trois cellules

Les tracés discontinus en rouge représentent le basculement de l'UE. Le premier basculement s'est fait à l'instant 11t, à environ 4000 m de la cellule LTE 1 et de la cellule UMTS. L'UE a basculé de la cellule LTE vers la cellule UMTS.

Ce qui suit présente les courbes de la puissance du bruit ainsi que celle de la puissance reçues par l'UE en provenant des antennes de chaque cellule.

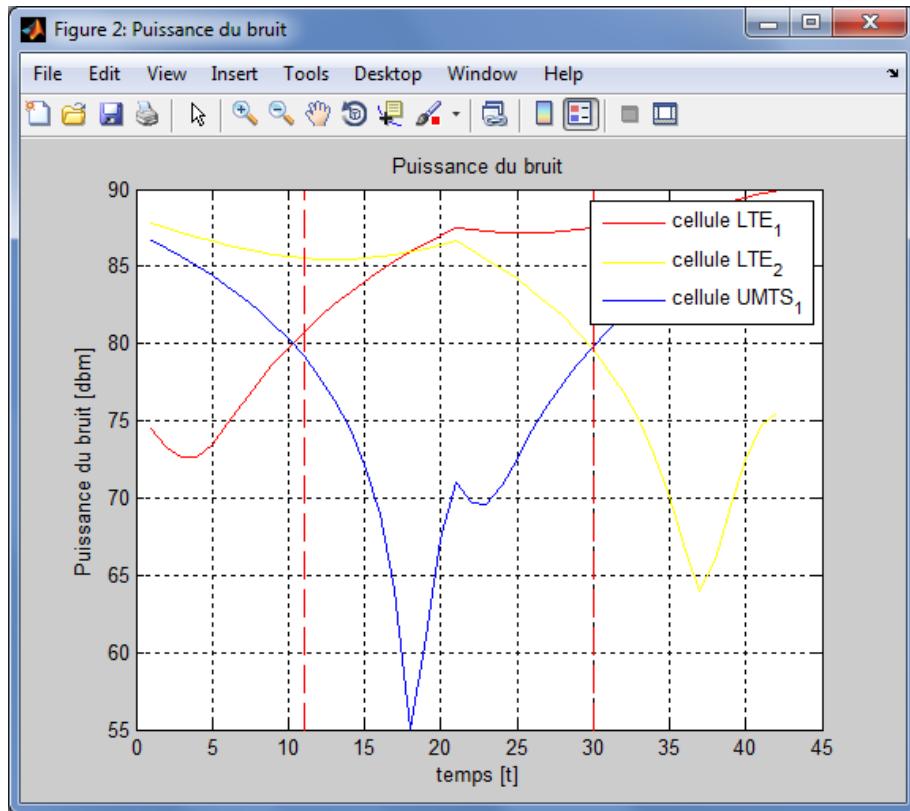


Figure 5.09 : Puissance du bruit en espace libre

L'UE s'éloigne tout d'abord de l'enodeB 1, nous remarquons l'augmentation de la puissance de bruit, en effet l'atténuation à l'espace libre étant proportionnelle au carré de la distance (cf.

Formule 2.01).

La puissance reçue, elle, est inversement proportionnelle à la puissance du bruit, définie dans le chapitre 4 par les **Formules (4.01)**, et nous pouvons le voir sur les courbes de la **Figure 5.10**.

La courbe de puissance qui est au-dessus des autres correspond donc à la cellule sur laquelle l'UE est connecté. Lorsque deux courbes se croisent, le basculement est alors déclenché, comme nous pouvons également le voir par le tracé vertical discontinu en rouge. L'UE est donc tout d'abord connecté à l'enodeB 1, ensuite le basculement de notre utilisateur s'est fait à l'instant 10t qui

correspond à une distance de 4000m de l'enodeB 1 et 4000m du NodeB. Un deuxième basculement se fait à l'instant 30t qui correspond à 4000m du nodeB et 4000m de l'enodeB 2.

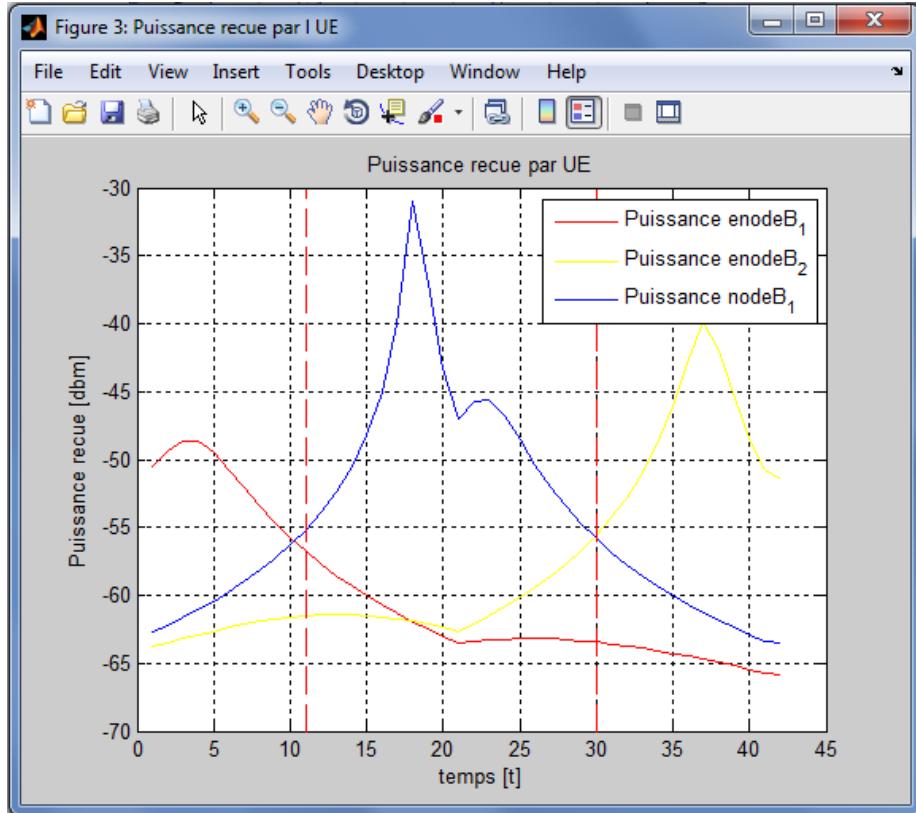


Figure 5.10: Puissance reçue par l'UE avec les paramètres 01

Les débits en LTE sont proportionnels à la puissance reçue et varient en fonction de la vitesse de l'utilisateur. Nous avons choisi comme valeur de la vitesse 3km/k, 30km/h et 120km/h qui correspondent respectivement à un piéton, un utilisateur en vélo et à un utilisateur véhiculé.

Les valeurs des débits dans une cellule LTE sont définies par les formules suivantes, en liaison montante et descendante [19]:

- Débit pour le sens descendant

$$R_{DL} = B_r \frac{\eta_{BW}}{Q} \sum_{K=1}^{K_q} \sum_{q=1}^Q \log_2 \left(1 + \eta_{SNR} \alpha_{K,q} \frac{\beta_{K,q}}{\sigma_{N_t}^2} \right) \quad (5.04)$$

➤ Débit pour le sens montant

$$R_{UL} = B_r \frac{\eta_{BW}}{Q} \sum_{q=1}^Q \log_2 \left(1 + \eta_{SNR} \alpha_{k,q} \frac{\beta_{k,q}}{\sigma_{N_t}^2} \right) \quad (5.05)$$

Avec

B_r : Bande passante reçue définie par :

$$B_r = B_w - B_d \quad (5.06)$$

$$B_r = B_w - 2 \frac{v}{c} f_0 \quad (5.07)$$

B_w : Bande passante

B_d : Bande Doppler

v : vitesse de déplacement de l'utilisateur [m/s]

c : Célérité de la lumière **3.10⁻⁸m/s**

f_0 : Fréquence porteuse

η_{BW} : Efficacité de la bande passante

Q : Nombre de sous canal

K_q : Rang de la matrice H (canal MIMO)

η_{SNR} : Efficacité SNR

$\alpha_{k,q}$: Gain de puissance de sous canal (k,q)

$\sigma_{N_t}^2$: Puissance de bruit

$\beta_{k,q}$: Allocation de puissance pour le sous canal (k,q)

$$\beta_{k,q} = \frac{P_{TX}}{RQ} \quad (5.08)$$

Avec P_{TX} : puissance totale émise

R : Nombre de bloc de ressource

L'efficacité du SNR et l'efficacité de la bande passante sont définies dans le **Tableau 5.01**.

	Nombre d'antennes d'émission	η_{BW}	η_{SNR}
Downlink	1	0.80	0.88
	2	0.76	0.97
	3	0.75	1.00
	4	0.72	1.09
Uplink	Nombre d'antennes d'émission	η_{BW}	η_{SNR}
	1	0.80	0.88

Tableau 5.01 : *Efficacité du SNR et efficacité de la bande passante en fonction du nombre d'antenne*

Le débit d'une cellule UMTS, à la différence d'un système F/TDMA ou OFDMA, ne possède pas de nombre de ressources radios d'une cellule strictement dénombrable. En effet, la capacité d'un tel système n'est pas déterminée par un nombre d'intervalles de temps ni un nombre de paquets allouables mais par un niveau d'interférences admissibles.

Nous utiliserons la théorie de Shannon définie par la **Formule (3.04)** pour calculer le débit en UMTS avec pour bande passante reçue définie par les **Formule (5.06)** et **(5.07)**.

Les courbes obtenues pour les débits descendant et montant sont donc ceux de la **Figure 5.11** et **Figure 5.12**.

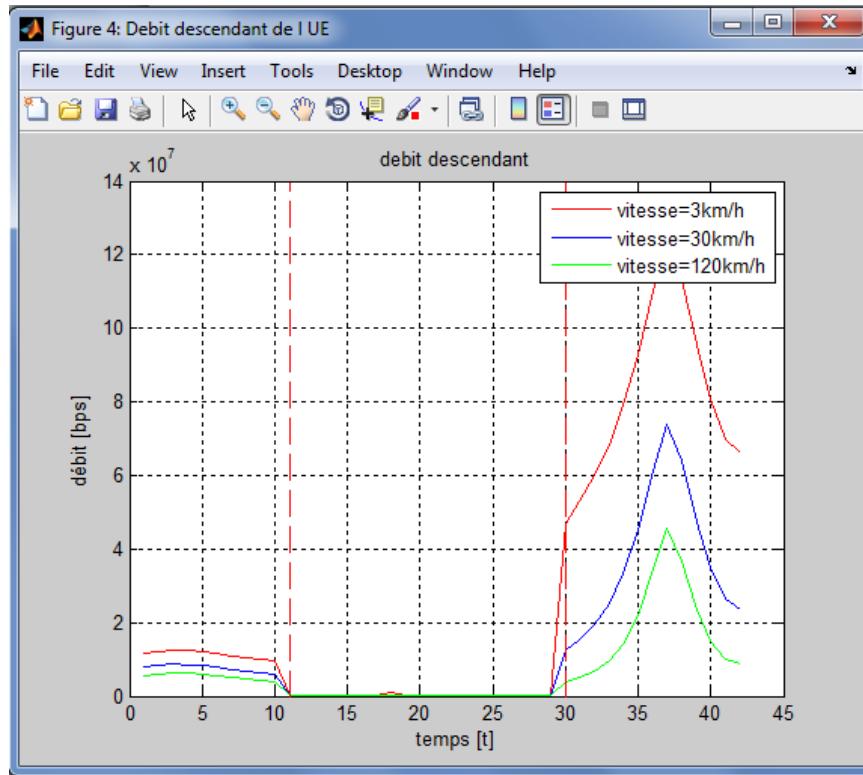


Figure 5.11 : Débit descendant offert à l'UE

Le débit montant est plus bas car ce lien utilise la modulation SC-FDMA et que la puissance d'émission de l'équipement utilisateur est beaucoup plus basse que celle de l'enodeB.

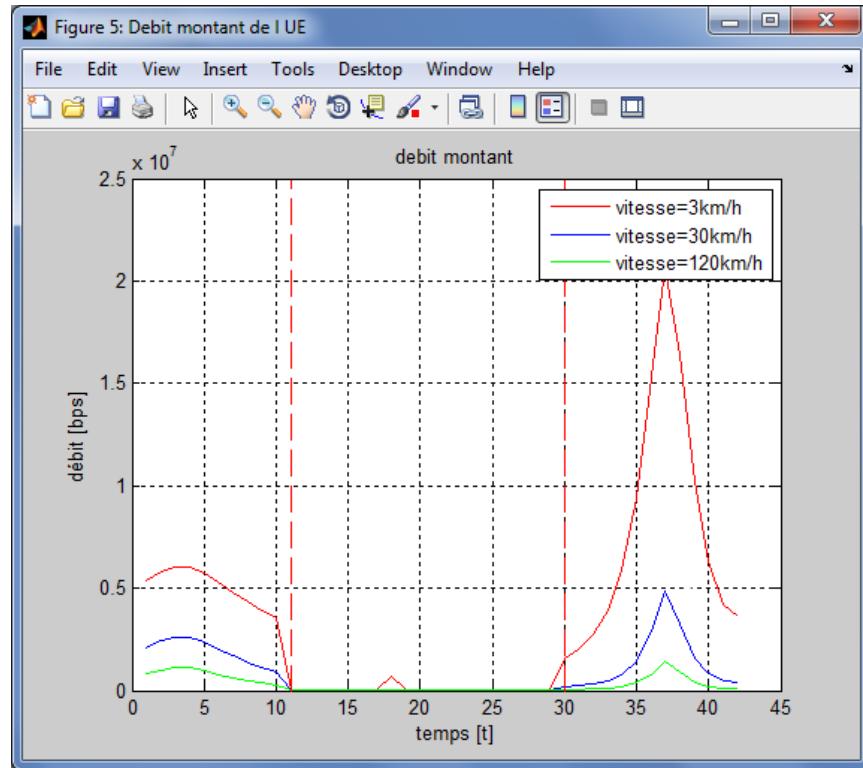


Figure 5.12: Débit montant offert à l'UE

Nous remarquons le débit, sur le lien descendant, d'environ 10Mbps étant donné que nous avons choisi 1.4Mhz de bande passante et une seule antenne d'émission. Le premier handover se déclenche à environ 10t, comme dit précédemment, et le débit devient presque nul. Il connaît à 18t, 20m du nodeB, un pic d'environ 400kbit/s en liaison descendante et 200 Kbit/s en liaison montante.

A environ 30t, l'UE est basculé vers l'enodeB 2 et son débit est maximale à l'instant 38t, soit une distance de 40m de l'enodeB, sur le lien descendant, ce débit est de 140Mbps et sur le lien montant, de 25Mbps.

Pour une meilleure qualité de service, le seuil du handover devrait être augmenté car le débit était encore assez haut, 4Mbps à 120km/h sur le lien descendant, lors du basculement de l'enodeB_1 vers le nodeB, et trop bas lors du basculement du nodeB vers l'enodeB_2.

5.3.2.2 Paramètres 02

a) Paramètres

Pour le deuxième cas, nous garderons les mêmes configurations que précédemment mais nous prendrons un seuil de 10^{-8} , pour ainsi garder la liaison de l'enodeB avec l'UE plus longtemps et ainsi offrir une meilleure qualité de service à l'utilisateur.

b) Résultats et interprétations

Les différentes distances de l'UE par rapport à l'enodeB et le NodeB sont représentées par les courbes de la **Figure 5.13** avec le moment des basculements.

Nous pouvons voir que les basculements sont cette fois à l'instant 15t pour le premier, soit à environ 1800m ètres de nodeB et 6000 m de l'enode 1. Le deuxième basculement est à environ 25t, soit à 2000m du NodeB et à 6000m de l'enodeB 2.

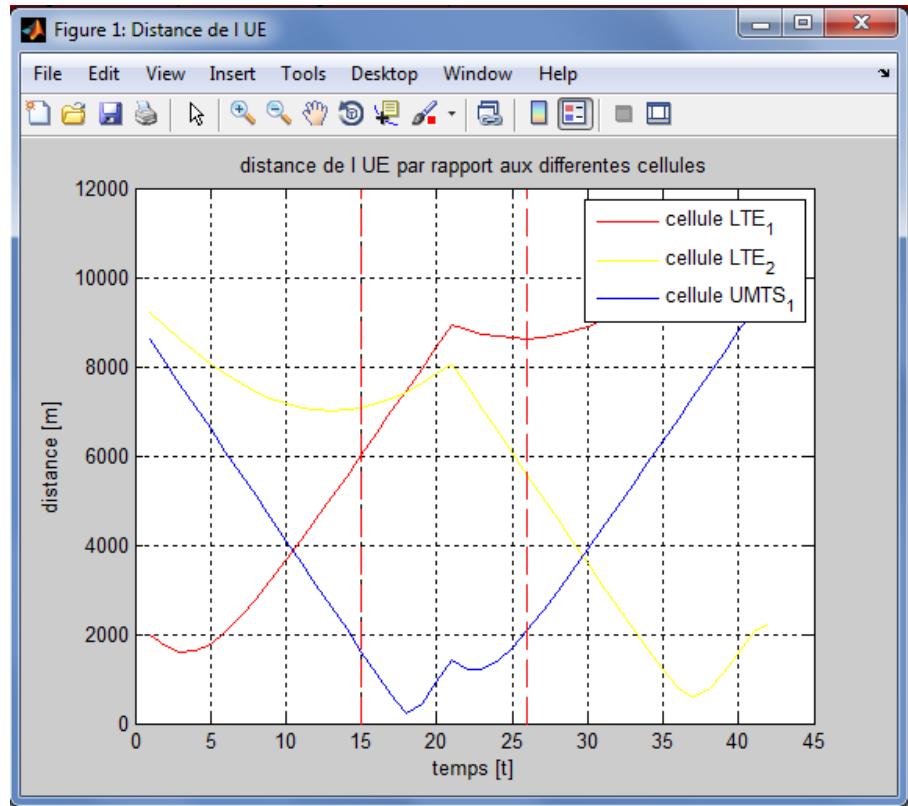


Figure 5.13 : Distance de l'UE par rapport aux enodeB et par rapport au NodeB en fonction du temps

Les puissances obtenues sont ceux de la **Figure 5.14** et **Figure 5.15** .

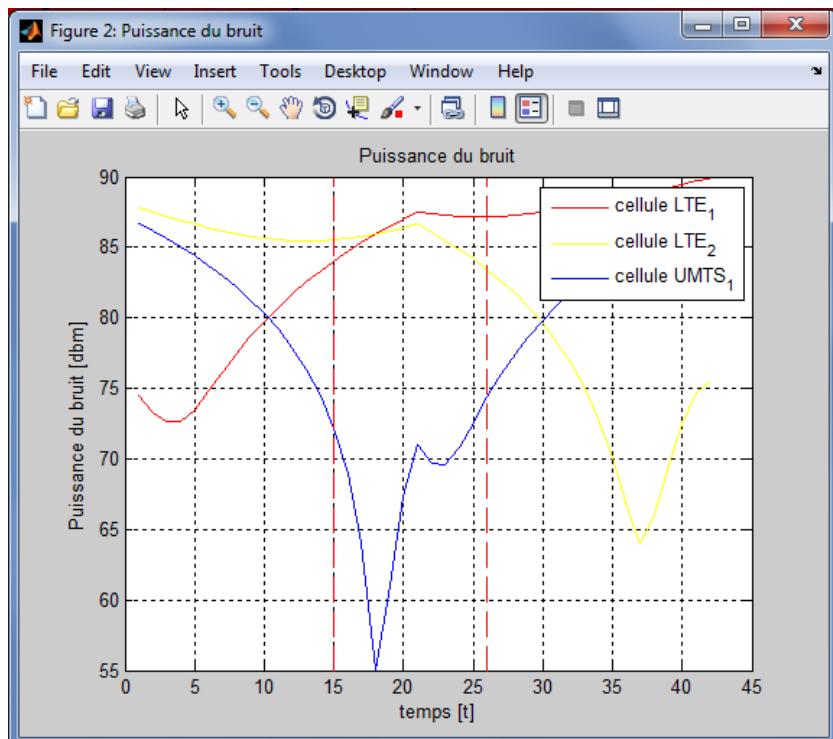


Figure 5.14 : Puissance du bruit en espace libre pour les cellules

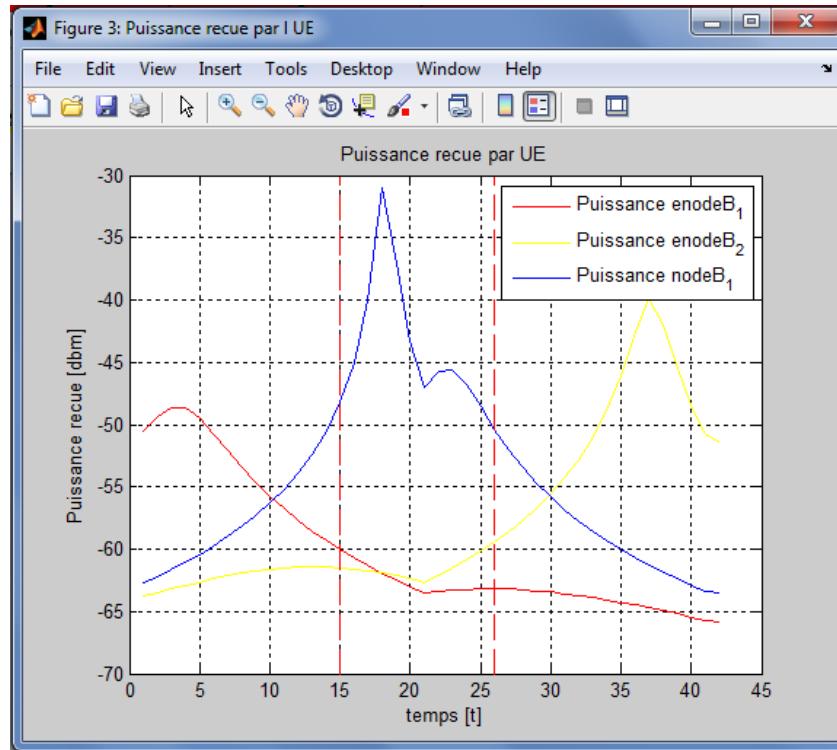


Figure 5.15: Puissance reçue par l'UE avec les paramètres 02

Nous remarquons que pour ce cas, il ne suffit pas d'une puissance élevée à une autre pour déclencher un basculement.

Voyons maintenant la variation du débit de l'UE suivant les **Figure 5.16** et **Figure 5.17** :

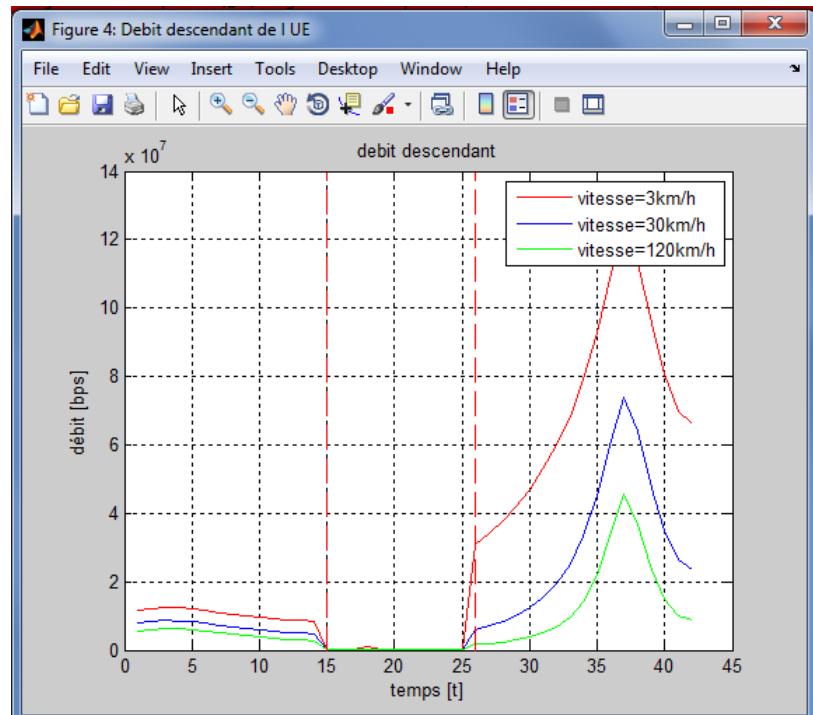


Figure 5.16 : Débit descendant offert à l'UE

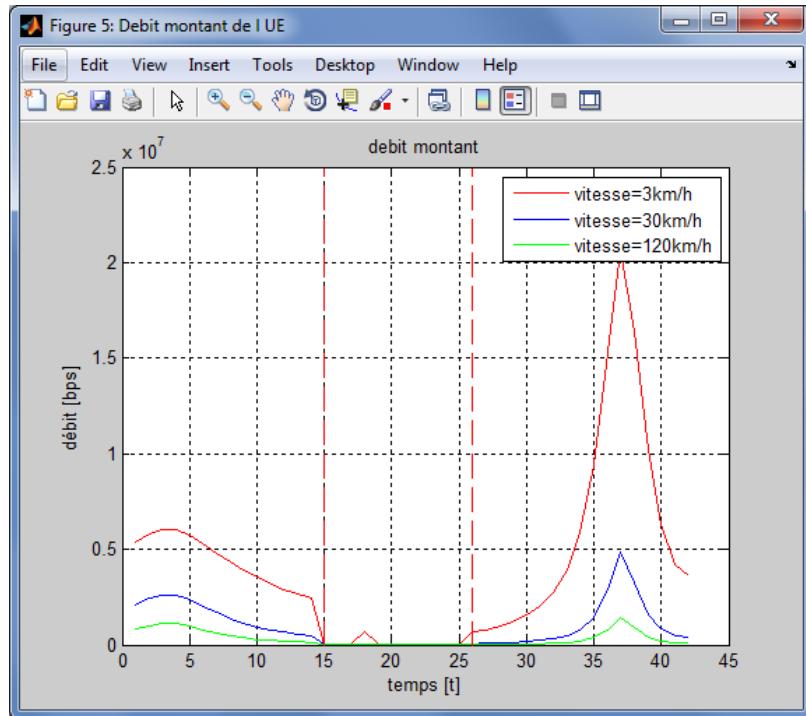


Figure 5.17 : Débit montant offert à l'UE

Cette fois, nous remarquons que l'UE profite plus longtemps de son débit que précédemment.

Cela grâce au seuil du handover.

Les pics des débits restent les mêmes que précédemment comme nous n'avons pas changé les paramètres.

5.4 Conclusion

Cette simulation nous a permis de comprendre le fonctionnement du basculement entre le système LTE et le système UMTS. En effet, ce basculement se fait en fonction du milieu où se trouve l'utilisateur qui entraîne la variation de la puissance reçue. Ce basculement est également contrôlé par le seuil qui est paramétré au niveau de l'enodeB ou du nodeB et qui permet ainsi d'offrir une meilleure qualité de service à l'utilisateur. Cette simulation permet également d'étudier le débit offert par l'enodeB et le nodeB en fonction des ressources mais aussi de l'atténuation du milieu.

CONCLUSION GENERALE

Les technologies ne cessant d'évoluer, plusieurs générations de réseau se succèdent et sont de plus en plus performantes. L'implémentation d'une nouvelle technologie étant un processus lent conduit les concepteurs à voir l'interopérabilité de cette dernière avec celles existantes.

Le présent mémoire nous a permis d'effectuer une étude sur la continuité du réseau UMTS, faisant partie de la troisième génération de réseau, déjà largement déployé dans la plupart des pays, et le LTE, une technologie plus récente et plus performante qui tend petit à petit à prendre la place de l'UMTS. Plus précisément, nous nous sommes consacrés à l'étude du handover vertical du système LTE vers l'UMTS, et inversement, le handover étant un processus permettant à l'utilisateur de se déplacer tout en restant connecté, l'équilibrage du trafic entre cellules, le maintien d'une qualité acceptable, l'optimisation de l'utilisation de ressources radio, mais permettant également d'éviter la rupture du lien pour causes radio.

En effet, un canal radio possède différents comportements du fait de son support qui est l'air. Le réseau d'accès UTRAN de l'UMTS a ainsi été décrit en détails, notamment la structure en couches du réseau, les protocoles de l'interface radio, et les différents canaux employés, mais également la structure des trames du réseau d'accès e-UTRAN du LTE. Le CDMA, technique employée par l'UMTS permettant d'avoir plusieurs utilisateurs sur une même onde porteuse, et l'OFDMA, technique du LTE qui consiste à combiner la modulation et le multiplexage fréquentiel sont relatés dans ce mémoire.

La simulation effectuée permet d'observer les différentes puissances reçues en fonction de l'environnement où se trouve l'UE et le basculement de cellule de cette dernière en fonction du seuil établi. L'analyse du débit descendant ainsi que du débit montant offert à l'UE nous a montré que ces débits varient en fonction de la technologie à laquelle l'UE est connecté, UMTS ou LTE, au nombre de ressource qui lui est attribué, mais aussi à l'atténuation du milieu. La simulation a été réalisée sous MATLAB version 7.14.0 (R2012a). Comme perspectives, nous pouvons envisager la possibilité d'utiliser plusieurs cellules pour la simulation, de prendre en compte plusieurs abonnés connectés en même temps, mais également d'ajouter d'autres fonctionnalités telles que les algorithmes d'ordonnancements et le délai.

ANNEXE 1

ARCHITECTURE DE L'EPS

La **Figure A1.01** nous présente l'architecture de l'EPS (Evolved Packet System).

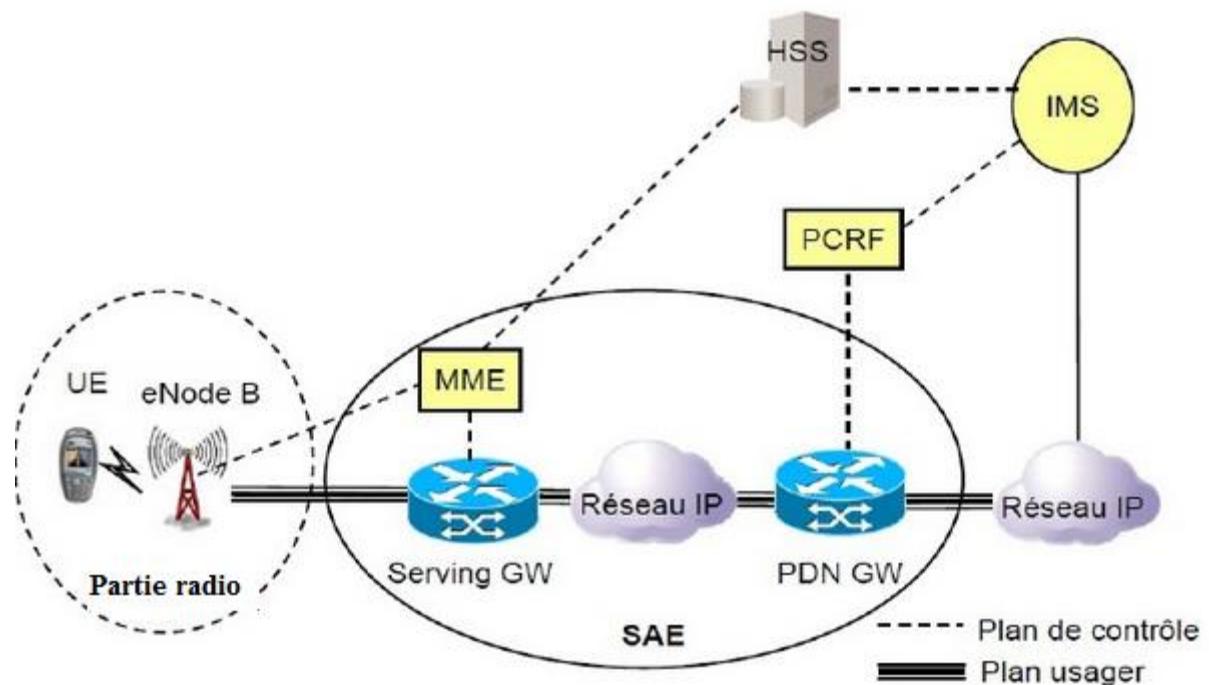


Figure A1.01 : Architecture de l'EPS

Le système EPS est composé de deux systèmes [24] :

- La partie radio : contenant les enodeBs reliés entre eux et reliés au réseau cœur ;
- Le SAE (System Architecture Evolution) : le cœur du réseau qui contient le MME, le SGW, le PDN GW, le HSS et le PCRF.

L'élément principal du LTE SAE se nomme le noyau de paquet évolué ou EPC.

ANNEXE 2

ARCHITECTURE EN COUCHES DU RESEAU LTE

La séparation, selon le modèle OSI, de chaque interface est divisée en deux plans, le plan usager (User plane) et le plan de contrôle (Control plane).

Le plan usager transporte toutes les informations considérées comme des données utilisateur, du point de vue de l'interface. Ceci consiste en des données purement usager comme les paquets de voix et vidéos ou la signalisation de niveau application (comme SIP, SDP or RTCP). Avant la transmission sur l'interface, les différents paquets sont tous simplement envoyés à la couche Transport. C'est ce qui explique l'absence de tout protocole dans la couche Radio Network qui correspond au plan usager.

Le plan de contrôle s'occupe de tous les messages et de toutes les procédures strictement liés aux fonctionnalités prises en charge par les interfaces. Ceci inclut par exemple, les messages de contrôle pour la gestion du handover ou la gestion des porteuses (supports). [25]

A2.01 Architecture du plan usager

Du point de vue réseau sans fil -y compris le réseau d'accès et cœur- le plan de usager ne comprend pas seulement les données des utilisateurs tels que les paquets de voix ou de contenu Web, mais aussi la signalisation associée aux services d'application tels que le SIP ou RTCP. Cependant bien qu'elle soit considérée comme une information de contrôle par les couches d'application, la signalisation des couches hautes est transmise via le plan usager. [25]

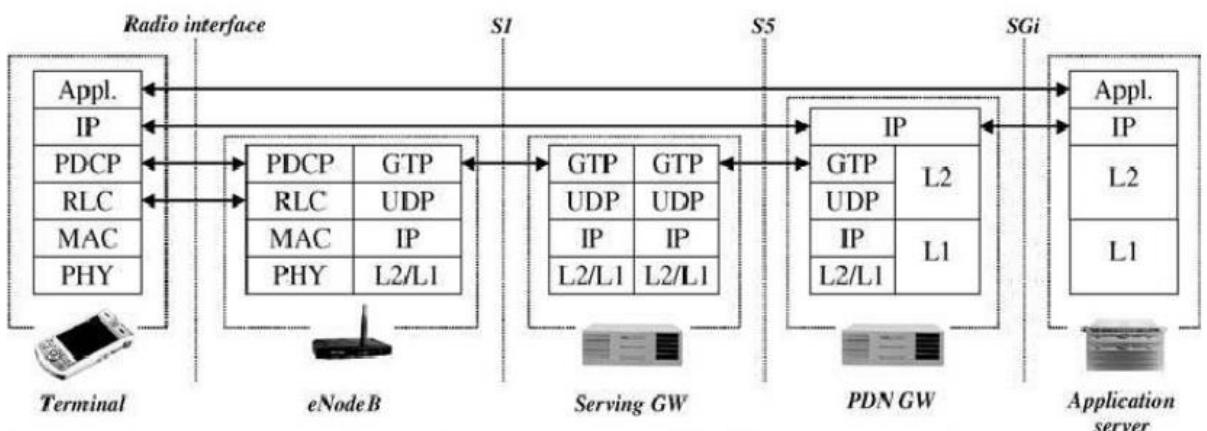


Figure A2.01 : La pile protocolaire du plan usager

A2.02 Architecture du plan control

Le plan de contrôle correspond aux flux d'information considérés par E-UTRAN et EPC comme flux de signalisation. Par exemple, il inclut tous les messages de signalisation du RRC qui supporte des fonctions telles que Radio Bearer Management, la mobilité radio, paging des utilisateurs. Par ailleurs, ce plan comprend aussi la signalisation du NAS (Non Access Stratum) qui fait référence aux fonctions et services indépendants de la technologie d'accès. Il comprend aussi les couches GMM et SM en charge de toutes les procédures de signalisation entre le terminal de l'utilisateur et MME pour les sessions et la gestion des porteuses, contrôle de sécurité ainsi que l'authentification.

La **Figure A2.02** décrit la pile protocolaire du plan de contrôle. La pile s'arrête jusqu'au niveau du MME, parce que les protocoles des couches-hautes se terminent au niveau du MME. Sur l'interface radio, le plan de contrôle utilise les mêmes piles PDCP, RLC, MAC and PHY, pour transporter à la fois RRC et la signalisation NAS du réseau cœur. Les couches RLC, MAC et PHY supportent les mêmes fonctions à la fois pour le plan usager et le plan de contrôle. Cependant ceci ne veut pas dire que les informations du plan usager et le plan de contrôle sont transmis de la même façon. Plusieurs porteuses radio (Radio bearers) peuvent être établis entre le terminal et le réseau, chacune d'elles correspond à un schéma de transmission spécifique, une protection radio et un traitement prioritaire. [25]

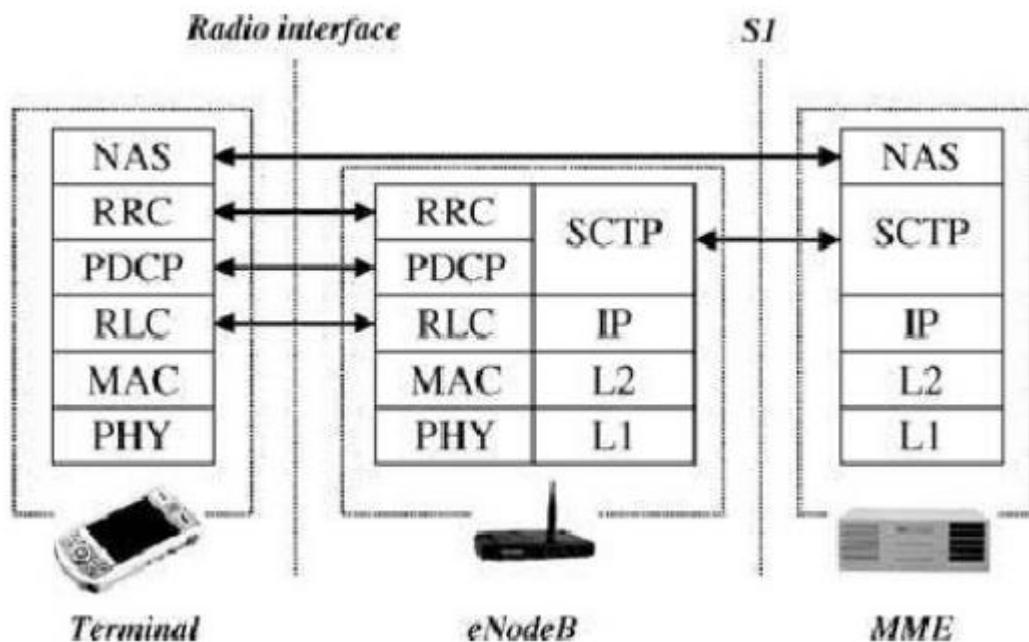


Figure A2.02 : Pile protocolaire du plan de contrôle

ANNEXE 3

MODELE DE PROPAGATION : OKUMURA HATA

Un modèle de propagation permet de prédire le niveau du signal reçu par l'UE en fonction des différentes atténuations que ce signal aurait subi. En effet, dans le cas des communications radio mobiles, le signal est porté par une onde électromagnétique qui se propage dans l'air. La puissance reçue au récepteur dépend donc de plusieurs effets.

Le modèle d'Okumura Hata est un des modèles les plus populaires pour la prédiction de l'affaiblissement des signaux dans des zones urbaines. Il s'applique pour la bande de fréquence allant de 150Mhz à 1500Mhz et pour des distances de 1km à 100 km. [9]

Le modèle d'Okumura Hata est défini par la formule suivante :

$$A_T = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_{te}) - A(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log(h_{te})) \log(d) \quad (\text{A3.01})$$

d : Distance entre l'émetteur et le récepteur [km]

f : Fréquence en [Mhz]

h_{re} : Hauteur de l'antenne de réception en [m]

h_{te} : Hauteur de l'antenne d'émission en [m]

Avec $A(h_{re})$ définie selon le milieu comme nous le voyons dans le tableau suivant :

Milieu	$A(h_{re})$
Urbain (petite et moyenne ville)	$A_{urb}(h_{re}) = (1,11 \log f - 0,7)h_{re} - (1,56 \log f - 08)$
Urbain (grande ville)	$A_{urb}(h_{re}) = \begin{cases} 8,29[\log(1,54h_{re})]^2 - 1,1 & f < 300MHz \\ 3,2[\log(11,75h_{re})]^2 - 4,97 & f > 300MHz \end{cases}$
Suburbain	$A_{sub}(h_{re}) = A_{urb}(h_{re}) + 2 \left[\log\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 + 5,4$
Zone ouverte	$A_{ouv}(h_{re}) = A_{urb}(h_{re}) - 4,78[\log(f)]^2 - 18,33 \log f - 40,94$

Tableau A3.01 : Valeurs de $A(h_{re})$ définies selon le milieu

ANNEXE 4

MATRICE DE HADAMARD

Une matrice de Hadamard est une matrice carrée dont les coefficients sont tous 1 ou -1 et dont les lignes sont toutes orthogonales entre elles. Le nom retenu pour ces matrices rend hommage au mathématicien français Jacques Hadamard, même si les premiers exemples systématiques sont dus à James Joseph Sylvester. [26]

Pour une matrice H d'ordre n , la propriété d'orthogonalité des colonnes peut également s'écrire sous la forme [26] :

$$H \times^t H = nI_n \quad (\text{A4.01})$$

Où I_n : matrice identité d'ordre n

${}^t H$: matrice transposé de H

La construction est basée sur la propriété suivante :

Si H est une matrice de Hadamard d'ordre n , alors la matrice $\begin{pmatrix} H & H \\ H & -H \end{pmatrix}$ est une matrice de Hadamard d'ordre $2n$. [26]

Exemples :

$$H_1 = (1)$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$H_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

ANNEXE 5

PROGRAMMATION DE LA SIMULATION

Voici quelques lignes de code de notre travail :

```

%%Calcul des puissances reçues des enodeB
%%Puissance venant de l'enodeB 1 (nbre_enodeB==1)

if nbre_enodeB==1
    k1_enodeB=sqrt((UE{1}.X-eNB{1}.X)^2+(UE{1}.Y-eNB{1}.Y)^2)*10;
l1_enodeB_db=0.45*((frequence_lte_1*10^(-6))^0.284)*2;
    l1_enodeB_W=double((10^(double(l1_enodeB_db)/10))*10^-3);

PL1_enodeB_espaceLibre=32.45+20*log10(frequence_lte_1*10^-
6)+20*log10(k1_enodeB*10^-3);

modele1_enodeB_OH=okomuraHata(milieu1,frequence_lte_1,hauteurAntenne_lte_1,haut
eurAntenneUE,(k1_enodeB*10^-3));
    attenuation1(1)=(-(PL1_enodeB_espaceLibre*attenuationEspaceLibre1)-
(l1_enodeB_db*attenuationArbres1)-(modele1_enodeB_OH));
    Precue_enodeB_1(1)=10*log10(P_enodeB_1)+gain_lte_1+GainUE-
(PL1_enodeB_espaceLibre*attenuationEspaceLibre1)-
(l1_enodeB_db*attenuationArbres1)-(modele1_enodeB_OH);
    Precue_enodeB_1_W=double((10^(double(Precue_enodeB_1(1))/10)));
set(handles.Puissance_de_EnodeB_1,'String',Precue_enodeB_1_W);
d(1,1)=k1_enodeB;

cellEnodeB=1;
    Precue_enodeB=Precue_enodeB_1_W;

%%Puissance venant des 2 enodeB
elseif nbre_enodeB==2
    k1_enodeB=sqrt((UE{1}.X-eNB{1}.X)^2+(UE{1}.Y-eNB{1}.Y)^2)*10;
l1_enodeB_db=0.45*((frequence_lte_1*10^(-6))^0.284)*2;
    l1_enodeB_W=double((10^(double(l1_enodeB_db)/10))*10^-3);

PL1_enodeB_espaceLibre=32.45+20*log10(frequence_lte_1*10^-
6)+20*log10(k1_enodeB*10^-3);

modele1_enodeB_OH=okomuraHata(milieu1,frequence_lte_1,hauteurAntenne_lte_1,haut
eurAntenneUE,(k1_enodeB*10^-3));
    attenuation1(1)=(-(PL1_enodeB_espaceLibre*attenuationEspaceLibre1)-
(l1_enodeB_db*attenuationArbres1)-(modele1_enodeB_OH));
    Precue_enodeB_1(1)=10*log10(P_enodeB_1)+gain_lte_1+GainUE-
(PL1_enodeB_espaceLibre*attenuationEspaceLibre1)-
(l1_enodeB_db*attenuationArbres1)-(modele1_enodeB_OH);

    Precue_enodeB_1_W=double((10^(double(Precue_enodeB_1(1))/10)));
set(handles.Puissance_de_EnodeB_1,'String',Precue_enodeB_1_W);
d(1,1)=k1_enodeB;

k2_enodeB=sqrt((UE{1}.X-eNB{2}.X)^2+(UE{1}.Y-eNB{2}.Y)^2)*10;
l2_enodeB_db=0.45*((frequence_lte_2*10^(-6))^0.284)*2;

```

```

%12_enodeB_W=double((10^(double(12_enodeB_db)/10))*10^-3);

PL2_enodeB_espaceLibre=32.45+20*log10(frequence_lte_2*10^-
6)+20*log10(k2_enodeB*10^-3)

modele2_enodeB_OH=okomuraHata(milieu1,frequence_lte_2,hauteurAntenne_lte_2,haut
eurAntenneUE,(k2_enodeB*10^-3));
attenuation2(1)=(-(PL2_enodeB_espaceLibre*attenuationEspaceLibre1)-
(12_enodeB_db*attenuationArbres1)-(modele2_enodeB_OH));
Precue_enodeB_2(1)=10*log10(P_enodeB_2)+gain_lte_2+GainUE-
(PL2_enodeB_espaceLibre*attenuationEspaceLibre1)-
(12_enodeB_db*attenuationArbres1)-(modele2_enodeB_OH)

Precue_enodeB_2_W=double((10^(double(Precue_enodeB_2(1))/10)));
set(handles.Puissance_de_EnodeB_2,'Visible','on');
set(handles.Puissance_de_EnodeB2,'Visible','on');
set(handles.W_EnodeB2,'Visible','on');
set(handles.Puissance_de_EnodeB_2,'String',Precue_enodeB_2_W);
d(2,1)=k2_enodeB;

if Precue_enodeB_1_W<Precue_enodeB_2_W
cellEnodeB=2;
Precue_enodeB=Precue_enodeB_2_W;
elseif Precue_enodeB_1_W>Precue_enodeB_2_W
cellEnodeB=1;
Precue_enodeB=Precue_enodeB_1_W;
end
end

end

```

Le principe est le même pour les puissances venant des nodeB.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Y.Bouguen, E. Hardouin, F. X. Wolff, « *LTE et les réseaux 4G* », Eyrolles, 2012
- [2] H. Bouchentouf, R. Boudghene Stambouli, Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Master en Télécommunication : « *Etude des performances des réseaux 4G (LTE)* », Université A. Belkaid d'Algérie, Faculté de technologie, Département de génie électrique et électronique (GEE), jun. 2013
- [3] J.F. Pillou, « *Téléphonie mobile, 3G et 4G expliquées* », <http://www.commentcamarche.net/>, Nov. 2014
- [4] A. Xerinay, N. Feron , « *Les réseaux GSM , 3G, UMTS, 4G, GPRS. La télé sur mobileRM H D* », mai 2014
- [5] M.A. Rakotomalala, « *Téléphonie mobile* », Cours I5, Dép. TCO.- E.S.P.A., A.U. : 2013-2014.
- [6] Efort, « *Réseau d'accès UMTS Architectures et interfaces* », <http://www.efort.com/>, 2014
- [7] A. Latrach, Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Master en Télécommunication: « *Stratégies d'annulation d'interférence sur le lien descendant d'un réseau sans fil LTE hétérogène* », Université de Québec, INRS-Énergie, Matériaux et Télécommunications, 2012
- [8] 3GPP ,“*TS 23.401 V10.3.0Technical Specification Group Services and System Aspects*”; Techn.Ber., Mars 2011.
- [9]A. Andriamanalina, « *Modèles de propagation des réseaux cellulaires* », Cours I3, Dép. TCO-E.S.P.A., A.U. : 2011-2012
- [10] O. Hasnaoui, Mémoire de fin d'étude : « *UMTS* », Université Djillali LIABES, Informatique et Telecommunication, 2006
- [11] A.A Randriamitantsoa, « *Qualité de service et ingenierie des réseaux*», Cours I5, Dép. TCO-ESPA, A U : 2013-2014
- [12]J. Sanchez, M. Thioune, « *UMTS* », 3 ème édition, Editions Hermes

[13] 3GPP TSG RAN WG4, “*Response to LS on switch time requirements for LTE TDD, Liaison R1-0811181, 3GPP TSG RAN WG1 #52bis*”, avril 2008.

[14] D. Tse et P. Viswanath, “*Fundamentals of wireless Communication*”, Université de Cambridge, 2005.

[15] Y. Li, L. Stüber, “*Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless*”, Springer, 2006

[16] G. H. Golub, C; F. Loan, “*Matrix Computation*”, 3ème édition, The Johns Hopkins University Press, 1996.

[17] Spécification technique 3GPP TS 36.211, « *E-UTRA, Physical Channels and modulation v.8.9.0* », décembre 2009.

[18] H.G Myung, J. Lim D. J. Goodman, “*Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission*”, IEE Vehicular Technology Magazine, Septembre 2006

[19] L. Zhiang, « *Network Capacity, Coverage Estimation and Frequency Planning of 3GPP Long Term Evolution* », Thèse, Linköping University, Institut de technology, Departement d’ingenierie electrique, 06 Septembre 2010

[20] S. Benedetto , E. Biglieri, “*Principles of Digital Transmission with Wireless Application*”. Kluwer Academic, Plenum Publiser, New York, 1999

[21] H. Holma, A. Toskala. “*LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*”. John Wiley and Sons, 2009

[22] G. Berardinelli, L. Angel, S. Frattasi, etc. “*OFDMA vs. SC-FDMA: Performance comparison in local area IMT-A Scenarios*”. IEEE Wireless Communications, Octobre 2008

[23] J. Zyren, “*Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer*”, http://www.freescale.com/files/wireless_comm/doc/white_paper/3GPPEVOLUTIONWP”, Mai 2010

[24] A. Abdi, « *LTE : Long Term Evolutions* », <http://fr.slideshare.net/miraabdi/6-lte-cours-1/>, 20 juin 2012

[25]L. Mokdad, “*Rapport LTE*”, https://fr.scribd.com/doc/50868690/26/Les-plans-usager-et-de-controle,_16-mars-2011

[26] Wikipedia, “*Matrice de Hadamard*”, http://fr.wikipedia.org/wiki/Matrice_de_Hadamard, 12 janv. 2014

FICHE DE RENSEIGNEMENTS



Nom : RADAFISON
Prénoms : Tianasoa Anne-Marie
Adresse : Lot II A 35 TER Tanjombato
Antananarivo 101
Téléphone : +261 033 70 190 77
E-mail : tianasoaradafison@gmail.com

Titre du mémoire :

***ETUDE DU HANDOVER VERTICAL ENTRE LES
SYSTEMES LTE ET UMTS***

Nombre de pages : 111 pages

Nombre de tableaux : 13

Nombres de figures : 55

Directeur de mémoire : Monsieur RATSIMBAZAFY Andriamanga

Maîtres de Conférences

+261 33 75 638 84

RESUME

Comment s'effectue un handover passant d'un système LTE vers un système UMTS et inversement ? Ce mécanisme est décrit comme étant un handover vertical car il bascule l'UE d'une technologie à une autre. Des différentes générations de réseaux en partant de la 1G pour arriver au réseau LTE, font évoluer le débit jusqu'à 300Mbps comme débit théorique maximale sur la voie descendante, cependant pas assez pour faire partie de la quatrième génération. Les réseaux d'accès de l'UMTS et du LTE avec les différentes techniques employées entrent dans les différentes étapes de l'handover entre ces deux technologies. La simulation du handover permet d'observer les différentes puissances reçues en fonction de l'environnement où se trouve l'UE, le basculement de cellule en fonction du seuil choisi, et par la suite, l'analyse de la variation du débit descendant ainsi que du débit montant offert à l'UE selon la cellule où il se trouve.

Mots clés : **LTE, UMTS, handover, MATLAB, seuil**

ABSTRACT

How does an handover going through a LTE system to an UMTS system, and inversely happen? This mechanism is described as a vertical handover because it moves the UE from a technology to another. Many different network generations starting with the 1G until the LTE network, improve the throughput until 300Mbps as maximal theoretical downlink throughput, however not sufficient to be part of the fourth generation. The UMTS and LTE access networks with the different technics used are among the different steps of the handover between these technologies. The handover simulation allows looking at the different received powers depending on the environment where the UE is located, the cell change depending on the choosen threshold, and then, the analyze of the variation of the downlink and uplink throughputs given to the UE depending on its cell location

Keywords : **LTE, UMTS, handover, MATLAB, threshold**