



# MEMOIRE

Présenté

**A L'UNIVERSITE DE TLEMCCEN  
FACULTE DE TECHNOLOGIE**

Pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

en

**Composant et Systèmes Electroniques pour les Télécommunications**

par

**YEO Siempégnou Hippolyte**

**Alwi Sharif**

**EVALUATION DES PERFORMANCES DES TECHNIQUES D'ACCÈS  
OFDMA ET SC-FDMA  
DANS LA TECHNOLOGIE LTE**

**Soutenu en Juillet 2012 devant le Jury:**

KAMECHE Samir.	MCB, Université de Tlemcen	Président
MOUSSAOUI Djillali	MAA, Université de Tlemcen	Examineur
ZERROUKI Elhadj.	MAB, Université de Tlemcen	Examineur
ABDELMALEK Abdelhafid	MAA, Université de Tlemcen	Encadreur
ABDELMALEK Slimane Zohra	Doctorante	Co-Encadreur



## Remerciements

*Nous ne pourrions aborder ce travail sans remercier  
DIEU TOUT PUISSANT.*

*Nous adressons nos sincères remerciements au Professeur FEHAM  
Mohamed, Directeur du laboratoire de Recherche STIC, pour ses  
conseils, sa disponibilité et son esprit de famille qu'il a créé autour de  
nous.*

*A tout le corps enseignant du cycle Master Composants et Systèmes  
Electroniques pour les Télécommunication (CoSET).*

*Un sincère merci à Monsieur ABDELMALEK Abdelhafid Maître-  
assistant à l'Université de Tlemcen qui par son encadrement nous a  
partager son savoir et sa motivation et a accorder un grand intérêt à  
notre travail. Merci également à Madame ABDELMALEK Slimane  
Zohra.*

*Grand merci au Docteur KAMECHE Samir, Maître de conférences à  
l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté de présider ce modeste  
travail, aussi pour ses précieux conseils et son savoir qu'il a pu nous  
partager durant notre cursus.*

*A Messieurs MOUSSAOUI Djillali, ZERROUKI Elhadj nous leur  
témoignons notre reconnaissance pour avoir accepté d'examiner ce  
travail.*

*Grand merci à tous ceux qui ont lu et critiqué ce travail.*

## *Dédicace*

*...A ma mère*

*Faridah Abubakar*

*...A la mémoire de mon père et mon grand-père,*

*A mes frères Mohammed, Abdallah, Amin, Omar et ma  
sœur Aminah pour tout leur soutien qu'ils m'ont apporté  
durant mon cursus scolaire,*

*A mon oncle Hadj Kasule Ali Kabuye pour ses conseils,*

*A mes amis Asimwe Max Weber, Matte Ismaïl, Tusime  
Meron, Hippolyte YEO et tous ceux qui m'ont soutenu,*

*A l'Association des Etudiants Etrangers de Tlemcen,*

*A la Promotion du Master CoSET de l'Université de  
Tlemcen,*

*ALWI Sharif*

*A la mémoire à mon défunt frère aîné Minantinihan Salif qui comme moi fut passionné de l'électronique et des Télécoms.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à mon Père **Abib Bargnanan YEO** et à ma mère **Koné Miyala Joséphine**, qui ont fait de moi ce que je suis.*

*A mes frères Ousmane, Widenni, Saïd, Ilyas et Abdül.*

*A mes oncles et tantes : Milaman, Elisa, Marcel, ...*

*A ma famille Algérienne, la famille Mesmoudi : Mr Nabil, son épouse et mes frères Salah, Racim et Yasmine qui m'ont toujours soutenu et m'ont permis un agréable séjour en Algérie.*

*A mon tonton Koffi Yacouba qui m'a toujours prodigué de sages conseils.*

*Je ne pourrais oublier mes proches dont Moussa Bakayoko, Ettien Akoua Lucie, Kouamé Niamien Franklin, mon frère Dr Touré Tuo Gaël, Kouakou Bah Kédjébo Charles, Francis Rabé, ALWI Sharif ainsi que tous ceux qui m'ont toujours témoigné leur amitié,*

*A Drusille Kassi qui a toujours été à mes côtés et ma soutenu sur tous les plans,*

*A l'Association des Etudiants Etrangers de Tlemcen,*

*A l'Association des Etudiants Ivoiriens et Stagiaires d'Algérie (AESIA)*

*A la 1<sup>ère</sup> promotion du Master CoSET de l'Université de Tlemcen*

*Hippolyte Sienpégnou YEO*



---

# Introduction générale

Aujourd'hui, les systèmes de communication radio sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne et ils tendent à remplacer l'utilisation excessive de câbles. Pour améliorer la qualité de service qu'ils offrent, les chercheurs préparent l'arrivée de la future génération baptisée 4G.

Depuis ces dernières décennies le monde de téléphonie a été révolutionné par l'arrivée de réseau cellulaire. Devant la nécessité de satisfaire aux besoins de l'homme en matière de communication et de facilité le quotidien, l'on a assisté à plusieurs évolutions des systèmes de communication depuis la création du télégraphe jusqu'à la mise en marche de réseau radio permettant l'accès internet et les services multimédia sur les terminaux. Compte tenu des facteurs socio-économiques la demande du public en termes de communication est plus que jamais contraignante : transmettre et/ou accéder à un grand volume d'information, le plus vite possible avec la plus grande souplesse possible, le tout avec une mobilité sans limite et sur des supports miniaturisés. Dans ce contexte, les organismes de normalisation n'arrêtent pas de proposer des évolutions aux systèmes existant. Ainsi de nos jours l'idéal serait de pouvoir avoir un accès illimité, permanent et continu d'une bonne qualité de service.

Ceci est chose possible aujourd'hui avec la préparation de l'arrivée de la norme de 4<sup>ème</sup> génération « 4G » par deux technologies principales. Il s'agit d'une part du Wimax, standardisé par IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) et développé pour des accès sans fil à Internet à haut débit. L'autre technologie émergente dénommée le Long Term Evolution (LTE) est quant à elle standardisée par le 3GPP (Third Generation Partnership Project) qui était également à l'origine du GSM, pour les futurs réseaux de téléphonie mobiles qui permettrait d'avoir également un accès haut débit. Le standard évolué LTE de l'organe de standardisation 3GPP (Third Generation Partnership Project). Aujourd'hui l'homme est à un tournant précieux de son histoire avec l'arrivée des hauts

débits dans les systèmes radio mobiles. L'accès aux hauts débits dans les réseaux cellulaires est un grand défi réalisé pour la technologie. Désormais il sera donc possible à partir de son terminal mobile d'avoir aisément en plus de la voix, des communications vidéo et des accès de données de très bonne qualité. En effet cette facilité d'intégration et d'utilisation de tous ces services est due à une optimisation des performances des systèmes connus et une innovation de ces structures. La mise en œuvre de ces technologies a fait l'objet d'étude et de distinction entre plusieurs techniques utilisées dans les réseaux mobiles . De ce fait le standard LTE semble proposer plus de facilité d'accès de son réseau par des gestions plus optimales des ressources radio. Contrairement aux normes précédentes, le Long Term Evolution a recours à deux techniques d'accès différentes en émission et en réception. Dans ce travail nous essayerons de comprendre et d'évaluer et de justifier les performances de cette technologie qui révolutionne le monde de la technologie.

Notre étude se fera en trois étapes. Dans la première partie nous ferons une étude des évolutions des réseaux depuis les premières générations jusqu'à la 4<sup>ème</sup> génération. Nous évaluerons chaque standard, tirerons leurs avantages et inconvénients dans le but de faire une comparaison entre les systèmes précédents et ceux qui sont l'objet de notre étude. Nous insisterons sur les objectifs du Long Term Evolution (LTE), ses caractéristiques, son architecture et ses performances. Par la suite dans la deuxième partie nous ferons une étude plus approfondie et comparative des performances en émission et en réception. Dans la troisième partie ce sera une vérification des théories par une simulation.

# CHAPITRE 1

---

## Evolution de la téléphonie mobile

### I.1 Introduction

Aujourd'hui, il paraît évident d'avoir à partir de son terminal mobile, une conférence vidéo avec un correspondant à l'autre bout du monde, d'acheter un article en ligne tout en étant chez soi à la maison. Mais il est important de savoir que les systèmes de télécommunication que nous apprécions tant n'ont pas toujours permis de tels avantages. Un regard depuis les premiers dispositifs de communication jusqu'à la naissance du téléphone mobile, nous montre l'évolution surprenante qu'a connu les sciences et technologies de communications. Notre travail consistera dans ce premier chapitre à montrer le chemin de cette évolution

### I.2 Naissance de la téléphonie Mobile

Après la découverte des ondes électromagnétiques par Maxwell et l'invention du premier téléphone par le savant Graham Bell le téléphone traditionnel connaîtra plusieurs évolutions. Devant les limites que connaîtra le téléphone fixe à savoir le manque de mobilité et d'aisance, la nécessité d'un téléphone mobile se fera sentir. Ainsi, depuis les années 1940 jusqu'à nos jours, nous assisterons à la naissance et à l'évolution de plusieurs standards de la téléphonie mobile.

En 1950, le monde de la téléphonie est révolutionné par la mise en place du premier service de radiotéléphone aux Etats-Unis. Mais celui-ci connaîtra plusieurs limites dont la principale est l'utilisation restreinte des ressources, qui limitent le nombre d'abonnés. Pour parer à ces difficultés, de nouveaux concepts sont introduits à partir de 1964 à savoir le partage des ressources qui consistera aux partages des bandes de fréquence radio entre un plus grand nombre d'utilisateurs. Ainsi, le réseau alloue un canal radio à chaque communication uniquement pendant sa durée. Ceci permettra d'obtenir un nombre d'abonnés supérieur au nombre de canaux radio disponibles. A partir de 1982, la Conférence Européenne des Postes et Télécommunications (CEPT) crée le Groupe Spécial Mobile (GSM), qui a pour mission la spécification des normes pour les radiocommunications. Celui-ci sera l'ancêtre de la normalisation de la norme de téléphonie GSM (Global System for Mobile Communication) que nous connaissons aujourd'hui. C'est parti pour une course vers l'innovation. [1] Aujourd'hui, face au besoin capital de l'internet dans le quotidien, l'internet mobile a vu le jour. Ainsi, beaucoup d'autres services utiles à la vie quotidienne de l'homme intègrent les terminaux mobiles au grand plaisir des abonnés.

## **I.3 Les différents standards de la téléphonie mobile**

### **I.3.1 Première génération**

#### **a) Présentation**

Utilisant les systèmes analogiques, les téléphones dits de premières générations ou 1G servaient uniquement qu'à la transmission de la voix. Ils étaient assez volumineux. Les standards de première génération voient leur apparition avec l'AMPS (Advanced Mobile Phone Service) présenté par la compagnie Bell Téléphone en 1971. Suivront d'autres systèmes comme le TACS (Total Access Communication System), ETACS (Extended Total Access Communication System) etc. [2]

La transmission de ce système d'alors était basée sur la FDMA ou AMRF afin de permettre l'accès simultané de plusieurs utilisateurs au même spectre radio. La bande de fréquence était comprise entre 15 et 30 kHz. Ainsi l'utilisateur se voit attribuer une fréquence spécifique au début de sa communication. Il la conservera pendant toute la durée que prendra sa communication. Aucun autre utilisateur ne peut donc utiliser cette bande pendant cet instant précis. Les cellules qu'utilisaient les réseaux 1G étaient particulièrement grandes, environ 50 Km de rayon. Cela nécessitait donc des stations à forte puissance d'émission importante et donc des terminaux mobiles de taille et de poids conséquents [1].



## **b) Avantages et inconvénients**

Cette technologie était assez simple et présentait de vaste champ de couverture réseaux. Cependant elle a présenté de nombreux inconvénients. Du fait de son orientation analogique, elle s'avère assez couteuse en termes de consommation énergétique. La sécurité est difficile à maîtriser car il est facile de synthétiser une fréquence utilisée et écouter la communication. Aussi, l'utilisation du multiplexage par répartition de fréquence limite la capacité d'utilisateur. En outre, Les différents réseaux analogiques qu'utilisait cette norme différaient d'un pays à un autre ce qui entraînait une incompatibilité entre eux. Face à toutes ces difficultés d'autres standards verront le jour avec des offres meilleures [2].

## **I.3.2 Deuxième génération**

### **I.3.2.1 Le GSM**

Le GSM pour Global System for Mobile Communication est introduit au début des années 1980 par le « Groupe Spécial de Mobile ». Cette norme 2G prend son essor à partir de 1991. Son objectif principal est de parer aux difficultés rencontrées dans le standard précédent. Son effet de révolution dans la téléphonie mobile est dû au fait qu'il est basé sur un système numérique et offre une meilleure qualité de service aux abonnés. Parmi ces qualités on peut recenser :

- Une grande capacité d'utilisateurs
- Une utilisation optimale du spectre, ce qui optimise la fluctuation d'utilisateurs
- La bande de fréquence utilisée varie d'un continent à un autre
- Une disponibilité assez large etc...

En Europe la bande de fréquence est située autour de 900 MHz en raison de 890-915 MHz en Uplink et 935-960 MHz en Downlink [3].

Chaque communication utilise une bande de 200 kHz de largeur. Cela revient donc à 124 canaux fréquentiels disponibles et à répartir entre les opérateurs de téléphonie mobile. Devant l'augmentation du nombre d'abonnés, il a été nécessaire d'ouvrir d'autres canaux sur d'autres bandes. Cela se fera aux alentours des 1800 MHz (1710-1785 en Uplink et 1805-1885 en Downlink) d'où l'introduction du système DCS-1800 pour Digital Communication Système) ou le GSM 1800 qui reste identique au GSM 900 en terme de protocole et de service.

Par contre aux Etats-Unis la bande de fréquence en Uplink se situe entre 1850 et 1910. En Downlink ce sera entre 1930 et 1990 MHz. Le débit maximal qu'autorise le GSM est 9,6 Kbits/s

A la différence de la 1<sup>ère</sup> Génération, le GSM est basé sur deux techniques d'accès multiples : TDMA et FDMA pour mieux partager la bande de fréquence en sous bande ou porteuse. Chaque porteuse est divisée en huit intervalles de temps ou slots qui correspondent à huit canaux successifs. Chacun de ces canaux sera utilisé pour une communication. Le GSM utilise un taux de transmission de 270kbits/s sur l'interface air. La modulation de symbole utilisé ici est la GMSK. L'une des innovations principales que présente le GSM est le transfert de données numériques : Le message texte (SMS : Short Message Service) et les messages multimédias (MMS : MultiMedia Message Service) [2].

### a) Architecture GSM

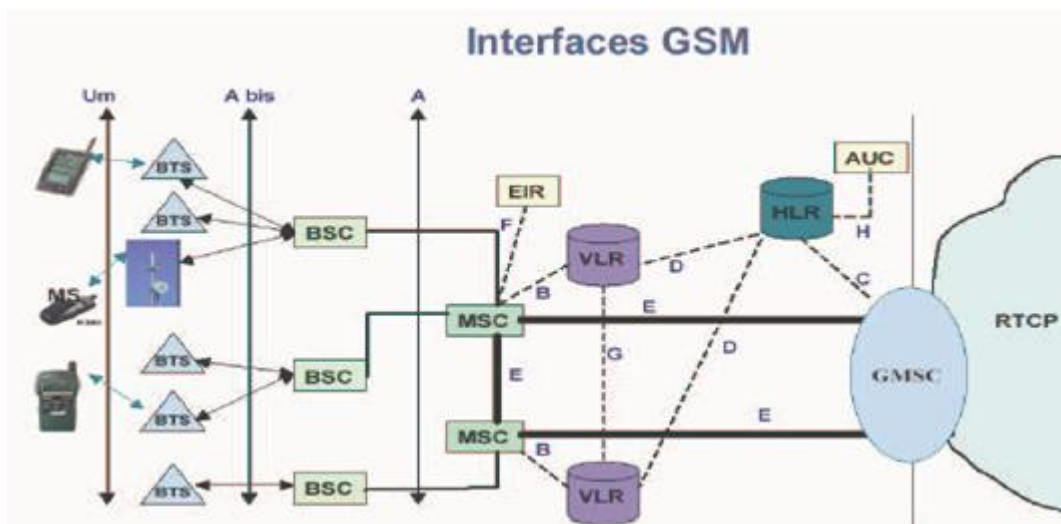


Fig. I.1 Architecture du GSM [4]

L'architecture se compose de trois sous-ensembles : le sous-système radio, le sous-système réseaux et le sous-système opérationnel et de maintenance OSS [1]

- **Le sous-système radio BSS**

Le sous-système radio est l'ensemble des éléments qui gère la fonction de transmission et d'échange des données, par la voie radio. Il est constitué essentiellement de la station de base BTS et d'un contrôleur de puissance qui est la station BSC.

- La station de Base BTS : (Base Station Transceiver) est constituée d'antennes émettrices et réceptrices de la cellule. Elle s'occupe de la transmission radio à travers les fonctions de modulation, démodulation, égalisation, codage etc. Elle est le lien entre le mobile et

l'interface Air. Elle contrôle les mesures radio de vérification de la communication établie par les abonnés. Elle transmet ensuite ces mesures à la BSC [2].

- La Station BSC (Base Station Controller) est le contrôleur auquel sont reliés un ensemble de stations de base (BTS). Sa fonction essentielle consiste en la gestion des ressources radio. Elle se charge de l'allocation des canaux, utilise les mesures effectuées par la BTS pour contrôler les puissances d'émission du mobile et de la BTS elle-même. Le contrôleur BSC s'occupe aussi des handover et réalise les concentrations vers le MSC [6].

- **Le sous-système réseaux (NSS)**

Il s'occupe des fonctions de routage et de commutation. Il permet l'accès au réseau public RTCP. Il gère aussi les fonctions de confidentialité, de sécurité et de mobilité qui sont introduites dans la norme GSM. Il se compose du MSC (Mobile Switching Center) qui est le commutateur de données et de signalisation. Il gère plusieurs BSC et est associé à d'autres équipements du sous-système réseaux comme le HLR qui est une base de données de localisation, l'AUC qui est une base de données de gestion de la sécurité, l'EIR qui gère l'identité des terminaux mobiles des abonnés et le VLR pour assurer la mobilité des usagers [1], [6].

- **Le Centre d'exploitation et de maintenance (OSS)**

Il assure la gestion et la supervision du réseau à travers la : [1]

- La détection des pannes
- Mise en service des sites
- Modification de paramétrage
- Réalisation de statistiques

Cette partie du réseau regroupe trois activités principales de gestion : la gestion administrative, la gestion commerciale et la gestion technique.

Outre les innovations citées plus haut, le GSM a introduit de nouveaux concepts qui permettent une meilleure mobilité:

- Le concept d'itinérance : reconnaissance à tout instant de la localisation de l'abonné.
- Le concept de handover : permettant le passage d'une zone couverte à une autre.

## **b) Avantages et Inconvénients**

Le GSM a été une révolution pour la téléphonie mobile. Il a apporté des nouveaux services essentiels au quotidien de l'homme. Comme les SMS, les MMS, les services multimédias (météo, horoscope, consultation de compte bancaire etc...) Malheureusement son faible débit de 9,6 Kbit/s ne permet pas d'avoir l'accès à de grands services multimédia et internet. L'un des problèmes majeurs est la Monopolisation des ressources. Un certain nombre de ressources sont monopolisées dans tout le réseau pour un seul utilisateur et pendant toute la durée de sa session, alors que ces ressources ne sont qu'épisodiquement réellement utilisées. Il y a donc gaspillage des ressources, notamment des ressources radio, rares et chères, non utilisées à cent pour cent de leur capacité. Devant ces limites cette norme connaîtra des améliorations.

### **I.3.2.2 Le GPRS (Général Packet Radio Service)**

Face aux incapacités constatées dans le GSM, il est créé en décembre 1998 le 3GPP « 3rd Generation Partnership Project » qui est une coopération signée entre organismes de standardisation régionaux en Télécommunications tels que l'ETSI(Europe), ARIB-TTC(Japon), CCSA(Chine), ATIS (Amérique du Nord) et TTA (Corée du Sud). Le but de cet organisme vise à produire des spécifications techniques dans le but de faire évoluer la norme GSM de 2<sup>ème</sup> génération vers les 3<sup>ème</sup>s générations. Ainsi plusieurs améliorations du GSM ont été proposées et déployées. Le GPRS est l'une des premières concrétisations du 3GPP. [5]

Le GSM a été conçu pour de la téléphonie mobile, autrement dit pour des communications en mode circuit à faible débit et, si possible, au moyen de terminaux à coûts réduits. Certains choix techniques du GSM sont faits en conséquence, notamment en matière d'architecture réseau et d'interface (radio essentiellement). Ces choix se révèlent toutefois contraignants pour les services de données (transfert de fichier, vidéo, etc.) qui n'autorisent en GSM que le mode circuit pour des débits faibles (9600, 4800 ou 2400 bits/s). Pour améliorer l'efficacité du transfert de données le GPRS fondée sur l'interface radio du GSM, mais développant un partage de ressources dynamique adapté au trafic sporadique, introduit une architecture réseau en mode paquet. [1]

Le GPRS apparut en 2000 avec la release 97 permet d'atteindre un débit plus élevé. Il introduit pour la première fois l'envoi de flux de données dans le réseau et un protocole de transmission par paquets. Cette méthode est mieux adaptée pour une transmission de données. Ainsi on assiste à des débits de 171,2 Kbits en Théorie et en pratique 48 Kbits en downlink et 14 Kbits en Uplink avec un service web, une transmission vidéo, un accès à internet.

C'est la naissance de l'internet mobile. Grâce au multiplexage on obtient une simultanéité des services. L'on peut donc utiliser une session GSM et une session GPRS [5].

## a) Architecture GPRS

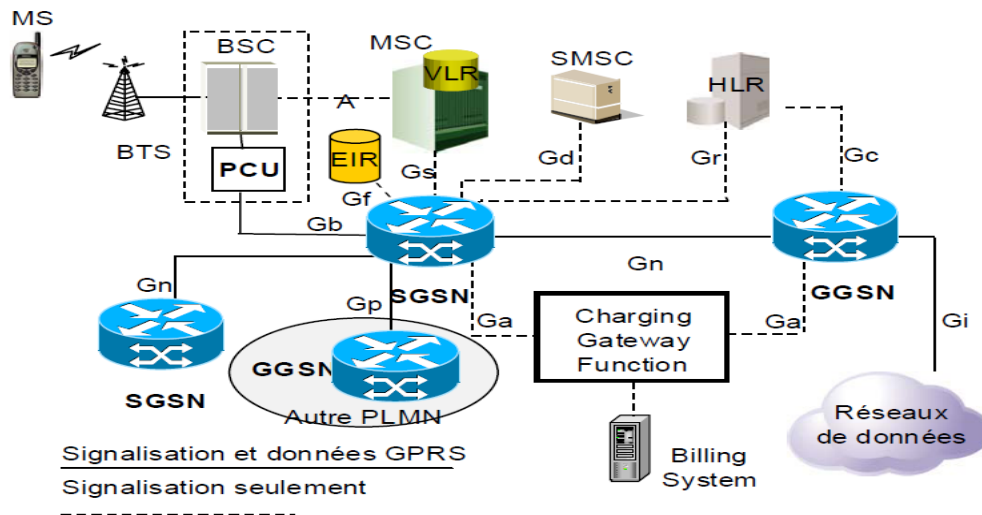


Fig. I.2 Architecture GPRS [7]

Gb : Interface entre BSS (Base Station System) et SGSN (Serving GPRS Service Node).

Gr : Interface entre SGSN et HLR.

Gp : Interface entre PLMN et PLMN.

Gs : Interface entre SGSN et MSC.

Gi : Point de référence entre le réseau GPRS et un réseau externe (Internet par exemple).

Gf : Interface entre SGSN et EIR

Gn : Interface entre SGSN et GGSN

Gd : Interface entre SGSN et SMS Center

Ga : Interface entre SGSN et SMS Center

Gc : Interface entre GSN (S ou G) et Charging Gateway

Le réseau GPRS et le réseau GSM fonctionnent en parallèle : le premier est utilisé pour le transport des données, et le second pour les services classiques de voix. Tous deux utilisent les mêmes équipements BSS, c'est-à-dire les stations de base BTS et leurs contrôleurs BSC. Le réseau GPRS est en premier lieu un réseau IP qui se constitue de routeur IP. Il comprend : [7]

- Un Nœud de Service GPRS (SGSN : Serving GPRS Support Node) qui est relié à un ou plusieurs BSS. Il se charge de la mobilité du terminal à travers les cellules et la conversion des données du terminal en type IP et réciproquement.
- Un Nœud de Passerelle GPRS (GGSN : Gateway GPRS Support Node) relié à un ou plusieurs réseaux de données (Internet ou autres). C'est un routeur qui permet aux paquets venant de données externes d'être acheminés vers le SGCN du destinataire.
- Un module BG (Border Gateway) qui est un nœud passerelle permettant de relier un réseau GPRS à un réseau fédérateur interconnectant différents réseaux GPRS. Il joue aussi le rôle de supplémentaire de sécurité.
- Un réseau fédérateur est l'ensemble des GGSN, SGSN et des routeurs IP éventuels.

Un module logiciel est ajouté au BSC, c'est le PCU (Packet Contrôl Unit). Il fait la différence entre les données circuit du GSM et les données paquets du GPRS.

Entités GSM/GPRS	Logiciel	Matériel
BTS	Extension requise	Aucun changement
BSC	Extension requise	Interface PCU
MSC/VLR	Extension requise	Aucun changement
HLR	Extension requise	Aucun changement
<b>Nouvelles entités</b>		
MS	Mobile Station	
SGSN	Serving GPRS Support Node	
GGSN	Gateway GPRS Support Node	
CGF	Charging Gateway Function	
OMC-G	Operations and Maintenance Centre GPRS	

**Tableau I.1** : Evolution du GSM au GPRS [7]

### b) Avantages et Inconvénients

L'innovation de ce réseau permet de considérer le réseau GSM comme un réseau de transmission de données par paquets avec un accès radio et des terminaux mobiles. Il permet une compatibilité avec des protocoles IP et X25. L'avantage majeur est la transmission par paquet sur la voie radio qui permet d'économiser la ressource radio. De ce fait le terminal peut recevoir ou émettre des données à tout moment sans qu'un canal radio soit monopolisé en permanence comme était le cas en GSM. Malheureusement le débit pratique est limité à 48 Kbit/s ce qui ne permet pas un accès aisé aux services multimédias.

#### I.3.2.3 EDGE (Enhanced Data Rate for GSM Evolution)

La norme EDGE a été mise en place après le GPRS par le 3GPP à la release 98. On la labélise sous l'appellation de 2,75 G. Elle utilise aussi une technologie en mode paquet offrant des débits de 384 Kbits/s pour un utilisateur immobile. Développée initialement par Ericsson, puis reprise par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute), la technologie EDGE permet de tripler le débit de l'interfaceradio entre les terminaux et un BTS (Base Transceiver Station) par le biais d'un processus de modulation. Cette solution sera d'une grande utilité pour les opérateurs n'ayant pas pu obtenir une Licence UMTS (3 G) [5], [8].



### I.3.3. Troisième Génération

#### I.3.3.1 UMTS

Après ces évolutions du GSM considérées toujours comme technologie de 2<sup>nd</sup> génération, l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) viendra complètement bouleverser les systèmes de téléphonie mobile à la release 99 [5]. Tout le réseau mobile a été repensé dans sa totalité dans cette nouvelle norme qui marque ainsi le passage de la 2G à la 3G. Cette norme disponible depuis les années 2002, présente des avantages meilleurs que les précédentes. Elle présente les caractéristiques suivantes [2] :

- Utilisation de la plage de fréquence dans l'ordre des 2000 MHz
- Utilisation de larges canaux de l'ordre de 5MHz contre 200KHz pour le GSM
- Utilisation du W-CDMA (amélioration de la TDMA)
- Accès rapide à internet depuis les terminaux mobiles
- Compatibilité avec les normes précédentes
- Optimisation des problèmes de saturation de réseaux

Ce standard permet l'accès à bon nombre d'applications et services dont :

- Les appels Visio qui permettent de voir en temps réel notre interlocuteur
- L'option de visioconférence permettant d'entretenir des conversations avec plusieurs interlocuteurs à la fois et de les apercevoir.
- Fax et messagerie rapide
- Possibilité d'achat d'article en ligne
- Accès à des bases de données.

L'interface radioélectrique entre le mobile et le Nobe B (équivalent de la BTS) peut présenter deux types de solutions CDMA.

- Une interface W-CDMA en mode FDD (Fréquence Division Duplex)
- Une interface TD-CDMA en mode 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 pour la voie descendante du FDD
- 1900-1920 MHz et 2020-2025 MHz pour le TDD

En FDD les voies montante et descendante sont affectées à deux bandes de fréquences distinctes, espacées de 190 MHz.

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 même bande de fréquence de 5MHz le débit utile pour chaque canal est de 384 Kbit/s en W-CDMA et de 144 en TD-CDMA.

### a) Architecture du réseau UMTS [2]

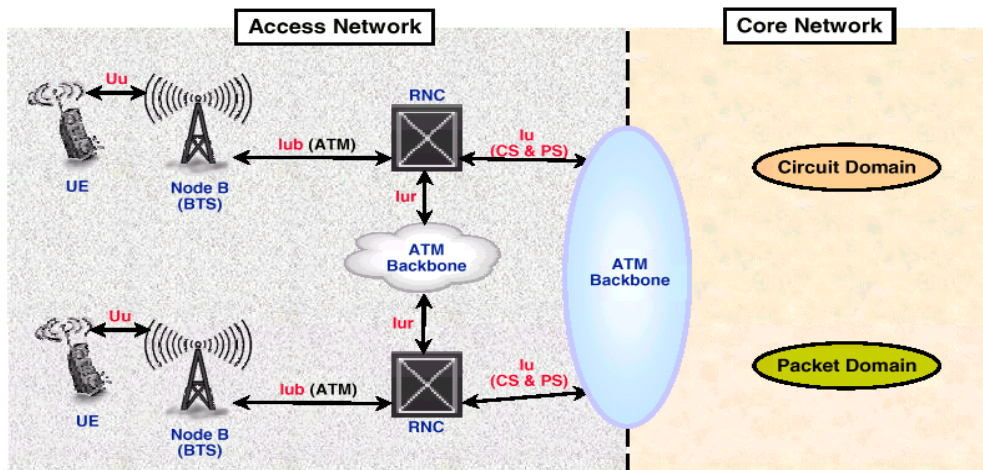


Fig. I.3 Architecture UMTS [11]

- **La carte USIM**

C'est l'équivalent de la carte SIM dans le GSM. Elle assure la sécurité du terminal et la confidentialité des communications.

- **Le réseau d'accès radio (UTRAN)**

Il comporte les deux éléments suivants : [5],[2]

- Le Node B : qui est l'antenne équivalente de la BTS en GSM. Cette station se charge de gérer la couche physique de l'interface radio. Le Node B régit le code de canal, l'entrelacement, l'adaptation du débit et l'étalement. Le Node B communique avec le mobile sous l'interface dénommée Uu.
- Le RNC (Radio Network Controller) : C'est le contrôleur des Node B. Il est l'équivalent de la BSC en GSM. Il gère les ressources radio de la zone qu'il contrôle, c'est-à-dire les ressources de la zone de couverture de tous les nodes B auxquels il est rattaché. Il assure la mobilité des usagers et la concentration de trafic. Il gère le contrôle et la congestion des différents Nodes

B et assure le contrôle d'admission et d'allocation des codes pour les nouveaux liens radio. Il s'interface avec le réseau pour les transmissions en mode paquet et en mode circuit.

L'ensemble des Nodes B et RNC constitue l'équivalent de la BSS en réseau GSM.

- **Le réseau cœur**

Il s'appuie sur les éléments de base du réseau GSM et GPRS. Le réseau cœur est en charge de la communication et du routage des communications (voix et données) vers le réseau externe. Le réseau cœur se décompose en deux parties : le domaine circuit dans un premier temps et le domaine paquet. [2]

- Le domaine Circuit (DC) : Il permet la gestion des services en temps réels dédiés aux conversations téléphoniques (vidéo-téléphoniques), jeux application multimédia. Ces applications nécessitant un temps de transferts rapide, le débit du mode domaine circuit est de l'ordre de 384 Kbits/s. La structure s'appuie sur les principaux éléments du GSM/MC/VLR (bases de données existantes) afin d'avoir une connexion directe vers le réseau externe.

- Le domaine Paquet (DS) : il permet de gérer les services qui ne sont pas en temps réels. Il s'agit particulièrement de la navigation internet, la gestion des jeux en réseaux et l'accès et utilisation des e-mails.

Ces applications sont moins sensibles au temps de transfert, c'est la raison pour laquelle les données transitent en mode paquet. Le débit du domaine paquet est de l'ordre de 2 Mbits/s.

## **b) Avantages et Inconvénients**

Le réseau UMTS est complémentaire aux réseaux GSM et GPRS. Il couvre les fonctionnalités nécessaires aux services de type voix en mode circuit. Ce réseau a apporté les premières fonctionnalités à la mise en place de services de type Data en mode paquets. Malheureusement l'investissement en architecture réseau est conséquents car le mode de communication entre les terminaux 3G et le Node B (ou BTS) est différent des normes précédentes.

### **I.3.3.2 HSDPA**

Le High Speed Downlink Packet Access (abrégé en HSDPA) est un protocole pour la téléphonie mobile il est dit 3.5G, 3G+, ou encore turbo 3G dans sa dénomination commerciale. Il offre des performances dix fois supérieures à la 3G dont il est une évolution logicielle. Cette évolution permet d'approcher les performances des réseaux DSL (*Digital Subscriber Line*). Il offre des débits

descendants jusqu'à 14,4 Mbit/s en théorie et 3,6 en pratique avec la release 5. Il est basé sur la technologie de communication *WCDMA* (*Wideband-Code Division Multiple Access*) [9], [11].

### **I.3.3.3 HSUPA**

High Speed Uplink Packet Access (*HSUPA*) est aussi un protocole de téléphonie mobile de troisième génération (3G) dont les spécifications ont été publiées par le 3GPP dans la « *release 6* » du standard UMTS. HSUPA peut se présenter comme une variante de HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) sur la voie montante. HSUPA, présenté comme le successeur de HSDPA, porte le débit montant à 5,8 Mbit/s théorique, le flux descendant reste de 14 Mbit/s comme en HSDPA. L'intérêt d'HSUPA est d'offrir la possibilité d'émettre facilement des contenus volumineux (photos, audio, vidéo) vers d'autres mobiles mais également vers les plates-formes de partage sur Internet. Cette technologie est un pas significatif vers l'accès aux applications Web 2.0 sur l'Internet mobile, elle accompagne d'ailleurs le développement de pages adaptées aux mobiles par les acteurs de sites collaboratifs [10], [11].

### **I.3.3.4 HSPA**

HSPA (High Speed Packet Access), aussi appelé 3G+ dans sa dénomination commerciale, est la liaison de deux protocoles utilisés en téléphonie mobile pour améliorer les performances obtenues avec la 3G : High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) et High Speed Uplink Packet Access (HSUPA).

## **I.4 LTE (Long Term Evolution)**

### **I.4.1 Présentation**

Devant l'objectif de proposer des débits répondants aux besoins croissant des mobinautes, plusieurs évolutions voient le jour. Après l'apparition de la norme 3G et avec toutes les limites que celle-ci présente une autre difficulté majeure est rencontrée : la gestion de la mobilité. De nos jours les utilisateurs sont de plus en plus mobiles. Il en résulte donc un grand problème d'optimisation du débit et de la qualité de service. Ceci sera donc une grande motivation pour mettre en œuvre un autre système architectural. Le standard LTE pour Long Term Evolution. C'est un projet lancé depuis 2004 au sein du 3GPP. En 2007, le projet LTE est passé de l'étude de faisabilité aux premières spécifications techniques. Ainsi en Décembre 2008, après plusieurs améliorations, les spécifications sont enfin suffisamment mûries pour la mise œuvre commerciale du LTE, pour donner naissance à la Release 8 qui est la norme 3GPP LTE [5].

Ce standard s'apparente à la 4G, mais on le considère comme étant de la 3.9 G. Par contre son évolution LTE Advanced est typiquement de la 4<sup>ème</sup> génération 4G. Pour parer à toute contrainte de communication (faible débit, disponibilité) LTE propose un débit descendant minimal de 10Mbps pour atteindre les 300Mbps en condition optimale. Les débits montant ne sont pas en reste en partant de 5Mbps jusqu'à 75Mbps.

### **I.4.2 Objectif**

Axé sur l'amélioration de la technique d'accès radio et l'optimisation de l'architecture des systèmes de troisième génération existants UMTS, la norme LTE se donne pour objectif principale d'assurer à l'utilisateur une mobilité maximale. Une fois connecté, en utilisant le réseau disponible, celui-ci pourra passer d'un réseau à un autre sans interruption de la communication et avec une même qualité de service à tout moment. Les principaux objectifs de ce Standard sont :

- Assurer la continuité de la session en cours
- Réduire les délais et le trafic de signalisation
- Fournir une meilleure qualité de service
- Optimiser l'utilisation des ressources
- Garantir la continuité de la session en cours
- Réduire le délai de relève, le délai de bout-en-bout, la gigue et la perte de paquets
- Fournir une bonne qualité de service aux usagers
- Minimiser le coût de signalisation

La technologie LTE repose sur une combinaison de technologies sophistiquées ce qui permet d'élever nettement le niveau des performances (haut débit et latence) par rapport aux réseaux précédents. Le multiplexage OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) apporte une optimisation dans l'utilisation des fréquences en minimisant les interférences. Le recours à des techniques d'antennes multiples (déjà utilisés pour le Wi-Fi ou le WiMAX) permet de multiplier les canaux de communication parallèles, ce qui augmente le débit total et la portée.

La technologie LTE fonctionne dans une variété de fréquences selon la zone géographique couverte : 700 MHz aux Etats-Unis pour le réseau de Verizon Wireless, 2,6 GHz et 800 MHz en Europe, et 2,1 GHz pour le réseau japonais de NTT Docomo.

En France, les opérateurs postulent pour l'attribution des sous-bandes 2500-2570 MHz et 2620-2690 MHz et des dessous-bandes 791- 821 MHz et 832-862 MHz qui sont utilisées en mode de duplexage fréquentiel (mode FDD). La bande 2,6 GHz comprend une quantité de fréquences suffisante pour offrir des capacités importantes nécessaires à l'acheminement du trafic en zones urbaines denses. La seconde bande (800 MHz) présente des caractéristiques de propagation

radioélectrique favorable à la réalisation d'une couverture étendue, à partir d'une densité moindre d'antennes relais qu'avec les fréquences 2,6 GHz. [12]

	Débit lien radio descendant(Mbits/s)	Débit lien radio montant(Mbits/s)	Latence (ms)	Version des spécifications 3GPP
LTE	100	50	~ 10	3GPP 8
LTE-Advanced	1000	500	? 5	3GPP 10

**Tableau I.2 :** les débits des liens radio LTE et LTE Advanced [12]

Les spécifications LTE prévoient le fonctionnement en mode dual : multiplexage de fréquences (FDD) et multiplexage temporel (TDD). En mode FDD (Frequency Division Duplexing), l'émission et la réception se font à des fréquences différentes. En mode TDD, l'émission et la réception transitent à une même fréquence, mais à des instants différents. Nous approfondirons ces notions dans le chapitre suivant.

### I.4.3 Caractéristiques de la norme LTE

Par rapport à la norme UMTS actuelle, l'une des principales nouveautés du LTE réside dans l'introduction du procédé de codage par répartition en fréquences orthogonales sous forme de multiples sous-porteuses OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour les liaisons descendantes et SC-FDMA (Single Carrier -Frequency Division Multiple Access), une méthode voisine de l'OFDM, pour les liaisons ascendantes. Ces procédés permettent l'exploitation du système avec des largeurs de bande du canal allant de 1,4 MHz à 20 MHz (largeurs de bandes de 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz) et l'utilisation de systèmes de radiocommunication mobile dans diverses largeurs de bande, sans qu'ils soient liés à l'écart habituel entre les canaux de 5 MHz. L'illustration ci-dessous montre l'évolution de l'efficacité du spectre en liaison descendante avec différentes technologies de radiocommunication mobile.



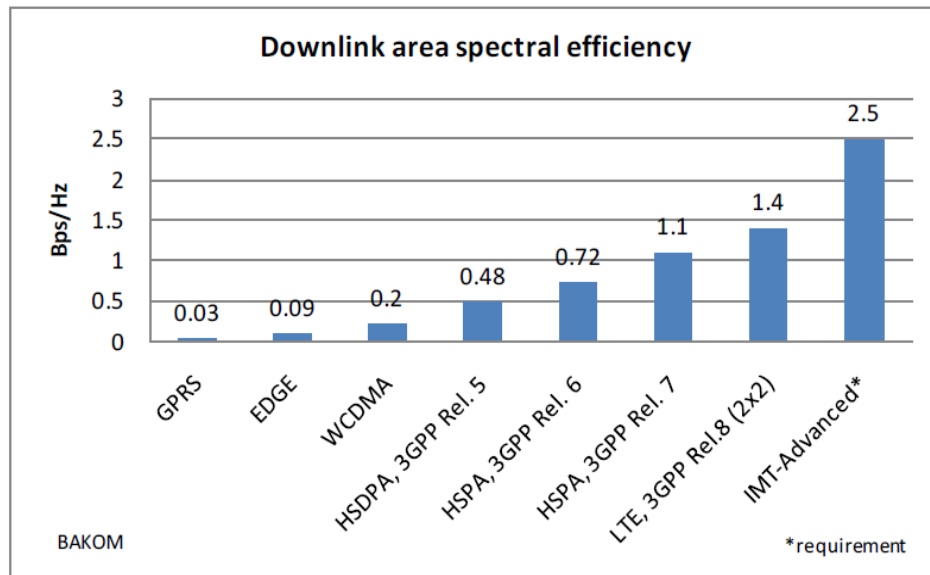


Fig. I.4 Evolution de l'efficacité spectrale

Grâce à des largeurs de bande flexibles et une division très fine des porteuses, le LTE atteint des vitesses nettement plus élevées que ses prédécesseurs. Il permet d'adapter rapidement les paramètres radio aux canaux radio en recourant au nouveau procédé de codage OFDMA. Avec ce procédé, le LTE constitue aussi une plateforme remarquable pour la transmission de services de radiodiffusion (Multicast, Broadcast) dans les réseaux de radiocommunication mobile. Comme nous l'avons cité plus haut dans ce standard il est possible de franchir la barre des 100 Mbit/s en liaison descendante (326 Mbit/s en liaison descendante et 86 Mbit/s en liaison ascendante en théorie). Cette augmentation est possible surtout grâce à l'utilisation d'un nombre d'antennes pouvant aller jusqu'à 8 dans la station de base et le terminal (MIMO) [13].

Le LTE offre non seulement des débits nettement plus élevés et une meilleure utilisation du spectre que ses prédécesseurs, mais aussi un temps de transfert des paquets de l'expéditeur au destinataire (temps de latence) d'environ 5 millisecondes, au lieu des 70 millisecondes nécessaires avec l'UMTS. Ceci a des effets particulièrement positifs sur la réactivité du réseau et sur les services en temps réel comme la transmission vocale (VoIP) qui est a été introduite [12], [14].

- **Une mobilité à toute épreuve**

L'un des challenges des réseaux mobiles est d'être disponible partout et tout le temps. Pour cela la norme LTE a été prévue pour fonctionner aussi bien dans les zones denses que dans les zones rurales. Une cellule LTE peut couvrir 5km de diamètre dans les zones fortement peuplées et s'étendre jusqu'à 100km dans les zones les plus reculées. L'autre partie de ce challenge est la vitesse. Dans les transports à grande vitesse comme le TGV par exemple, les réseaux actuels montrent rapidement

leurs limites avec des pertes de services fréquentes, malgré la densité des relais à proximité. Le réseau LTE est lui prévu pour une continuité de service jusqu'à 350km/h. [12]

- **Des temps de réponse rapides**

L'utilisation d'une communication à des débits toujours plus élevés ne peut être plus optimale si le transfert de données se fait dans un délai trop long. En effet les sites et services mobiles sont actuellement fait pour être peut coûteux en bande passante. Pour améliorer l'expérience internet mobile, il faut donc que le réseau soit en mesure d'envoyer des fichiers rapidement. La LTE propose pour cela une latence moyenne de 20ms et peut descendre en dessous des 5ms en condition optimale. Tandis qu'un réseau UMTS a une latence moyenne de 300ms. Cette rapidité en réponse s'observe aussi dans le temps de transition entre 2 relais (handover latency) qui doit être très court. La norme LTE propose pour cette transition un délai inférieur à 100ms à une vitesse de 350km/h.

- **La voix sur IP**

La norme LTE propose un service de voix sur IP. En effet ce standard s'appuie sur un réseau de transport de paquet IP. Il n'est pas prévu de mode d'acheminement pour la voix, autre que la VoIP, contrairement à la 3G qui transporte la voix en mode circuit (à la manière des réseaux de téléphonie fixes classiques). Il conviendra donc de procéder à une adaptation du matériel existant aux nouvelles conditions de fonctionnement. La mise au point de spécifications adaptées au trafic téléphonique existant (non IP) fait d'ailleurs l'objet de débats intenses entre opérateurs et équipementiers télécoms.

Deux options techniques existent pour acheminer le trafic téléphonique classique sur les réseaux LTE. La fonction repli en mode circuit (circuit switch fallback), qui doit être ajoutée aux futurs réseaux radio LTE, consiste à basculer un appel téléphonique (ou des SMS) sur les réseaux cellulaires existants 2G et 3G. L'autre initiative, baptisée Voice over LTE via Generic Access (Volga), consiste à transporter voix et SMS dans un tunnel de données au travers du réseau LTE [12].

- **Débit de l'interface radio**

Comme on l'a dit tantôt l'interface radio (E-UTRAN) doit pouvoir supporter un débit instantané de 100 Mbit/s en considérant une allocation de bande de fréquence de 20 MHz pour le sens descendant et un débit maximum instantané de 50 Mbit/s en considérant aussi une allocation de bande de fréquence de 20MHz pour le sens montant. L'efficacité du spectre sera de 5 bit/s/Hz pour le sens descendant et 2,5 bit/s/Hz pour le sens montant [12].

- **Coexistence et Interfonctionnement avec la 3G**

Le handover entre E-UTRAN (LTE) et UTRAN (3G) doit être réalisé en moins de 300 ms pour les services temps-réel et 500 ms pour les services non temps-réel. Il est clair qu'au début du déploiement de la LTE peu de zones seront couvertes. Il s'agira pour l'opérateur de s'assurer que le handover entre le réseau LTE et la 2G/3G est toujours possible [13].

#### **I.4.4 Architecture du Standard LTE**

Le réseau est composé du Cœur réseau (Core Network CN) et du réseau d'accès. Tandis que le Cœur réseau se compose de beaucoup de nœuds logiques, le réseau d'accès se compose d'essentiellement juste un nœud, le Node évolué (eNodeB) qui est l'équivalent de la BTS en GSM et qui se relie à l'UEs. Chacun de ces éléments de réseau est relié à l'ensemble au moyen d'interfaces qui sont normalisées afin de permettre l'interopérabilité à plusieurs fournisseurs. Ceci donne à des opérateurs de réseau la possibilité de faire des choix dans leurs réalisations physiques de dédoubler ou fusionner ces éléments de réseau logiques selon des considérations commerciales.

En réalité, l'ensemble de ce réseau s'appelle EPS (Evolved Packet System).

##### **I.4.4.1 EPS**

Comme nous venons de le voir l'EPS (Evolved Packet System) représente l'ensemble du réseau à savoir LTE et SAE. Il a les caractéristiques suivantes :

- Il possède une architecture plate et simplifiée comparée à celle hiérarchique 2G/3G puisque la fonction de contrôleur d'antenne disparaît. La seule entité présente dans l'accès est l'eNodeB qui peut être assimilé à un nodeB+RNC.
- Il s'agit d'une architecture uniquement paquet comparée à l'architecture 2G/3G circuit et paquet.
- Il permet une connectivité permanente tout-IP comparée à des contextes PDP temporaires ou permanents en 2G/3G dans le domaine paquet
- Son interface radio est totalement partagée entre tous les usagers en mode ACTIF comparée à des ressources dédiées et partagées dans l'architecture 2G/3G.
- Il permet des handover vers les réseaux 2G/3G et CDMA/CDMA2000 afin d'assurer des communications sans couture en environnement hétérogène.

Les grandes fonctions assurées par l'EPS sont :

- **Fonctions de contrôle d'accès réseau** : Elles permettent d'authentifier l'utilisateur lorsque ce dernier s'attache au réseau, met à jour sa tracking area, et demande des ressources pour ses communications. Elles permettent aussi de réaliser la taxation de l'utilisateur en fonction de l'usage des

ressources et en fonction des flux de service émis et reçus. Elles permettent enfin de sécuriser les flux de signalisation et les flux média des usagers en les encryptant entre l'UE et l'eNodeB.

- **Fonctions de gestion de la mobilité** : Elles permettent à l'UE de s'attacher, de se détacher et de mettre à jour sa tracking area.
- **Fonctions de gestion de session** : Elles permettent d'établir des default bearers et des dedicated bearers afin que l'UE dispose de connectivités IP pour ses communications.
- **Fonctions de routage de paquet et de transfert** : Elles permettent d'acheminer les paquets de l'UE au PDN GW ainsi que du PDN GW à l'UE.
- **Fonctions de gestion de ressource radio** : Elles permettent l'établissement et la libération du RAB (Radio Access Bearer) entre l'UE et le Serving GW à chaque fois que l'UE souhaite devenir actif pour communiquer.

Le réseau EPS consiste en les entités suivantes :

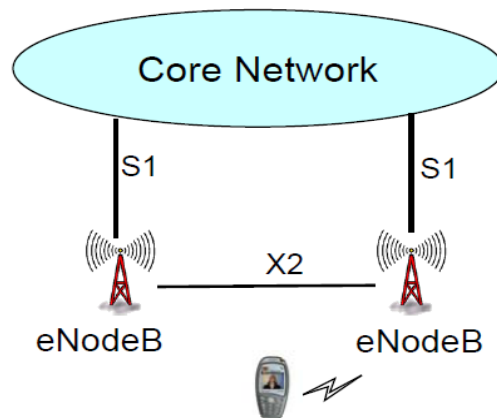
- ENodeB
- Mobility Management Entity (MME)
- Serving Gateway
- Packet Data Network Gateway (PDN GW)
- Home Subscriber Server (HSS)
- Policy and Charging Rules Function (PCRF)

L'EPS (Evolved Packet System) est composé de deux parties : le réseau évolué d'accès radio LTE, et le réseau cœur évolué appelé SAE (System Architecture Evolution) [15], [16].

### a) Accès radio LTE

Comme nous l'avons vu plus haut, afin d'offrir des débits élevés dans des conditions optimisées, le LTE emploie bon nombre de techniques. Le LTE respecte les délais requis par le trafic temps-réel. Cette technologie gère la mobilité des utilisateurs en exécutant le Handover à une vitesse allant jusqu'à 350 km/h. Le LTE a pris en charge l'interconnexion et l'interopérabilité avec les normes 2G et 3G, et les réseaux CDMA-2000. Aussi son utilisation de plusieurs bandes de fréquences allant de 1.4 jusqu'à 20 MHz lui permet de couvrir de grandes surfaces. [15]

Le réseau d'accès de LTE, E-UTRAN, se compose simplement d'un réseau de eNodeB, comme illustré sur la figure ci-dessous.



**Fig. I.5** Architecture de l'E-UTRAN [16]

- **L'eNodeB**

L'eNodeB est responsable de la transmission et de la réception radio avec l'UE. A la différence de l'UTRAN 3G (UMTS) où sont présentes les entités Node B et RNC, l'architecture E-UTRAN ne présente que des eNodeB. Les fonctions supportées par le RNC ont été réparties entre l'eNodeB et les entités du réseau cœur MME/Serving GW. L'eNodeB dispose d'une interface S1 avec le réseau cœur. L'interface S1 consiste en S1-C (S1-Contrôle) entre l'eNodeB et le MME et S1-U (S1-Usager) entre l'eNodeB et le Serving GW.

Une nouvelle interface X2 a été définie entre eNodeB adjacents. Son rôle est de minimiser la perte de paquets lors de la mobilité de l'utilisateur en mode ACTIF (handover). Lorsque l'utilisateur se déplace en mode ACTIF d'un eNodeB à un autre eNodeB, de nouvelles ressources sont allouées sur le nouvel eNodeB pour l'UE ; or le réseau continue à transférer les paquets entrants vers l'ancien eNodeB tant que le nouvel eNodeB n'a pas informé le réseau qu'il s'agit de lui relayer les paquets entrants pour cet UE. Pendant ce temps l'ancien eNodeB relaie les paquets entrants sur l'interface X2 au nouvel eNodeB qui les remet à l'UE.

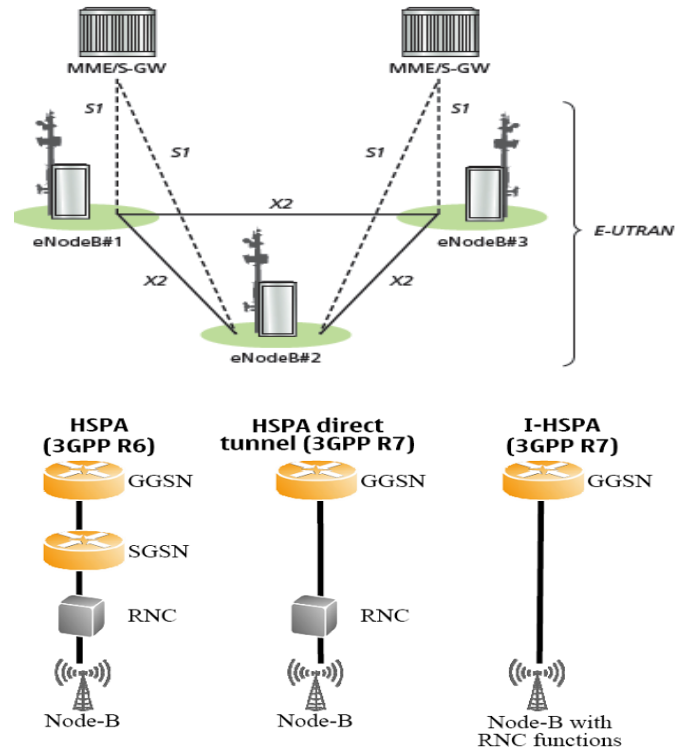


Fig. I.6 Simplification de l'architecture LTE par rapport aux réseaux précédents

## b) Réseau cœur SAE

Contrairement aux normes 2G et 3G qui proposent deux domaines de commutation de circuit et de paquet, SAE ne propose qu'un seul domaine paquet fondé sur l'IP. Tous les services devront être offerts sur IP y compris ceux qui étaient auparavant offerts par le domaine circuit tels que la voix, la visiophonie, le SMS, tous les services de téléphonie. Ce domaine paquet est appelé EPC (Evolved Packet Core). Il y a deux types de communication au niveau de SAE : Default bearer qui est une connectivité permanente sans garantie de débit entre un abonné et son réseau SAE d'attachement ; et Dedicated bearer qui est une connectivité avec garantie de débit et d'une certaine QoS dans le cas de l'utilisation d'un trafic temps-réel sensible au délai. En effet Lorsque l'utilisateur se rattache au réseau EPC, ce dernier lui crée un défaut bearer qui représente une connectivité permanente (maintenue tant que l'utilisateur est rattaché au réseau) mais sans débit garanti. Lorsque l'utilisateur souhaitera établir un appel qui requiert une certaine qualité de service telle que l'appel voix ou visiophonie, le réseau pourra établir pour la durée de l'appel un dedicated bearer qui supporte la qualité de service exigée par le flux de service et surtout qui dispose d'un débit garanti afin d'émuler le mode circuit [15].

Dans le SAE on distingue le MME, le SGW, le PDW [15], [16], [17].



- **Entité MME (Mobility Management Entity)**

Les fonctions de l'entité MME incluent:

- **La signalisation EMM et ESM avec l'UE.** Les terminaux LTE disposent des protocoles EMM (EPS Mobility Management) et ESM (EPS Session Management) qui leur permettent de gérer leur mobilité (attachement, détachement, mise à jour de localisation) et leur session (établissement/libération de session de données) respectivement. Ces protocoles sont échangés entre l'UE et le MME.
- **L'authentification.** Le MME est responsable de l'authentification des UEs à partir des informations recueillies du HSS.
- **La Joignabilité de l'UE dans l'état ECM-IDLE (incluant paging).** C'est l'entité MME qui est responsable du paging lorsque l'UE est dans l'état IDLE et que des paquets à destination de l'UE sont reçus et mis en mémoire par le Serving GW.
- **La gestion de la liste de Tracking Area.** L'UE est informé des zones de localisation prises en charge par le MME, appelées Tracking Area. L'UE met à jour sa localisation lorsqu'il se retrouve dans une Tracking Area qui n'est pas prise en charge par son MME.
- **La sélection du Serving GW et du PDN GW.** C'est au MME de sélectionner le Serving GW et le PDN GW qui serviront à mettre en œuvre le Default Bearer au moment du rattachement de l'UE au réseau.
- **La sélection de MME lors du handover avec changement de MME.** Lorsque l'utilisateur est dans l'état ACTIF et qu'il se déplace d'une zone prise en charge par un MME à une autre zone qui est sous le contrôle d'un autre MME, alors il est nécessaire que le handover implique l'ancien et le nouveau MME.
- **La sélection du SGSN lors du handover avec les réseaux d'accès 2G et 3G.** Si l'utilisateur se déplace d'une zone LTE à une zone 2G/3G, c'est le MME qui sélectionnera le SGSN qui sera impliqué dans la mise en place du default bearer.

- **Entité Serving GW (Serving Gateway)**

Les fonctions de l'entité Serving GW incluent :

- **Le point d'ancrage pour le handover inter-eNodeB.** Lors d'un handover inter-eNodeB, le trafic de l'utilisateur qui s'échangeait entre l'ancien eNodeB et le Serving GW doit désormais être relayé du nouvel eNodeB au Serving GW.
- **Le Point d'ancrage pour le handover LTE et les réseaux 2G/3G.** Il relaie les paquets entre les systèmes 2G/3G et le PDN-GW. Lors d'une mobilité entre LTE et Les réseaux 2G/3G paquet,

le SGSN du réseau 2G/3G s'interface avec le Serving GW pour la continuité du service de données.

- **La mise en mémoire des paquets entrants lorsque l'UE destinataire est dans l'état ECM-IDLE** et initialisation de la procédure de demande de service initiée par le réseau.
- **L'Interception légale;** Le Serving GW est sur le chemin de signalisation pour l'établissement/la libération de bearer et sur le chemin du média (paquets de données échangés par l'UE). Il est donc un point stratégique pour l'interception légale des flux média et contrôle.
- **Le routage des paquets et relai des paquets.** Le Serving GW route les paquets sortant au PDN GW appropriés et relaie les paquets entrants à l'eNodeB servant l'UE.
- **La comptabilité par usager pour la taxation inter-opérateurs.** Le Serving GW comptabilise le nombre d'octets envoyés et reçus permettant l'échange de tickets de taxation inter-opérateurs pour les reversements.

- **Entité PDN GW (Packet Data Network Gateway)**

Les fonctions de l'entité PDN GW incluent :

- **L'Interface vers les réseaux externes** (Internet et intranet). Le PDN GW est l'entité qui termine le réseau mobile EPS et assure l'interface aux réseaux externes IPv4 ou IPv6.
- **L'allocation de l'adresse IP de l'UE.** Le PDN GW assigne à l'UE son adresse IP dès l'attachement de l'UE lorsque le réseau établit un défaut bearer permanent à l'UE. Le PDN GW peut allouer une adresse IPv4 ou IPv6.
- **L'Interception légale.** Le PDN GW est sur le chemin de signalisation pour l'établissement/la libération de bearer et sur le chemin du média (paquets de données échangés par l'UE). Il est donc un point stratégique pour l'interception légale des flux média et contrôle.
- **La taxation des flux de service montants et descendants** (sur la base des règles de taxation fournies par le PCRF) ou sur la base de l'inspection de paquets définie par des politiques locales).

En plus de ces nœuds, le réseau inclut également d'autres nœuds et fonctions logiques telles que la fonction de serveur (HSS) d'abonné et PCRF (Policy Control and Charging Rules Function).

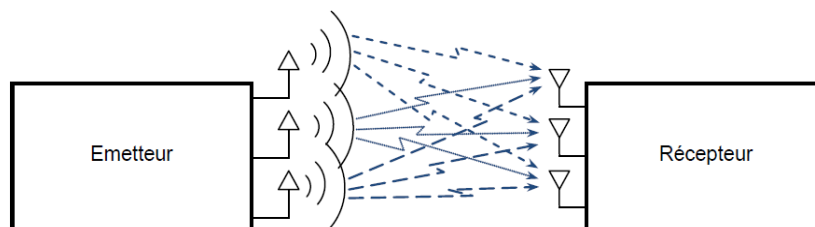
**HSS :** Avec la technologie LTE, le HLR est réutilisé et renommé Home Subscriber Server (HSS). Le HSS est un donc HLR évolué. C'est une base de données contenant l'information de souscription pour les réseaux GSM, GPRS, 3G, LTE et IMS.

**PCRF (Policy & Charging Rules Function) :** il se charge de fournir les règles de la taxation. Il fournit au PDN-GW les règles de taxation lorsqu'un default bearer ou un dedicated bearer est activé

ou modifié pour l'utilisateur. Ces règles de taxation permettent au PDNGW de différencier les flux de données de service et de les taxer de façon appropriée. Par exemple, si l'utilisateur fait transiter sur son default bearer des flux WAP et des flux de streaming, il sera possible au PDN GW de distinguer ces deux flux et de taxer le flux WAP sur la base du volume alors que le flux de streaming sera taxé sur la base de la durée.

#### I.4.4.2 Technologie MIMO

Parmi les innovations, du point de vue technique, qu'apporte le Long Term Evolution, la technologie Multi Input-Multi Output (MIMO) est aux premiers rangs. Avant cette technologie il en existait de similaires le système SIMO (Single Input Multi Output) et MISO (Multi Input Single Output). L'idée première de MIMO est de combiner les gains MISO et SIMO. Dans ce cas on s'attend à une amélioration du SNR menant donc à une amélioration de la couverture ou du débit. (Link adaptation). Les systèmes d'antennes MIMO jouent un rôle important pour le LTE. Seule l'utilisation d'antennes intelligentes permet d'obtenir une efficacité du spectre élevée. Contrairement à l'UMTS, avec le LTE, les systèmes d'antennes MIMO font partie intégrante du système, aussi bien au niveau de la station de base qu'au niveau du téléphone mobile. La technologie MIMO permet la transmission parallèle et simultanée de données sur la même fréquence avec plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur. Plusieurs formes d'applications de MIMO sont prévues pour le LTE: elles peuvent être cataloguées comme *multiplexage spatial* (Space Multiplex), *diversité spatiale* (Space Diversity), *formation de faisceaux* (Beamforming -BF), ou dans un mélange adéquat de ces dernières. Le service utilisé, le débit de données, l'état du canal de télécommunication mobile et les propriétés du téléphone portable déterminent où et quand une forme de MIMO est utilisée. Le principe est représenté schématiquement par l'illustration ci-dessous [14], [18] :



**Fig.I.7** Principe de la transmission multi-antenne avec MIMO (3X3)

Génération	Acronyme	Intitulé
1G	Radiocom 2000, Nordic Mobile Telephone	Radiocom 2000 France Telecom, Ligne SFR Analogique (NMT=Nordic Mobile Telephone)
2G	GSM (échanges de type voix uniquement)	Global System for Mobile Communication
2.5G	GPRS (échange de données sauf voix)	General Packet Radio Service
2.75G	EDGE (basé sur réseau GPRS existant)	Enhanced Data Rate for GSM Evolution
3G	UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
3.5G ou 3G+	HSDPA (dérivé de l'UMTS)	High Speed Downlink Packet Access
3.75G ou 3G++	HSUPA et HSPA+ (dérivés de l'UMTS)	High Speed Uplink Packet Access
3.9G	LTE	Long Term Evolution
4G	LTE Advanced	Long Term Evolution-Advanced

Tableau I.3 : Evolution des générations de la téléphonie mobile [10]

Génération	Standard	Bandes de Fréquences en MHz	Largeur de canal	Débit max	Delay (ms)	Techniques d'accès	modulation
2	GSM	890-960 1710-1880	200kHz	9,6 Kbps	600-700	TDMA/FDMA	GMSK
2.5	GPRS	890-960 1710-1880	200khz	171Kbps	350-450	TDMA/FDMA	GMSK
2.75	EDGE	890-960 1710-1880	200khz	384Kbps	<200	TDMA/FDMA	PSK (8PSK)
3	UMTS	1185-2025 2010-2200	5MHz	2 Mbps (DL) 384 Kbps (UP)vv	<120	W-CDMA	PSK (4PSK)
3.5	HSDPA	1185-2025 2010-2200	5MHz	14 Mbps (DL) 384Kbps (UP)	<100	WCDMA	QAM/ QPSK
3.75	HSUPA	1185-2025 2010-2200	5MHz	14 Mbps(DL) 5 Mbps (UP)	<80		QAM/QPSK
3.9	LTE	1920-1980 2110-2170	1,4-3-5- 10-15-20 (MHz)	300 Mbps (DL) 86 Mbps (UL)	<30	OFDMA/SCFDM A	QPSK/QAM
4	LTE Adv		100 MHZ	Objectif 1Gbps	<10	OFDMA/SCFDM A	QPSK/QAM

Tableau I.4 : Récapitulatif des caractéristiques des différents standards de la téléphonie mobile

## **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre où nous avons fait une étude comparative des différents réseaux mobiles existant, nous avons pu remarquer que le Long Term Evolution avec son architecture simplifiée, son accès optimisé et l'introduction de techniques innovantes, constitue une révolution pour la téléphonie mobile. Les débits d'ordre supérieurs et les services offerts facilitent le quotidien de l'abonné à travers un bon niveau de QoS. Malheureusement l'un des inconvénients de cette nouvelle technologie est l'installation de ses nouveaux équipements qui sont différents de ceux des normes précédentes, et le développement des terminaux adaptés.

Déjà, la prochaine génération de la technologie LTE sort des limbes sous le nom de LTE Advanced. Ses spécifications les plus récentes ont été normalisées au printemps 2011 sous l'appellation 3GPP version 10. Mais sur quoi repose toute cette technologie qui révolutionne le monde de la télécommunication ? La réponse à ceci sera l'objet de la suite de notre travail.

# CHAPITRE 2

---

## Méthodes d'accès OFDMA et SC-FDMA dans LTE (Long Term Evolution)

### II.1 Introduction

Les objectifs du futur réseau LTE ont été définis par l'organisme de normalisation 3GPP (Third Generation Partnership Project) au cours des années 2005/2006. Les principales caractéristiques techniques de la nouvelle technologie ont été énoncées dans le chapitre précédent. L'atteinte de ces objectifs a nécessité plusieurs techniques parmi lesquelles la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) pour l'optimisation de l'efficacité spectrale, les techniques d'accès de L'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) utilisé pour la réception sur le terminal et du SC-FDMA (Single carrier Frequency Division Multiple Access) pour l'émission à partir du terminal. Cependant l'on serait tenté de se demander la raison principale du choix de deux techniques d'accès différentes pour les voies montantes et descendantes. Pour répondre à cette question il serait judicieux de faire une étude de chacune de ces techniques et de les analyser dans le contexte de leur utilisation.

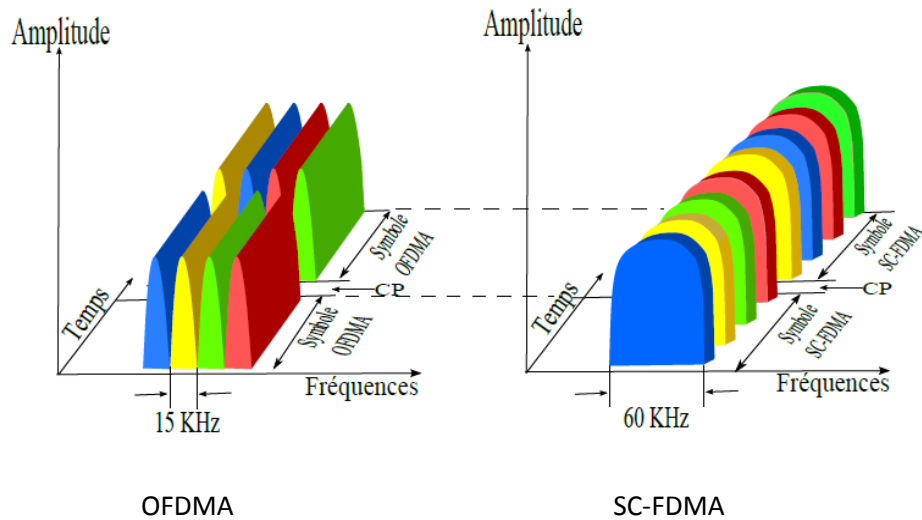


Fig. II.1 Transmission parallèle et séquentielle des systèmes OFDMA et SC-FDMA

## II.2 Technique OFDM

### II.2.1 Présentation de L'OFDM

Les accès multiples sont des techniques efficaces de partage de ressources de communication en temps et en bande passante, de manière optimale afin d'augmenter la capacité d'un réseau de communication en nombre d'utilisateurs. Cette technique doit être mise en œuvre sans créer d'interférences nuisibles aux performances des systèmes. La condition nécessaire pour éviter les interférences d'accès multiples (IAM) est l'orthogonalité entre les signaux des différents utilisateurs. Elle procède donc à un recouvrement mutuel des différentes sous-porteuses, d'une manière orthogonale. Cette orthogonalité permet une utilisation optimale des ressources spectrales et facilite l'implémentation numérique. L'un des problèmes majeurs en télécommunication est l'adaptation de l'information à transmettre au canal de propagation. Étant donné, la présence de canaux sélectifs en fréquences, on a recours à l'utilisation de modulations multi-porteuses dans laquelle un bloc d'information est modulé par une transformée de Fourier. Ainsi cette technique a connu un vif succès ces dernières années et est en phase de normalisation dans différents standards sans fils (IEEE802.11a, WiMAX, LTE, DVB). La technique OFDM a la grande particularité de transformer un canal multi-trajet large bande en un ensemble de sous-canaux mono-trajet très simples à égaliser. De plus, l'utilisation ingénieuse de redondance cyclique à l'émission permet de réduire la complexité des terminaux grâce à l'utilisation d'algorithmes à base de FFT rapides.

Quelques avantages de la technique OFDM

- Attribution dynamique de spectre : L'utilisateur décide des sous-bandes qui doivent être occupées pour chaque impulsion sortante.
- Une architecture numérique simple : la technologie moderne permet une implémentation à faible coût.
- La largeur de bande est déterminée seulement par la fréquence d'échantillonnage (DAC/ADC).

La synchronisation n'est pas une grande issue : Tout le traitement est fait dans le domaine de fréquence.

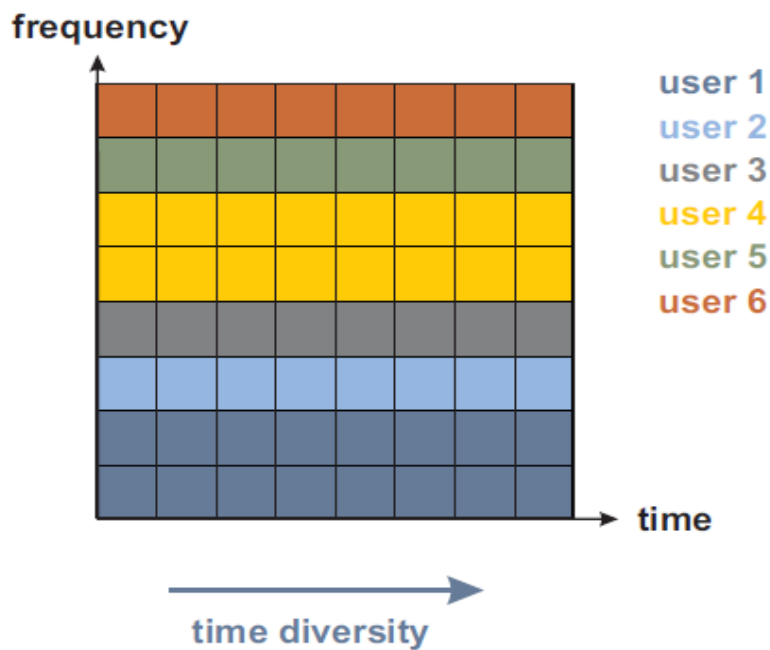


Fig. II.2 Principe de l'OFDMA

## II.2.2 Principe de la modulation OFDM

La modulation multiporteuse OFDM consiste à répartir les symboles sur un grand nombre de porteuses à bas débit. A l'opposé des systèmes conventionnels qui transmettent les symboles en série, chaque symbole occupe toute la bande passante disponible. Alors on reparti de manière aléatoire des symboles de durée  $T_u$  (temps symbole utile) sur des différentes porteuses (ou sous-porteuses) modulées en QPSK ou QAM (selon le compromis robustesse/ débit).

Dans le système OFDM le canal est divisé en cellule suivant les axes de temps et de fréquence. Le canal est désormais constitué de suite de segments de fréquence et de suite de segments temporels. Une porteuse est affecté à chaque cellule fréquence/temps et l'information à transporter est reparti



sur l'ensemble de ces porteuses modulées, chacune suivant le type BPSK, QPSK ou QAM. Un symbole OFDM comprend alors l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant  $t$ . Pour que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles et pour ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise l'orthogonalité, cité précédemment. Les signaux des différentes porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre elles.

Ainsi, pour un train de symboles initial de période  $T_i$ , les symboles seront répartis en  $N$  trains plus lents et auront alors une durée  $T = NT_i$ .

Pour répartir les données à transmettre sur les  $N$  porteuses, on regroupe les symboles  $c_k$  par paquets de  $N$ . Les  $c_k$  sont des nombres complexes définis à partir des éléments binaires par une constellation (mapping) souvent de modulation QAM ou PSK à  $2^n$  états.

La séquence de  $N$  symboles  $c_0, c_1, \dots, c_{N-1}$  constitue un symbole OFDM. Chaque donnée  $c_k$  module un signal à la fréquence  $f_k$ .

Le signal individuel s'écrit sous forme complexe :

$$c_k e^{j2\pi f_k t} \quad (II.1)$$

Le signal  $s(t)$  total correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est la somme des signaux individuels (Fig. 2.0) :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi f_k t} \quad (II.2)$$

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est  $1/T$ , soit :

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T} \quad (II.3)$$

Ce qui nous permet d'écrire :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi(f_0 + \frac{k}{T})t} \quad (II.4)$$

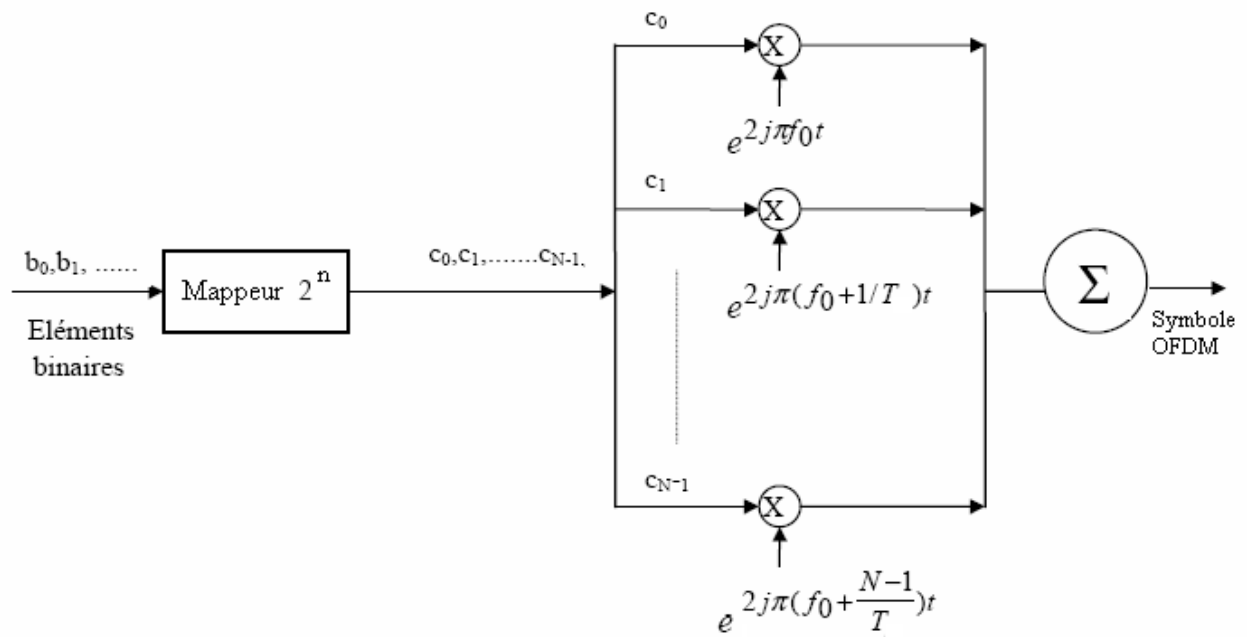


Fig. II.3 - Schéma de principe d'un modulateur OFDM

La figure II.4 montre que l'espace entre chaque sous-porteuse  $1/T$  permet, lorsque le spectre d'une sous-porteuse est maximal, d'annuler le spectre de toutes les autres : c'est la condition d'orthogonalité.

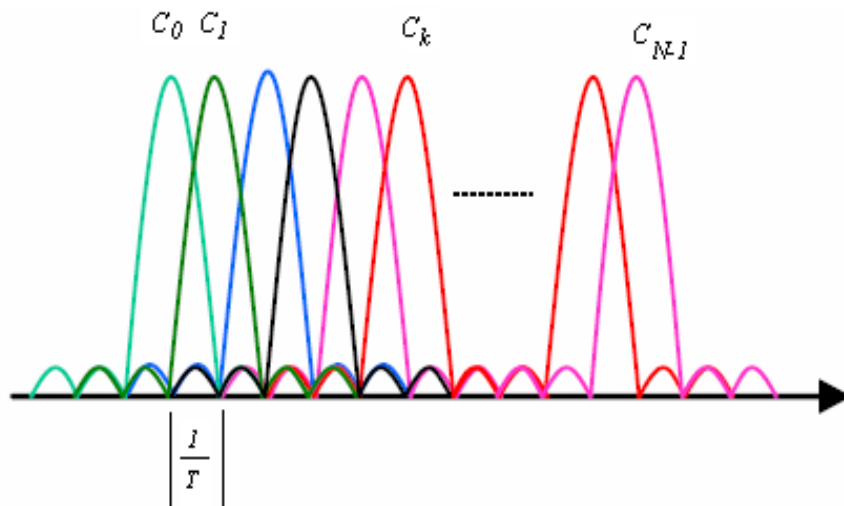


Fig. II.4 – Spectre du signal OFDM avec N porteuse

La bande occupée est à peu près  $B=N/T$  (en excluant les lobes secondaires de part et d'autre de la bande), chaque sous-porteuse occupe à peu près  $1/T$ . La bande en fréquence est occupée de façon optimale, puisque le spectre est presque plat dans cette bande.

### II.2.3 Principe de la démodulation OFDM

Le signal à l'entrée du récepteur s'écrit sur une durée symbole  $T$  :

$$r(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k(t) e^{j2\pi(f_0 + \frac{k}{T})t} \quad (II.5)$$

$H_k(t)$  est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence  $f_k$  et à l'instant  $t$ . Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période  $T$  (~nanoseconde). La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les  $N$  sous-porteuses comme sur le schéma de la figure II.5. Cette complexité est détournée par une implémentation numérique comme le montrent les paragraphes suivants.

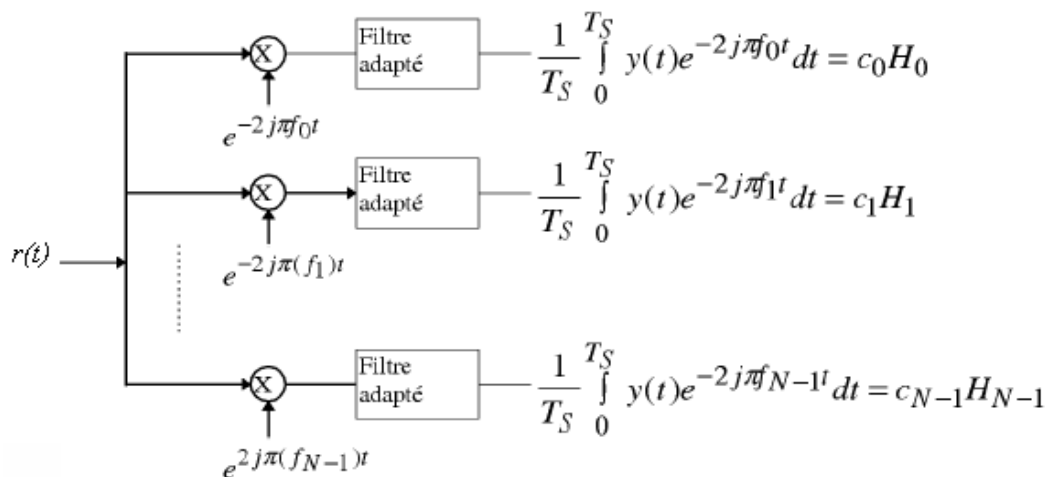


Fig. II. 5 – Schéma de principe de la démodulation OFDM

### II.2.4 Implémentation numérique de la technique OFDM

L'implémentation numérique de la technique OFDM est très simple, les traitements nécessaires font appel à des blocs de conversion S/P (série-parallèle) et P/S (parallèle-série), à des blocs FFT et IFFT, et aux convertisseurs CAN et CNA.

### II.2.4.1 Implémentation numérique du modulateur OFDM

Le signal  $s(t)$  à la sortie du modulateur peut se mettre sous la forme suivante :

$$s(t) = e^{j2\pi f_0 t} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi \frac{k}{T} t} \quad (II.6)$$

Ce signal est constitué de deux parties :

Une partie bande de base :  $w(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi \frac{k}{T} t}$  et une partie de transposition en fréquence :  $e^{j2\pi f_0 t}$

En discrétisant le signal  $w(t)$  à la période  $T_i (T=NT_i)$ , on obtient une sortie  $w_n$  sous la forme :

$$w_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi \frac{kn}{N}} \quad (II.7)$$

Les  $w_n$  sont donc obtenus par une transformée de Fourier inverse discrète des  $c_k$ , de sorte que le calcul peut se faire par simple IFFT si le nombre de porteuses  $N$  est choisi comme puissance de 2, conduisant au schéma numérique suivant :

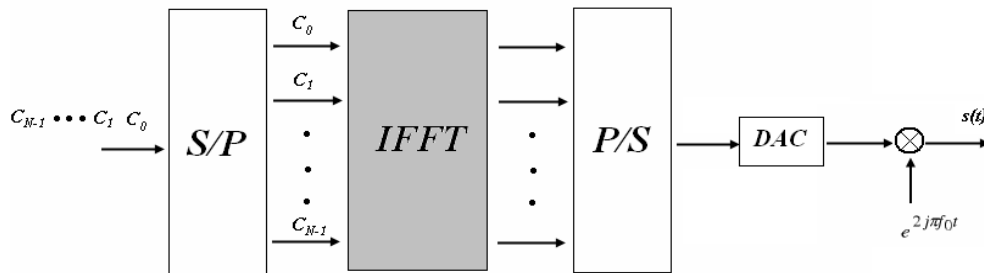


Fig. II. 6 – Modulateur OFDM numérique

### II.2.4.2 Implémentation numérique du démodulateur OFDM

Le signal à l'entrée du récepteur peut se mettre sous la forme suivante :

$$r(t) = e^{j2\pi f_0 t} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k e^{j2\pi \frac{k}{T} t} \quad (II.8)$$

Le signal bande base discrétisé est alors :

$$z_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k e^{j2\pi \frac{kn}{N}} \quad (II.9)$$

$z_n$  est la transformée de Fourier discrète inverse de  $c_k H_k$ , la démodulation consiste donc à effectuer une transformée de Fourier directe discrète, qui se fera par simple FFT. (Fig. II.7)

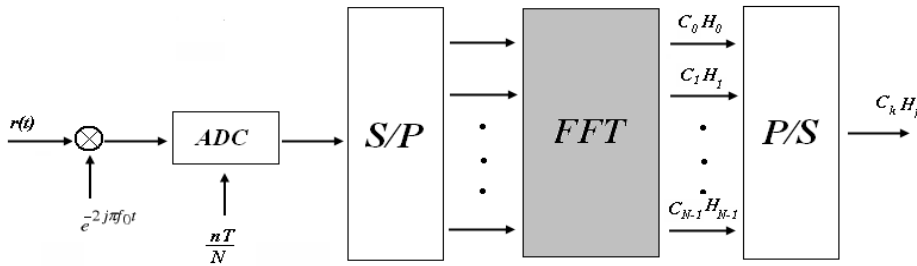


Fig. II.7 – Démodulateur OFDM numérique

## II.3 Transmission Downlink

A l'instar des téléphonies de première et deuxième génération le Long Term Evolution utilise aussi la technique de la répartition de fréquence pour l'accès à l'interface radio. Cependant, cette fois le LTE utilise l'OFDM qu'il a revisité pour en faire l'OFDMA. Cette technique est utilisée pour la réception sur le terminal mobile. Comme nous l'avons vu l'OFDMA est bénéfique pour les transmissions dans des canaux sélectifs en fréquences qui comportent des trajets multiples, c'est pourquoi on retrouve cette technique dans plusieurs normes de diffusion telle que les communications numériques à hauts débits. Elle simplifie la tâche des égalisateurs, tout en maintenant un débit élevé. Son choix pour le LTE n'est donc pas fortuit. Nous ferons dans la suite de notre travail une analyse de cette technique.

### II.3.1 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

Avec l'OFDMA la transformée de fourrier Rapide (FFT) et la transformée de fourrier Rapide inverse (IFFT) sont utilisées respectivement pour la représentation en domaine temporel et fréquentiel. Comme vu précédemment l'OFDMA est robuste pour les phénomènes d'évanouissements ou « multipath fadings » dans les multi-trajets. Voici des exemples de signaux informatifs et leur sortie après le passage via le bloc FFT [18].

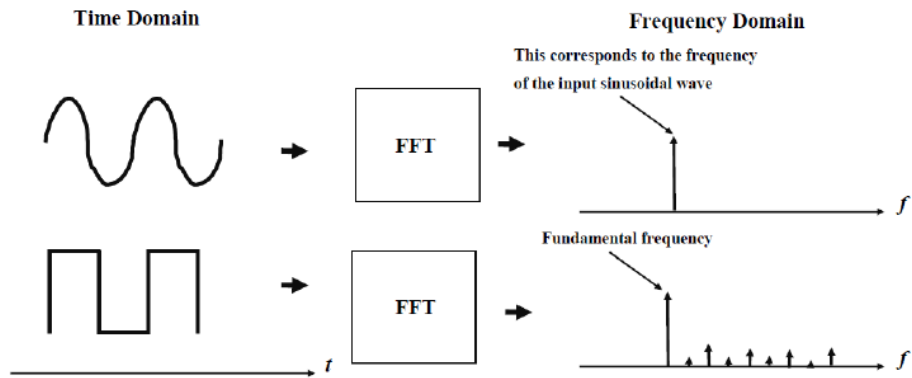


Fig. II.8 : Résultat de l'opération FFT

### II.3.2 Emission et réception

Dans le principe de l'OFDMA, au niveau de l'émetteur le spectre est divisé en plusieurs nombres de sous-porteuses orthogonales [18]. Dans la norme LTE l'espacement entre ces sous-porteuses est 15KHz avec 66.67  $\mu$ s de durée pour un symbole OFDMA. Les symboles qui ont un flux assez élevé passent via un modulateur. Par contre les symboles BPSK, QPSK, 16-QAM et 64-QAM sont modulés directement aux sous-porteuses qui seront convertis en sous-porteuses parallèle par le bloc « série - parallèle ». A l'étage du bloc IFFT les symboles sont convertis en domaine temporel ainsi on obtient des symboles OFDMA. Un intervalle de Garde (IG) est utilisé entre les symboles OFDMA. Il sert à annuler l'interférence inter-symbole (ISI) au récepteur. Pour absorber l'interférence entre les symboles, la technique utilisée consiste à insérer l'Intervalle de Garde (IG) ou « Cyclic Prefix (CP) » sur chaque paquet transmis dans le canal. Il s'agit uniquement de copier la fin de chaque paquet que l'on rajoute au début de celui-ci (Voir Figure II.9). Ainsi lorsque le retard maximal du canal est inférieur à la longueur de l'intervalle de garde, tout se passe bien c'est à dire que toutes les interférences seront absorbées. Par contre lorsque le retard maximal du canal est supérieur à la longueur de l'intervalle de garde, les interférences ne seront pas toutes absorbées et l'estimation risque d'être médiocre.

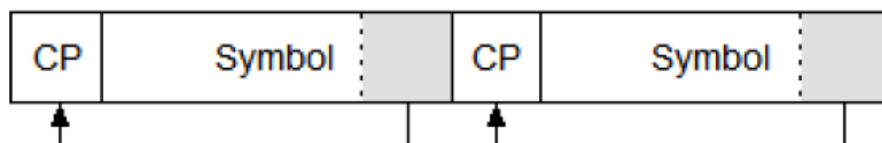


Figure II.9 : Cyclic Préfix

Notons que l'intervalle de garde a un second rôle qui est de périodiser le signal émis. Cela a pour avantage de rendre circulaire la convolution du canal afin d'obtenir une égalité entre la DFT du signal reçu après suppression de l'intervalle de garde et le produit de la transformée de Fourier du signal émis et de la fonction de transfert du canal de transmission [5].

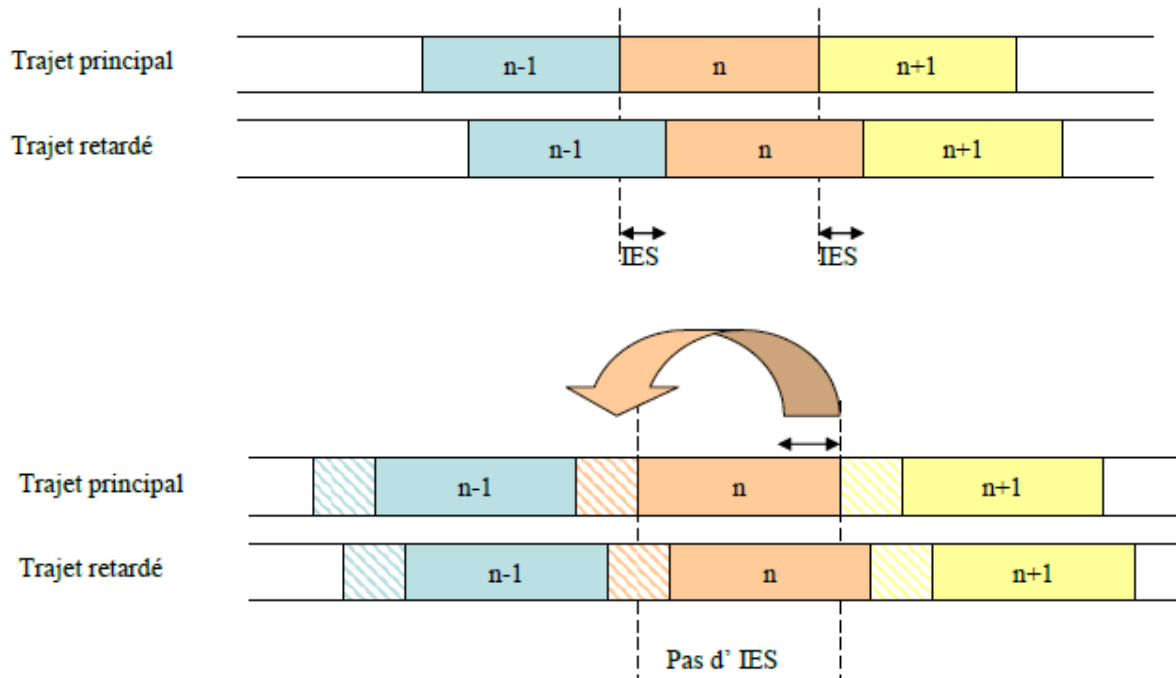


Fig. II.10 – Absorption de l'interférence entre symbole IES

Deux types d'intervalles de garde existent pour ce système :

- L'intervalle de garde normal ou (Normal-CP) dont la durée  $T_{CPnorm}$  correspond à  $5,2\mu s$  pour le premier symbole et  $4,7\mu s$  pour les autres.
- l'intervalle de garde étendu (ou Extended-CP) dont la durée  $T_{CPext}$  correspond à  $16,7\mu s$ .

L'intervalle de garde normal est utilisé pour les hautes fréquences dans le milieu urbain et l'intervalle de garde étendu pour les basses fréquences en milieu rurale. La norme utilise l'intervalle de garde étendu lorsque l'utilisateur se trouve sur une cellule de grande taille, dans laquelle il est susceptible d'obtenir des interférences très sévères dues aux multi-trajets du canal. Le système est alors sous dimensionné et le nombre de symboles OFDMA dans un slot est réduit à 6. Par contre avec l'intervalle de garde normal qui est plus utilisé et adapté pour les cellules de taille moyenne, le nombre de symboles OFDMA par slot est de 7 [19]. Au récepteur, le CP est enlevé, les sous-porteuses sont converties en série par le bloc « parallèle -série » et à l'étage FFT les symboles OFDMA sont

convertir en Domaine fréquentiel suivie par démodulation [18] comme le montre la figure ci-dessous.

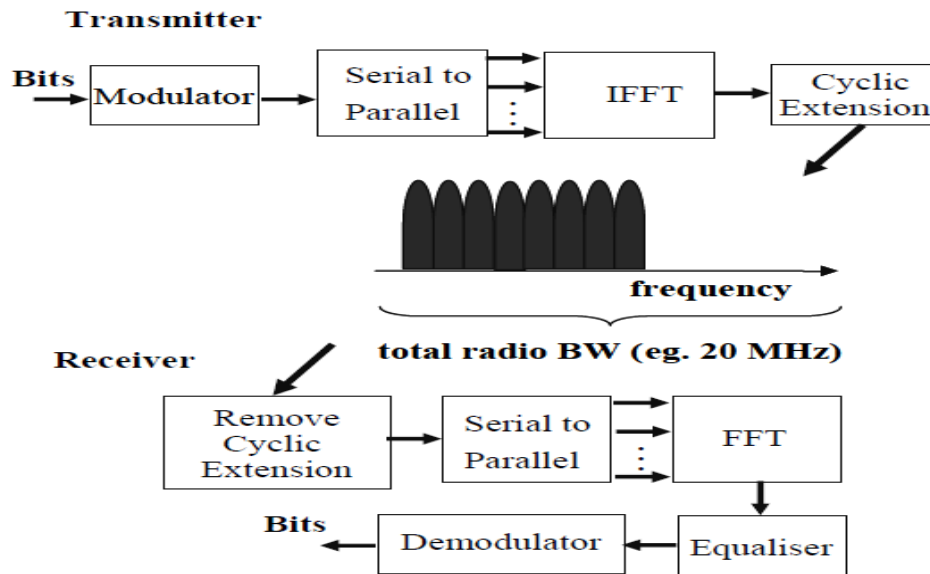


Fig. II.11 : Emetteur et récepteur OFDMA

### II.3.3 Les Paramètres de modulation en Downlink

La table ci-dessous montre les différents paramètres de modulation pour les différentes bandes passantes.

Bandes passantes du canal (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Nombre de Ressource Bloc (RB) utilisé $R_{RB}^{UL}$	6	15	25	50	75	100
Nombre de sous-porteuses modulées $R_{SC}^{RB} \times R_{RB}^{UL}$	72	180	300	600	900	1200
Taille N : IDFT(TX) et DFT(RX)	128	256	512	1024	1536	2048
Fréquence d'Echantillonnage	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
Nombre d'Echantillons par Slot	960	1920	3840	7680	11520	15360

Tableau II.1 : Paramètres de modulation pour Downlink [5]



### II.3.4 Structure d'une Trame LTE

Les transmissions downlink et uplink sont organisés en deux types de structures qui sont [20] :

- Structure de type 1 (FDD)
- Structure de type 2 (TDD)

#### a) La structure de type 1 (FDD)

Cette structure fonctionne en deux modes full duplex et half duplex. La structure de type 1 a une durée de 10ms qui constitué de 20 slots. Chaque slot a une durée de 0.5ms. Une Sub-frame est constitué de 2 slots. Donc une frame (ou trame) radio contient 10 sub-frames comme l'illustre la figure II.12.

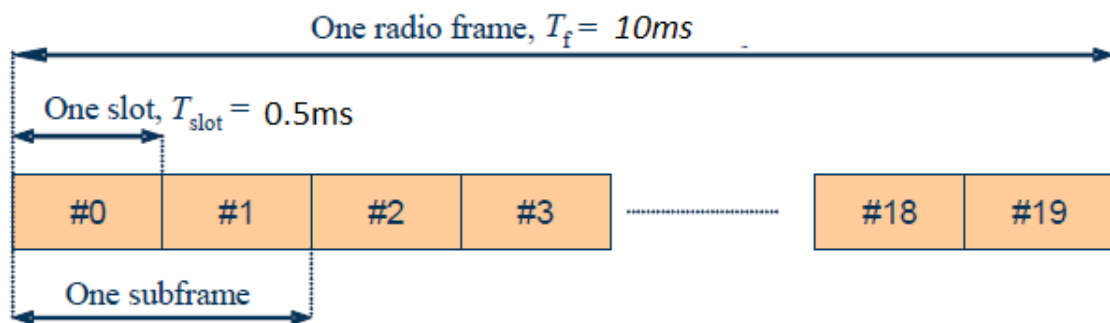


Fig. II.12: Structure de type 1

#### b) La structure de type 2 (TDD)

La structure de type 2 a aussi une durée de 10ms divisé en deux frames de 5ms. Chaque demi frame est divisé en 5 sub-frames de durée de 1ms chacune. Toutes les sub-frames qui ne sont pas des sub-frames spéciales sont définies par deux slots de durée 0.5ms chacun. Les sub-frames spéciales quant à elles se définissent par trois champs DwPTS (Downlink Pilot Timeslot), GP (Guard Period) et UpPTS (Uplink Pilot Timeslot). La durée totale de ce genre de sub-frames est 1ms.

La figure ci-dessous montre la structure décrite.

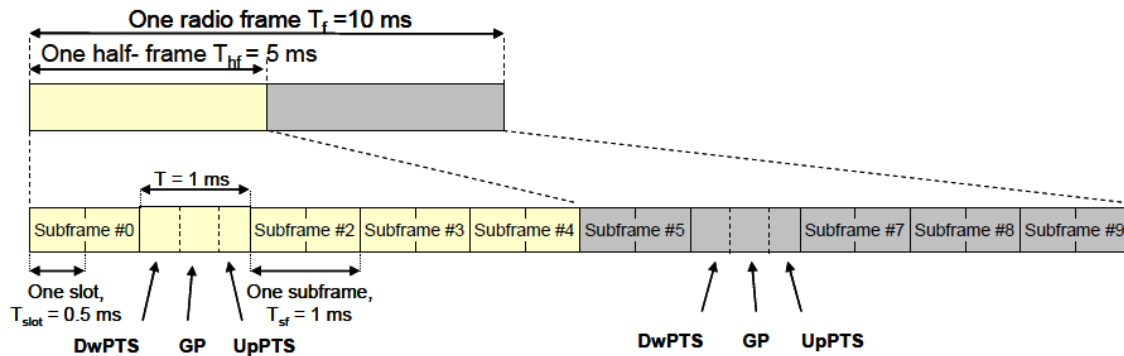


Figure II.13: Structure de type 2

L'utilisation des frames dans les différentes structures que nous venons de présenter se fait de manière bien hiérarchisé. Une configuration est donc requise. Nous présenterons dans le tableau ci-dessous ces configurations pour les transmissions Uplink - Downlink où « D » indique la sub-frame réservée pour les transmissions downlink et « U » celle réservée pour les transmissions uplink. « S » représente la sub-frame spéciale. Il existe sept configurations au total avec des temps de commutation de 5ms ou 10ms. Dans le cas de la configuration à 5ms une sub-frame spéciale existe dans les deux moitiés de la frame alors que dans le cas de celle de 10ms la sub-frame spéciale existe seulement dans la première moitié.

Uplink-downlink configuration	Downlink-to-Uplink Switch-point periodicity	Subframe number									
		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	10ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Tableau II.2 configuration uplink et downlink [20]

### II.3.5 Les “Resources Block” en Downlink (PRB)

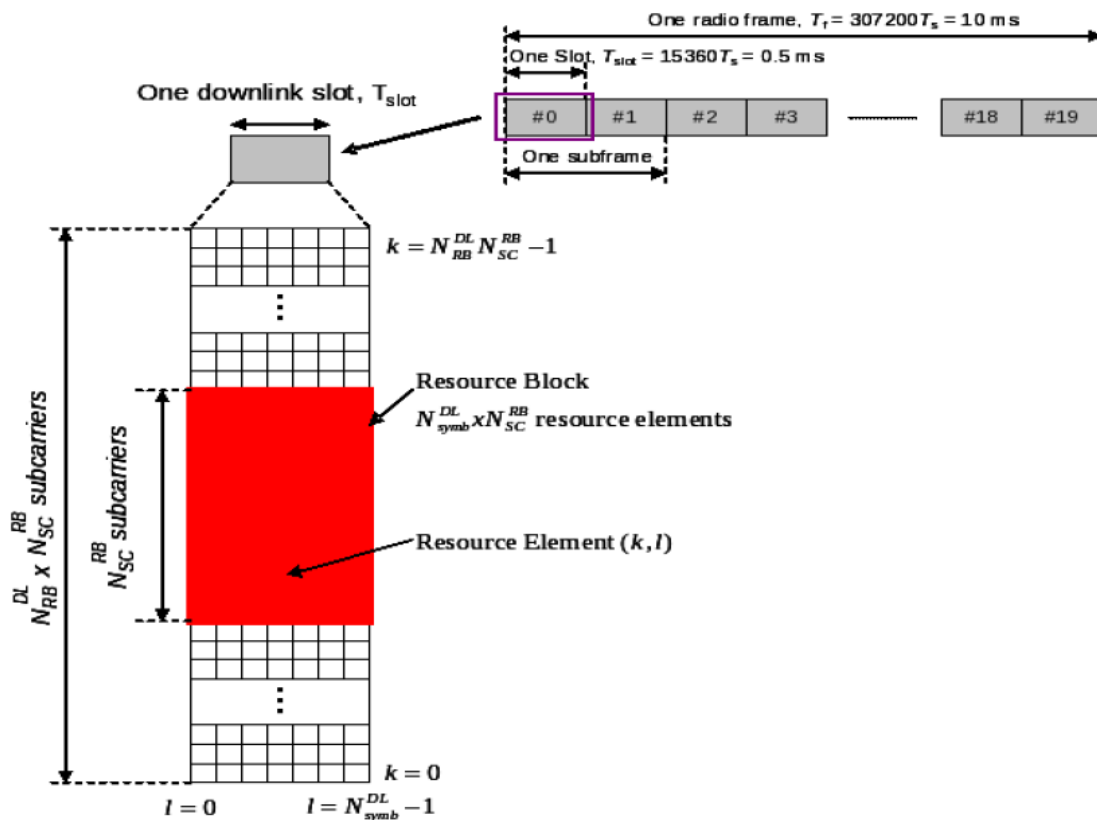
En transmission downlink les sous-porteuses sont divisées en plusieurs blocs appelés « Resources blocks ». Cette technique permet au système de fractionner dans une bande passante la sous-

porteuse en petites parties sans mélanger les données de celle-ci avec à les autres sous-porteuses [21].

Dans la norme LTE, les sous-porteuses ont un espacement de 15kHz. Une « Resource block » contient 12 sous-porteuses avec un slot de durée de 0.5ms et possède une taille identique quelque soit les bandes passantes [22].

Bandwidth (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Physical Resource Block (PRB) Bandwidth (kHz)	180					
Subcarrier Bandwidth (kHz)	15					
Number of Resource Blocks	6	15	25	50	75	100

Tableau II.3 : Nombre de « Resource blocks » pour les différentes Bandes passantes.



La figure II.14, ci-dessus montre la structure d'un slot ou Ressource block [21].

### II.3.6 Les canaux Physiques en Downlink

Dans le Long Term Evolution, le but principal des canaux physiques est le transport d'information depuis les couches supérieures [21]. Les canaux physiques sont dits aussi canaux de transport spécifiques. Dans la norme LTE en downlink on a trois différents types de canaux physiques.

- Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)
- Physical Downlink Control Channel (PDCCH)
- Common Control Physical Channel (CCPCH)

Chaque canal physique définit son algorithme de modulation, « bit scrambling » et « layer mapping ».

#### a) Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)

Le canal PDSCH est construit pour les données ayant un flux élevé. Il est donc utilisé pour le transport de multimédia et de données. Les techniques de modulation utilisées pour le PDSCH sont les modulations QPSK, 16-QAM, 64-QAM.

#### b) Physical Downlink Control Channel (PDCCH)

Le PDCCH est typiquement utilisée pour le contrôle de signalisation d'information. Il est attribué au « Resource element » (ensemble de « Resource blocks ») au premier slot de la Sub-frame précisément aux trois premiers symboles OFDMA. Le PDCCH utilise seulement la modulation QPSK comme technique de modulation et il porte les réponses NACK/ACK au canal Uplink. Dans une seule sub-frame on peut transmettre plusieurs PDCCH.

#### c) Common Control Physical Channel (CCPCH)

Le CCPCH est utilisé pour le transport de la « cell-wide control information » qui contrôle la couverture des cellules. Le CCPCH utilise seulement la modulation QPSK et il est toujours transmis à une fréquence environnante de la fréquence centrale. Au contrôle d'information dans le CCPCH, le signal est attribué au « Resource element ».

### II.3.7 Les Signaux Physiques

Les signaux physiques ne sont pas utilisés pour le transport des informations, ils sont plutôt utilisés pour l'allocation des « Resource element ». On distingue deux types de signaux physiques utilisés en LTE.

### a) Les Signaux de référence

Utilisé pour l'estimation des canaux en transmission OFDMA, les signaux de référence sont insérés aux sous-porteuses. Ces signaux de référence sont aussi appelés « Downlink reference signals » dans la norme LTE. Ils sont utilisés pour déterminer les réponses impulsionnelles de canal (CIR). Les signaux de référence sont classés en trois types suivants :

- Cell-specific Reference signals

Ils sont attribués à chaque cellule dans le réseau et ils sont transmis à chaque sub-frame. En downlink ils jouent le rôle d'identification de la cellule concernée.

- UE-specific Reference signals

Ils sont utilisés pour soutenir les transmissions PDSCH aux points d'accès des antennes. Ils sont transmis seulement aux « Resource blocks » désigné pour le PDSCH.

- Mobile Broadband Single Frequency Network (MBSFN) Reference Signals:

Ils sont utilisés pour les transmissions MBSFN et ils sont transmis au point d'accès de l'antenne.

### b) Signaux de synchronisation

Les signaux de synchronisation sont utilisés pour les UE dans la procédure de recherche d'une cellule.

On distingue deux types :

- signaux de synchronisation primaires
- signaux de synchronisation secondaires.

Ils sont similaires aux signaux de référence et utilisent les même PRN et séquences orthogonales. Les signaux de synchronisation primaires et secondaires sont transmis à un slot "0" et un slot "10" de la frame radio. Ces signaux occupent 72 sous-porteuses.

Physical Signals	Modulation Schemes
Reference Signals	Orthogonal Sequence of Binary PN Sequence
Primary Synchronization Channel (P-SCH)	Cycle of 3 Zadoff-Chu Sequence
Secondary Synchronization Channel (S-SCH)	Two 31 Bit BPSK M Sequence

Tableau II.4 : Techniques de modulation utilisée par les signaux de référence et synchronisation

### II.3.8 Les canaux de transport

Les canaux de transport sont utilisés pour transférer les informations aux couches supérieures et au MAC (Media Access Contrôle) [18], et ils servent comme interface entre la couche physique et le MAC. On a plusieurs types de canaux de transport :

- **Broadcast Channel (BCH)** : Le canal Broadcast (ou le canal diffusion) est un canal à format fixe qui permet la diffusion des paramètres du système pour permettre l'accès des équipements (devises) au système. Ces paramètres doivent être diffusés sur toute la couverture de la cellule.
- **Paging Channel** : Le « Paging Channel » est utilisé pour le transport du « paging information » ou signalisation et aussi comme un commutateur entre l'état « idle state » (inactif) et l'état « connected state » (fonctionnement) .Il exige aussi une diffusion sur toute la couverture de la cellule
- **Multicast Channel** : Le « multicast Channel » est utilisé pour transférer les services multicast aux UE et il doit contenir les informations relatives [21] :
  - Au Fournissement d'un support de diffusion multicast dans un réseau à fréquence unique
  - A l'allocation des ressources.

## II.4 Transmission Uplink

Dans les études d'optimisation de la transmission Uplink de la norme LTE, plusieurs techniques de multiplexage ont été étudiées par exemple TDMA, CDMA, OFDMA, SC-FDMA etc...[23] Si l'OFDMA a été choisi pour son caractère optimal en transmission Downlink, en revanche ses propriétés sont moins favorables pour les transmissions Uplink. Ainsi l'utilisation de l'OFDMA en Uplink pourrait entraîner des mauvaises couvertures.

La technique de transmission Uplink pour les structures FDD (Fréquence Division Duplex) et TDD (time Division Duplex) est basée sur le multiplexage SC-FDM (Single Carrier – Frequency Multiplexing) avec un cyclic préfix. Le principe est le même que celui de l'OFDM et partage quelques-uns de ses avantages. Les signaux SC-FDMA ont les meilleures propriétés du point de vue énergétique, comparé aux signaux OFDMA. C'est la raison principale du choix du SC-FDMA pour les transmissions Uplink avec le Long Term Evolution. Les caractéristiques PARP sont très importantes pour les économies d'énergie (faible consommation de puissance) des amplificateurs dans les UE. En plus du fait de la

similarité du traitement des signaux SC-FDMA avec ceux de l'OFDMA les paramètres Downlink et Uplink peuvent être facilement synchronisé [24], [25].

### II.4.1 La Paramétrisation de la SC-FDMA

La structure LTE Uplink étant similaire à la structure downlink et aux applications FDD, La longueur du PRB (Physical Resource Blocks) et l'espacement des sous-porteuses sont aussi similaires à la transmission downlink.

Les structures utilisant les modes FDD et TDD vu précédemment dans la transmission downlink sont encore utilisés en transmission uplink. D'autre part, dans le domaine temporel, comme nous l'avons déjà vu précédemment, une ressource block RB qui n'est rien d'autre qu'un slot, est constituée dans ce cas de 6 ou 7 symboles SC-FDMA selon la configuration de l'intervalle de garde CP « Normal cyclic prefix » ou « Extended cyclic prefix ». La Figure II.15 donne une représentation en temps de la structure d'un slot ou RB.

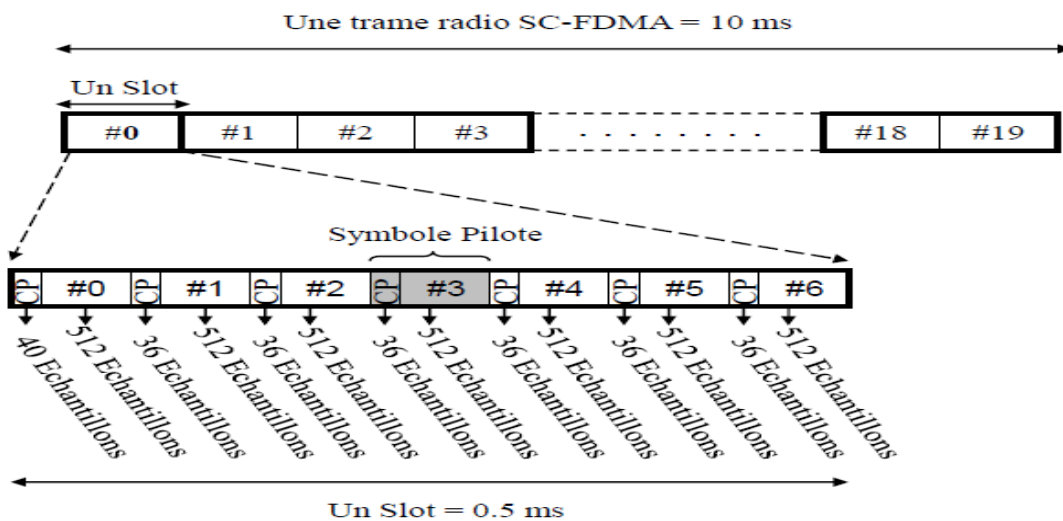


Fig. II.15 Représentation temporelle du slot d'un système SC-FDMA à 5 Mhz de largeur de bande

### II.4.2 La Transmission Uplink

On utilise la DFT-spread-OFDMA (transformé de Fourier) pour la génération de signal SC-FDMA. Pour la DFT-s-OFDMA, une DFT de taille Q (Q étant le nombre de sous-porteuses) est appliqué d'abord au bloc de modulation. Son rôle est la transformation des symboles en domaine fréquentiel.

Le traitement dans le bloc N-point IDFT reste le même comme dans l'OFDMA suivie par la conversion parallèle- série et une addition de cyclic prefix. Le traitement DFT est donc la différence principale entre la génération des signaux SC-FDMA et OFDMA. Dans la technique SC-FDMA, chaque sous-

porteuse est utilisée pour la transmission d'information relative aux symboles modulés transmis. En effet à la sortie de la DFT les informations sont toutes transmises directement aux sous-porteuses contrairement au cas OFDMA où ce sont les symboles modulés eux même qui seront transmis. La Transmission LTE Uplink sera expliquée de manière suivante.

#### II.4.2.1 Émetteur SC-FDMA

D'après ce que nous venons de voir avec SC-FDMA un étage supplémentaire 'Q-point DFT' est donc ajouté à l'émetteur et un étage N-point IDFT au récepteur. A l'entrée de l'émetteur on aura des symboles modulés.

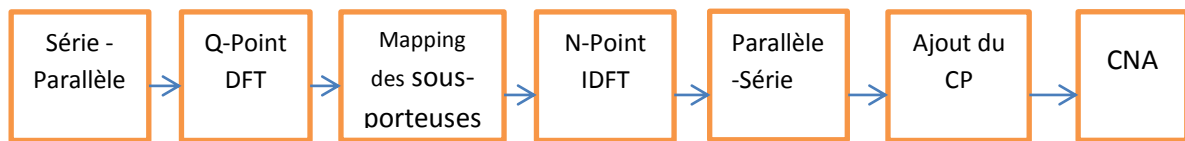


Figure II.16 : Schéma de block de SC-FDMA à l'émission

En SC-FDMA les données sont organisées en constellation de signal suivant les différentes modulations QPSK, 16-QAM et 64-QAM. Elles sont attribuées aux canaux avec des conditions similaires à l'OFDMA. Cependant au lieu d'envoyer les symboles préalablement modulés en (QPSK ou QAM) directement vers les sous-porteuses comme dans l'OFDMA, les symboles ici, passent après la conversion série- parallèle au bloc DFT qui les transforme en domaine fréquentiel. A sa sortie ces symboles seront modulés aux sous-porteuses par le bloc « Mapping des sous porteuses ». Après cette affectation les sous porteuses modulées, étant dans le domaine fréquentiel seront convertis en domaine temporel via le bloc IDFT. Les autres blocs suivront les opérations similaires à l'OFDMA.

Dans le multiplexage SC-FDMA les signaux sont représentés par des sous-porteuses discrète d'où l'appellation SC pour Single Carrier. Contrairement à l'OFDMA les sous-porteuses SC-FDMA ne sont pas modulées indépendamment mais globalement. L'allocation de la sous-porteuse (ressources) joue un rôle important en SC-FDMA.

#### II.4.2.2 Allocation des ressources radio dans le système SC-FDMA

Dans la modulation SC-FDMA, le multiplexage des utilisateurs du système est effectué dans le domaine fréquentiel. Pour supporter un grand nombre d'utilisateurs simultanés, le système utilise la technique de l'étalement spectral permettant d'augmenter la ressource spectrale à partager. Ainsi chaque utilisateur se voit allouée une portion de la largeur de bande totale du système, de manière à



éviter toute interférence avec un autre utilisateur. Deux modes d'allocations de ressources existent pour cette modulation : Il s'agit du mode distribué et du mode localisé.

**a) Allocation de ressource en mode distribué**

Dans le mode distribué les Q symboles fréquentiels  $U_Q^a(n) = \{U_0^{n,a}, \dots, U_{Q-1}^{n,a}\}$ , correspondant à la sortie du modulateur DFT de l'émetteur, viennent moduler un multiplex de Q sous-porteuses régulièrement réparties sur toute la largeur de la bande passante du système, Figure II.17. Les N - Q sous-porteuses non modulées sont affectés à des signaux nuls. La modulation SC-FDMA qui utilise ce mode d'allocation est appelée IFDMA ou (Interleaved-FDMA) [26] [27], L'IFDMA comporte plusieurs avantages. Il permet d'une part de garantir l'orthogonalité entre les différents utilisateurs du système, mais possède également une grande diversité fréquentielle du fait de la répartition des porteuses modulées sur toute la bande passante. Cette technique est aussi très intéressante du point de vu implémentation. En effet ce signal peut être généré dans le domaine temporel sans utilisation des modulateurs DFT et IDFT grâce à une simple compression et répétition du signal source à transmettre avec un déphasage propre à chaque utilisateur. Par contre le système I-FDMA est très sensible aux offsets de fréquence qui sont souvent introduit par une mauvaise synchronisation ou une forte mobilité causant ainsi une perte de l'orthogonalité entre les utilisateurs.

**b) Allocation de ressource en mode localisé**

L'autre mode d'allocation de ressources utilisé dans la modulation SC-FDMA est beaucoup plus robuste et a été adopté pour la voix montante de la norme LTE. Il s'agit du mode localisé qui donne son nom au système L-FDMA ou (Localised FDMA). Cette fois-ci les Q symboles fréquentiels  $U_Q^a(n) = \{U_0^{n,a}, \dots, U_{Q-1}^{n,a}\}$  correspondant à la sortie du modulateur DFT, viennent moduler un multiplex de Q sous-porteuses.

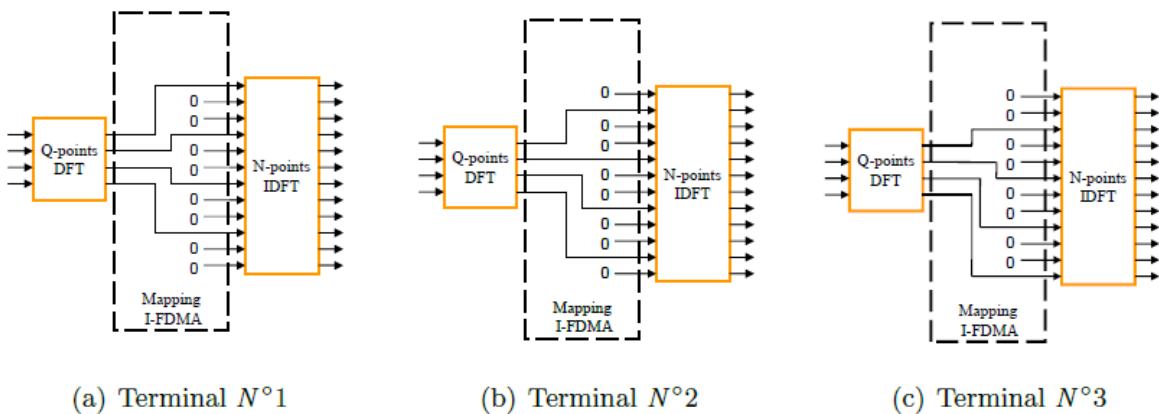


Fig. II.17: Mapping I-FDMA

Les autres sous-porteuses non modulées sont affectées à des signaux nuls Fig.II.18. Les sous porteuses n'étant plus réparties sur toute la bande du système, on perd en diversité fréquentielle. Par contre le système est plus robuste à l'offset de fréquence en garantissant dans ce cas l'orthogonalité des signaux des différents utilisateurs.

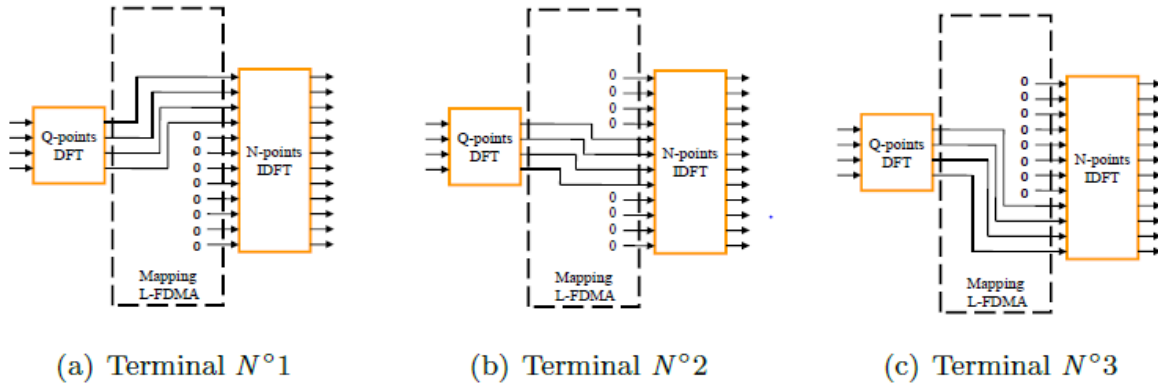


Fig. II.18 : Mapping L-FDMA

Pour l'une ou l'autre des deux techniques d'allocation, le choix du multiplex de fréquences allouées à chaque utilisateur peut se faire de deux manières : Soit de façon statique c'est à dire sur toute la durée de la communication, soit par un algorithme d'ordonnancement de canaux CDS ou « Channel Dépendent Scheduling ») [28] [29] qui octroie à chaque utilisateur, le multiplex de sous-porteuses en fonction de la qualité de son canal de transmission. Un utilisateur peut donc se voir octroyer différents multiplex de sous-porteuses durant la même communication ou même être supprimé du système lorsque son canal de transmission est très médiocre. De plus, le CDS permet d'accroître considérablement la diversité multi-utilisateurs ainsi que le débit total du système dans le cas du mapping L-FDMA comparé à celui de l'I-FDMA [28]. Cela se justifie par le fait que le mapping I-FDMA, pour laquelle les sous-porteuses sont réparties sur toute la totalité de la bande disponible, aura un débit meilleur que dans la sous-bande déterminée par le CDS.

Au niveau récepteur, lorsque le système fonctionne dans sa capacité maximale en termes de nombre d'utilisateurs, le spectre du signal est donné par la Figure II.19. On peut constater l'orthogonalité entre les différentes sous-porteuses allouées à chaque utilisateur, et également l'orthogonalité entre les utilisateurs dans le domaine fréquentiel. En présence d'offset de fréquences, il est clair que le mode localisé est plus robuste que le mode distribué [5]. Ceci vue dans le chapitre suivant à travers la simulation utilisant une variation du facteur de Roll-off.

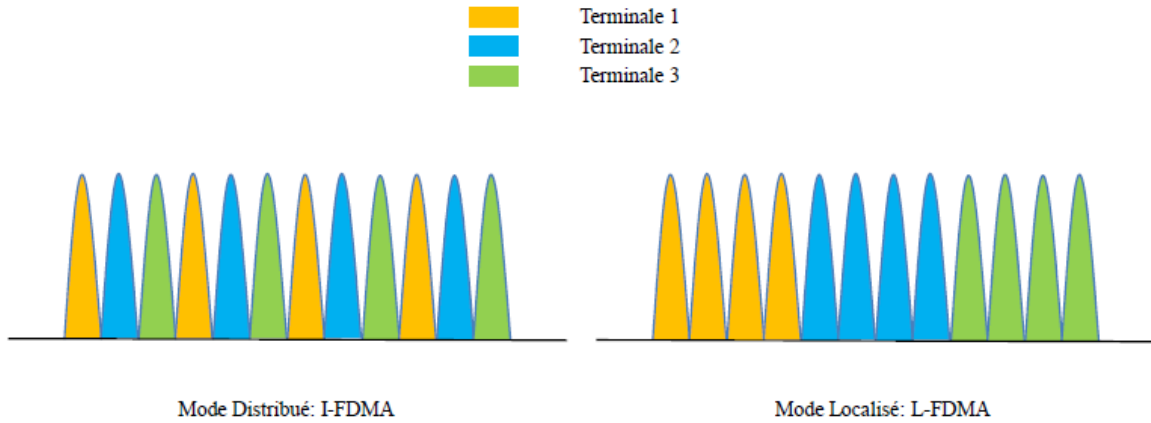


Fig. II.19 Comparaison des modes I-FDMA et L-FDMA

### II.4.2.3 Récepteur SC-FDMA

Encore ici tout est quasiment pareil à l'OFDMA mais avec les blocs supplémentaires de « demapping des sous-porteuses » et IDFT. La réallocation des Q sous-porteuses attribués permet d'obtenir N-signaux discrets. A la fin de l'IDFT on obtient les signaux SC-FDMA.

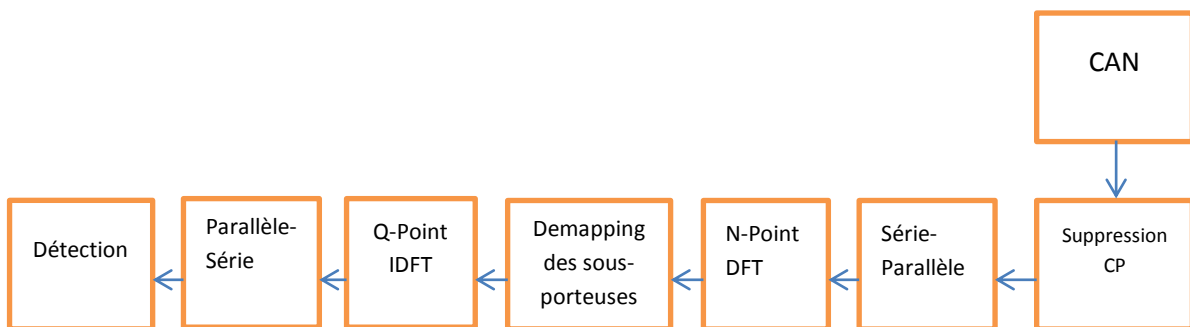


Figure II.20 : SC-FDMA au Récepteur.

En transmission uplink, on a des signaux porteurs de données supplémentaires à savoir les signaux de référence, les signaux de contrôle et le « Random access preamble ». C'est signaux sont considérés comme des séquences de signalisation et on une amplitude constante avec une autocorrélation nulle. Contrairement aux signaux informatifs, ces signaux ne font pas parti des systèmes de modulation SC-FDMA.

### II.4.3 Les canaux physiques en Uplink

On a trois types de canaux physiques utilisés en uplink :

#### a) Physical Random Access Channel (PRACH)

Le canal « Physical Random Access Channel » est utilisé pour véhiculer la « Random access preamble ». Il transmet la signature de séquence et la CP qui a été reçu de la couche de transport. Avec le PRACH, une requête de transmission de ressource est transmise sur les autres canaux physiques. Ce canal à un accès aléatoire pour initier les dialogues avec le réseau lorsque le mobile n'est pas synchronisé avec ce dernier. Des zones spécifiques communes doivent être aménagées permettant l'accès spontanés des UE [30].

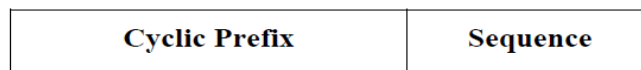


Figure II.21 : Format de Random access preamble

#### b) Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)

Le canal « Physical Uplink Shared Channel » (PUSCH) génère les signaux SC-FDMA en domaine temporel pour chaque point d'accès de l'antenne et il porte les données de l'utilisateur pour la transmission. Le temps de transmission de PUSCH est de 1ms et il utilise la QPSK, la 16-QAM et la 64-QAM comme des techniques de modulation.

#### c) Physical Uplink Control Channel (PUCCH)

Le rôle de « Physical Uplink Control Channel (PUCCH) » est de porter l'information de contrôle s'il n'y pas de transmission sur le PUSCH. Le PUCCH envoie les services « Scheduling Request » et il transmet les réponses ACK et requête de retransmission (ACK, ARQ, NACK, feedback MIMO), il transfère aussi l'information de qualité de canal(CQI) mesuré par les UE, aux systèmes. L'UE se voit allouer un PUSCH et un PUCCH, mais n'en utilise qu'un seul à la fois.

### II.4.4 Les signaux physiques

Dans la couche physique on a deux types de signaux physiques qui ne font pas la transmission depuis les couches supérieures [21].

### a) Les signaux de référence

En Uplink on a deux types de signaux de référence qui sont basés sur la séquence de Zadhoff-chu.

- Le « Sounding reference signal » qui assiste l'allocation de fréquence.
- le signal de démodulation qui assiste les démodulations successives.

### b) La Random Access Preamble

La « Random Access Preamble » implique la couche physique et supérieure. Elle est à l'origine de la procédure de recherche d'une cellule par l'UE. La réponse « Random Access » est reçu à partir de la station de base si l'opération est réussie.

## II.4.5 Les canaux de transport

Pour les couches supérieures, les canaux de transport ont une fonction similaire au point d'accès des services en downlink. On distingue deux types de canaux de transport en Uplink [21] [30] :

- Uplink-Shared Channel (UL-SCH): L'Uplink-Shared Channel (UL-SCH) est utilisé pour soutenir la « Hybride Automatic Repeat Request (HARQ) » et l'adaptation de chainage par exemple la variation de puissance à l'émetteur, commutation entre les techniques de modulation et codage
- Random Access Channel (RACH) : Le Random Access Channel (RACH) utilise pour la transmission de « Limited control » de part d'UE, il définit aussi les risques de collision dans les transmissions depuis d'autres UE.

## II.5 Etude Comparative de l'OFDMA et de la SC-FDMA

Comme on le sait l'OFDMA est une technique d'accès multiple basée sur la technique OFDM, et adoptée dans la norme 3GPP LTE pour les communications dans le sens descendant. Comme nous avons pu le constater précédemment, le système SC-FDMA a des ressemblances à bien des égards avec le système OFDMA. Sur la Figure ci-dessous, on peut observer que le SC-FDMA n'est rien d'autre que de l'OFDMA avec un précodage DFT suivi d'un multiplexage particulier dans le domaine fréquentiel [5].

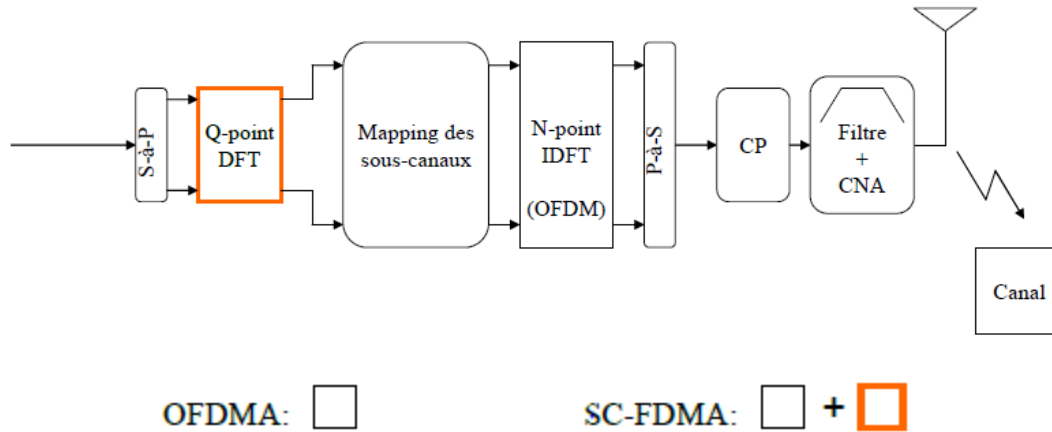


Fig. II.22 : Similitude entre une chaîne OFDMA et SC-FDMA [5]

Cette figure permet de relever les points communs entre ces deux techniques qui sont les suivants :

- Une transmission des données en blocs
- Un multiplexage des données en fréquentiel au sens où ils sont réparties sur plusieurs sous-porteuses orthogonales
- Une égalisation de canal réalisée dans le domaine fréquentiel
- Un intervalle de garde pour prévenir des interférences entre les blocs

Mais ces techniques n'ont pas que des points communs. La différence majeure entre elles, réside dans le fait que l'OFDMA est une technique de transmissions multi-porteuses tandis que la SC-FDMA est quant à elle une technique mono-porteuse. L'OFDMA permet d'une part d'augmenter de manière considérable le débit du système, grâce à la transmission en parallèle des symboles de données, mais permet également au système d'être plus robuste vis à vis des interférences entre symboles grâce à l'augmentation de leur durée. Mais ce système n'a pas que des avantages. En effet le caractère multi-porteuses du signal émis de l'OFDMA, conduit à une fluctuation importante du signal autour de sa valeur moyenne : On a un fort PAPR qui nécessite soit un traitement de réduction auquel cas on augmenterait la complexité du système, soit en adoptant un IBO (que nous verrons dans le chapitre suivant) élevé ce qui entrainerait un mauvais rendement énergétique du système.

Par contre les systèmes SC-FDMA transmettent les symboles de façon séquentielle au cours du temps sur une seule porteuse. Il s'agit ainsi d'un système mono-porteuse. De ce fait, contrairement à l'OFDMA ce système a l'avantage d'avoir un très faible PAPR qui a été déterminant quant à son adoption dans la norme 3GPP LTE. Une autre différence importante est la présence de la DFT dans le système SC-FDMA que nous avons remarqué plus haut. En effet la DFT ici aura pour rôle de

transformer les symboles en domaine fréquentielle, d'où l'appellation de « DFT-spread ». On peut constater alors qu'un autre avantage de ce système par rapport à l'OFDMA est le précodage réalisé à l'émission. En effet l'OFDMA réalise une égalisation et une détection séparément pour chaque sous-porteuse du système. Les données sont réparties sur les sous-porteuses, une transformation de Fourier (DFT) est appliquée comme précorrection. Ainsi lorsque qu'aucun codage est réalisé dans ce système, le canal étant très sélectif, certaines porteuses seront supprimées et il serait donc impossible de retrouver le flux de données localisé sur les porteuses supprimées. Par contre dans le système SC-FDMA la détection est effectuée après le modulateur DFT à la réception qui le rend ainsi moins sensible à la sélectivité fréquentielle du fait que les perturbations sont moyennées sur toute la largeur de bande du système comme on peut le constater sur la Figure II.23. Le modulateur DFT se comporte donc comme un précodeur.

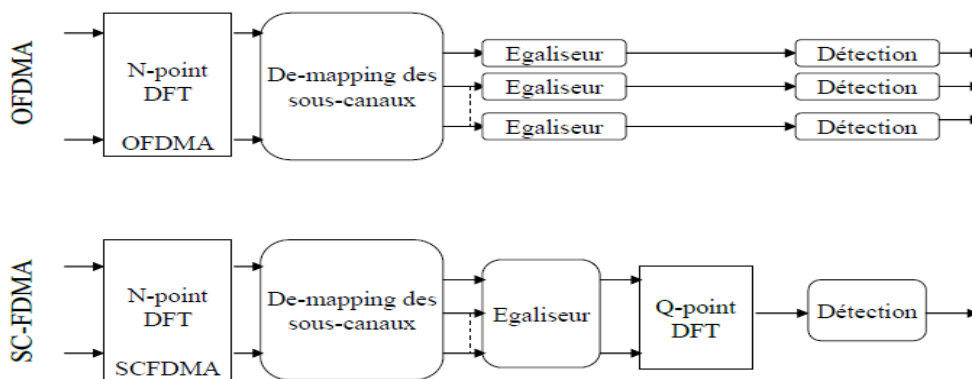


Fig. II.23 Egalisation des systèmes OFDMA et SC-FDMA

De ce qui précédemment on voit que la SC-FDMA présente l'avantage de produire des puissances dans les canaux adjacents relativement faibles, même lorsque l'amplificateur final n'est pas absolument linéaire (voir Chap.III). Avec la SC-FDMA, les exigences en matière de linéarité de l'amplificateur final du téléphone portable ne sont pas très élevées. Par conséquent, la consommation de courant peut être limitée. Comme on le sait, avec l'OFDMA, en raison du PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) élevé du signal, un amplificateur de puissance très linéaire est requis. La grande consommation de courant qui en résulte constituerait un inconvénient majeur, facilement évitable avec la SC-FDMA. A titre d'exemple, le téléphone mobile SC-FDMA consomme trois fois moins de courant qu'un appareil OFDMA offrant le même débit de données et présentant le même taux d'erreur sur les *bits*.

Avec la SC-FDMA, le récepteur de la station de base nécessite un égaliseur (*equalizer*) relativement complexe. Toutefois, ce procédé est bien plus résistant que l'OFDMA aux écarts des fréquences porteuses. La complexité de la liaison ascendante vers la station de base a été en grande partie placée dans la station de base, ce qui a permis de concevoir des terminaux moins chers et plus performants du point de vue énergétique. Le procédé d'accès multiple SC-FDMA en liaison ascendante constitue une nouveauté dans le monde de la radiocommunication mobile.

## II.6 Conclusion

Dans cette partie, nous avons vu en détails les techniques des systèmes OFDMA et SC-FDMA. L'OFDMA présente bon nombre d'avantage mais aussi quelques inconvénients. Le système SC-FDMA étant monoporteuse, du fait de la transmission séquentielle sur une porteuse, présente l'avantage d'avoir un faible Peak to Average Power Ratio (PAPR) qui est un critère très bénéfique pour la consommation des batteries dans les téléphones mobiles. A cause de ces mérites, le système SC-FDMA a été adopté comme technique d'accès multiple pour les communications en voix montante dans la nouvelle norme de téléphonie mobile le 3GPP LTE ou Long Term Evolution. L'analyse des spécificités de ces deux méthodes d'accès faite, nous pouvons maintenant passer à la vérification de tout ceci par la simulation, objet du chapitre suivant.



# CHAPITRE 3

---

## Performance PAPR de l'OFDMA et la SC-FDMA

### III.1 INTRODUCTION

La notion de PAPR [5] est très importante dans les systèmes de communications. Elle est causée par plusieurs phénomènes dont le principal est la consommation énergétique des amplificateurs de puissance dans les émetteurs radio mobile. Le Peak to Average Power Ratio représente aussi un indicateur du risque de distorsion du signal par l'amplification. Dans cette partie de notre travail nous introduirons la notion du PAPR après quelques généralités sur les amplificateurs de puissance et les influences du PAPR sur ceux-ci. Puis nous présenterons les résultats de notre simulation sous Matlab qui nous aidera à examiner et comparer le PAPR du signal SC-FDMA et celui de l'OFDM.

### III.2 Etude du PAPR (Peak to Average Power Ratio)

#### III.2.1 Généralité sur les amplificateurs de puissance

##### a) Définition

Dans Tout système de transmission radio mobile, le signal passe par plusieurs étages de la chaine de transmission notamment le codage, modulation, et transposition en fréquence porteuse. Avant

d'être envoyé dans le canal de transmission, le signal est amplifié. Cette opération est assurée par un amplificateur de puissance qui est par définition un dispositif électronique permettant d'augmenter de manière considérable tout signal présenté à son entrée. La puissance du signal de sortie de l'émetteur est proportionnelle à la distance qui sépare l'émetteur et le récepteur du système de communication. L'amplificateur de puissance étant un composant actif. On distingue Deux grandes classes d'amplificateurs de puissance pour les systèmes de télécommunications :

- L'amplificateur à tubes à onde progressives (TOP, TWTA ou " Traveling Wave Tube Amplifier") utilisé surtout dans les transmissions satellitaires, pour générer de fortes puissances [31].
- L'amplificateur à semi-conducteur (SSPA, ou « Solid State Power Amplifier »), utilisé dans les transmissions terrestres comme dans le cas de la communication radio mobile, les téléphones portables et la boucle radio [32].

Dans un amplificateur de puissance la relation entrée-sortie est caractérisée par deux fonctions de transferts. L'une relative à la phase et l'autre à l'amplitude du signal de sortie de l'amplificateur. Ainsi la caractéristique AM/AM que nous analyserons en détail ici, donne la relation entre la puissance du signal d'entrée et celle du signal de sortie.

Cette caractéristique AM/AM a un aspect particulier pour les amplificateurs de type SSPA.

Nous pouvons décomposer la caractéristique AM/AM d'un amplificateur de puissance en trois zones particulières :

- Une zone linéaire (Zone I) : C'est la plus exploitée. Dans cette zone l'amplificateur a un comportement linéaire. Le signal de sortie est donc proportionnel au signal d'entrée avec un gain généralement supérieur à 1. C'est un cas idéal que l'on souhaite obtenir. Aucune distorsion n'apparaît dans cette zone. Notons que les puissances d'entrée sont faibles dans cette zone.
- Une zone de compression (Zone II) : Dans cette zone, la puissance de sortie de l'amplificateur n'est plus proportionnelle à celle du signal d'entrée. Des signaux de nature différente au signal d'entrée apparaissent en sortie : ce sont des distorsions qui peuvent être des distorsions d'amplitudes, d'harmoniques, de phase, ou encore d'intermodulations. Le signal n'est plus alors proportionnel à celui en entrée. On remarque que la caractéristique de l'amplificateur dans cette zone est de plus en plus curviligne. Le gain diminue donc par rapport à celui de la zone linéaire où il était constant. Cette zone contient un point particulier appelé point de compression de l'amplificateur, qui est atteint lorsque l'écart entre la courbe

de gain de cette zone et le prolongement du gain linéaire de la zone linéaire est de 1 dB, Fig.III.1.

- La zone de saturation (Zone III) : C'est une zone où la puissance de sortie du signal reste quasi constante lorsque l'on augmente la puissance de l'entrée. On dit que l'amplificateur est saturé. Dans cette zone des distorsions apparaissent également. Notons que les puissances d'entrée  $y$  sont très élevées. Le bilan énergétique est donc médiocre.

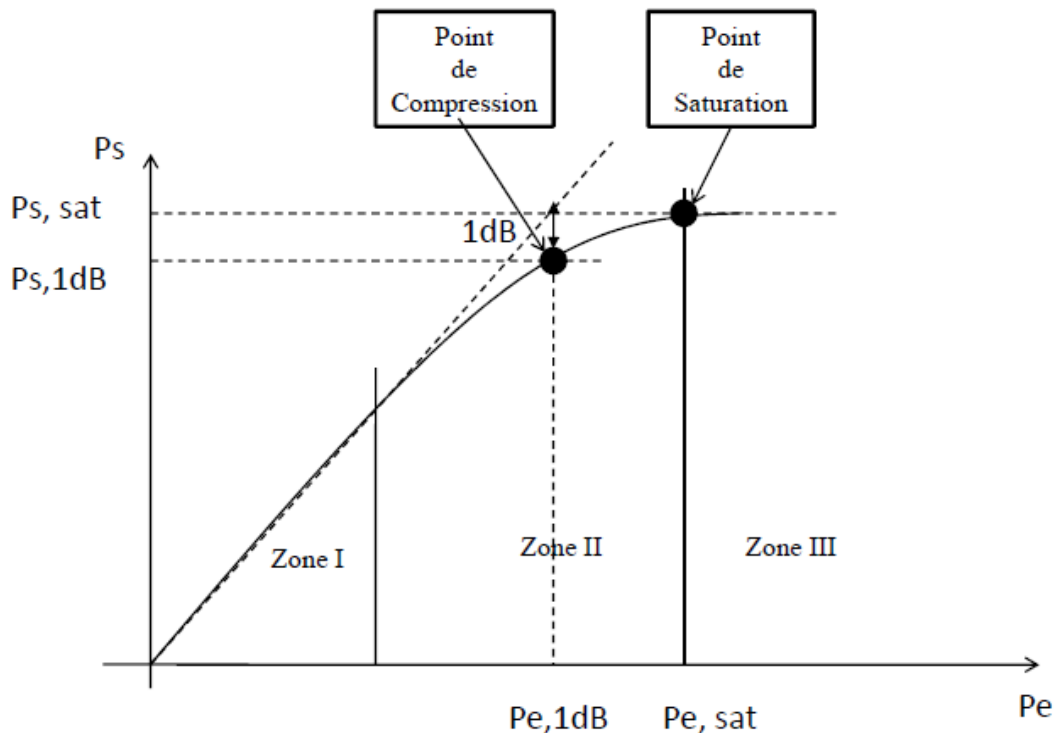


Fig. III.1 Exemple de Caractéristique AM/AM d'un amplificateur de puissance [5]

Ainsi donc selon la zone d'amplification, le signal obtenu à la sortie de l'amplificateur sera plus ou moins affecté par les distorsions. Il sera nécessaire de toujours se rapprocher du point de compression tout en restant dans la zone linéaire afin d'éviter les distorsions et maximiser le rendement. Un tel compromis est assez complexe à réaliser. Certains systèmes procéderont par l'élargissement de la zone linéaire de l'amplification. La linéarisation devient alors très bénéfique pour les amplifications.

L'utilisation optimale d'un amplificateur de puissance se traduit généralement par un fonctionnement dans sa zone linéaire à une certaine hauteur du point de compression que nous avons définie plus haut. Cela se traduit par un choix judicieux des niveaux de puissance du signal d'entrée qu'on souhaite amplifier. Soit  $P_e$  la puissance d'entrée de l'amplificateur et  $P_{e, 1dB}$  celle au

point de compression. De même notons par  $P_s$  la puissance de sortie de l'amplificateur et  $P_{s,1dB}$  celle au point de compression.

On définit les notions suivantes de « Input Back-Off »(IBO) et de « Output Back-Off » par les relations suivantes :

$$IBO = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{e,1dB}}{P_e} \right) \quad (III.1)$$

$$OBO = 10 \log \left( \frac{P_{s,1dB}}{P_s} \right) \quad (III.2)$$

L'IBO ou l'OBO sont des paramètres caractérisant la zone de la fonction de transfert AM/AM de l'amplificateur dans laquelle il est utilisé, Fig.III.2. Plus ils sont faibles, plus on s'approche de la zone de saturation de l'amplificateur et on verrait apparaître des distorsions. Dans ce cas, le seul avantage serait le rendement énergétique obtenu qui est très important pour le bilan énergétique. En effet, on montre que le rendement d'un amplificateur analogique des classes A, B, AB, et C qui sont les plus utilisés, est donné par l'équation III.3, [33], où  $\theta$  représente l'angle de conduction du courant du drain. On peut ainsi observer que lorsque l'OBO est faible, c'est à dire  $P_s$  élevée, on a bien un rendement  $\eta$  important.

$$\eta = \frac{\theta \sin(\theta) \cos(\theta)}{2(\sin(\theta) - \theta \cos(\theta))} \cdot \frac{1}{OBO} \quad (III.3)$$

Par contre, un OBO élevé nous donne une puissance de sortie faible. On s'éloigne donc du point de compression de l'amplificateur en se rapprochant d'avantage de sa zone linéaire. Ainsi de très faibles distorsions du signal apparaissent, voir aucunes. Ainsi l'idée pourrait être d'adopter un OBO élevé en effectuant un recul d'entrée (IBO) important. Mais ce choix n'est pas sans conséquence car comme on peut le voir avec l'équation (III.3) un OBO élevé entraîne un rendement très faible. Dans ce cas, l'amplificateur consommerait plus d'énergie inutilement [5].

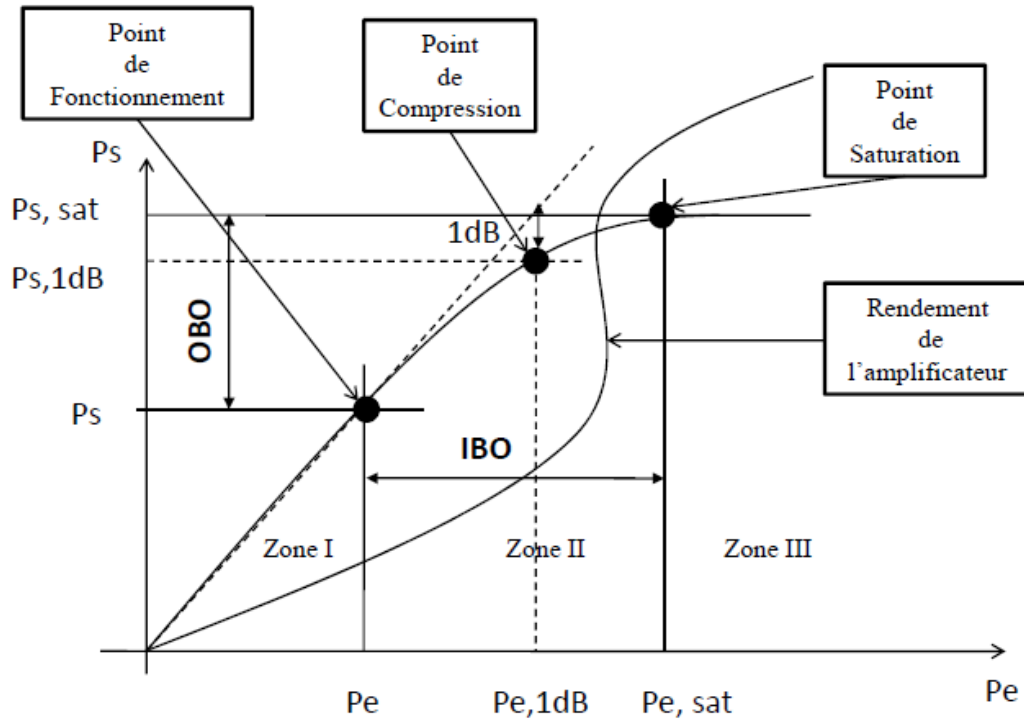


Fig. III.2 Exemple de Caractéristique AM/AM d'un amplificateur de puissance

### III.2.2 Influence du PAPR sur l'amplification

Lorsqu'aucune modification n'est apportée à l'amplificateur, on peut trouver un critère sur le signal d'entrée qui permet de fixer le choix du point de fonctionnement de l'amplificateur. En effet, il est aisé de constater que lorsque le signal d'entrée possède de fortes excursions autour de sa moyenne, il sera risqué d'amplifier le signal dans une zone proche de la saturation à cause des distorsions. Par contre lorsque ses excursions sont faibles, amplifier le signal dans la zone critique n'entraînerait pas de distorsions ou très faiblement, et permettrait d'obtenir un grand rendement.

En effet, le PAPR d'un signal  $x(t)$  ou « Peak to Average Power Ratio » [34] est par définition le rapport entre la puissance maximale du signal  $x(t)$  et sa puissance moyenne sur un temps donné. Cette quantité indique l'amplitude des excursions autour de la valeur du signal d'entrée. Il permet ainsi de déterminer le bon recul d'entrée (IBO) à adopter afin de s'assurer que les plus grandes excursions du signal soient loin de la zone de saturation.

$$\text{PAPR} = \frac{\max_{0 \leq t \leq T} (|x(t)|^2)}{\frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt} \quad (\text{III.4})$$

Un signal à faible PAPR possède de faibles excursions autour de sa valeur moyenne, on peut ainsi choisir un point de fonctionnement proche du point de compression sans risquer d'obtenir des distorsions et en garantissant un rendement plus élevé. On peut citer comme exemple, le choix de la modulation GMSK pour le GSM qui permet d'obtenir un PAPR nul [35] pour un canal GSM. Par contre un signal à fort PAPR possède des excursions très importantes autour de sa moyenne. Pour ces signaux le choix d'un point de fonctionnement très éloigné de la zone de saturation de l'amplificateur s'impose. Ce choix est très préjudiciable car le rendement obtenu sera très médiocre. Comme vu au chapitre II, les signaux multi-porteurs comme l'OFDM sont des exemples de signaux à fort PAPR.

### III.2.3 Evaluation du PAPR du signal SC-FDMA

Dans cette partie nous examinons le PAPR du signal SC-FDMA [36]. Pour cela le signal émis, qui peut s'écrire comme suit où  $f_c$  représente la fréquence RF du système.

$$S^k(t) = \frac{1}{N} e^{j2\pi f_c t} \sum_{m=0}^{N-1} S_m^k p(t - mT) \quad (\text{III.5})$$

La relation (III.4) permet de définir le PAPR du signal SC-FDMA de l'utilisateur k comme suit

$$\text{PAPR} = \frac{\max_{0 \leq t \leq T} (|S^k(t)|^2)}{\frac{1}{T} \int_0^T |S^k(t)|^2 dt} \quad (\text{III.6})$$

Le filtrage remonte le PAPR du signal [38] mais lorsqu'aucun filtre de mise en forme n'est utilisé le PAPR du signal SC-FDMA de l'utilisateur k se calcule simplement à partir de ses symboles  $S_m^k$  émis :

$$\text{PAPR} = \frac{\max_{0 \leq m \leq N-1} (|S_m^k|^2)}{\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} |S_m^k|^2} \quad (\text{III.7})$$

La suite de symboles  $\{S_m^k\}_{0 \leq m \leq N-1}$  suit une loi aléatoire car générée à partir des symboles sources tirés dans un alphabet de Q éléments selon une loi uniforme. Dès lors le PAPR du signal devient une variable aléatoire. Il est donc nécessaire d'utiliser la distribution du signal pour le calcul de la valeur maximale des échantillons  $|S_m^k|^2$  ainsi que de leur valeur moyenne.

L'amplitude d'un signal mono-porteuse n'a pas une distribution gaussienne, [37] il est donc difficile d'établir une expression exacte du PAPR du signal SC-FDMA qui est un signal mono-porteuse comme nous l'avons déjà indiqué.

Ainsi, pour contourner le problème, on utilise en général des méthodes numériques pour estimer le PAPR. La technique la plus répandue est celle de la CCDF « Complementary Cumulative Distribution Function » du PAPR [38] qui correspond à la probabilité pour que le PAPR soit supérieur à une certaine valeur  $PAPR_0$  :  $\Pr(PAPR > PAPR_0)$ .

En résumé, pour déterminer le PAPR du signal SC-FDMA nous simulerons la chaîne de transmission du système pour générer les symboles  $\{S_m^k\}_{0 \leq m \leq N-1}$  sur une période  $T$  ; l'équation (III.3) ou (III.4) sera ensuite appliquée pour déterminer numériquement le PAPR du signal.

### III.3 Simulation du PAPR des signaux SC-FDMA et OFDMA

Pour la simulation de notre paramètre PAPR nous utiliserons Matlab version 7.6 2008a. Matlab venant de *matrix laboratory* est un langage de programmation de quatrième génération et un environnement de développement ; il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société « The MathWorks », Matlab permet la manipulation de matrice, afficher des courbes et des données, mettre en œuvre des algorithmes, créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Matlab s'utilise dans des milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. Il est très pratique pour les modélisations de paramètres.

Pour le premier cas de la simulation, nous choisirons un système de 5MHz de largeur de bande avec les modulations de type Q-PSK, 16QAM et 64QAM pour les deux signaux SC-FDMA et OFDMA. La taille de la DFT au niveau émetteur est fixée à  $Q = 16$  et la taille de l'IDFT à  $N = 512$  pour le système SC-FDMA. Pour les systèmes OFDM, aucun filtre n'est utilisé et la taille de l'IDFT est également fixée à  $N = 512$ .

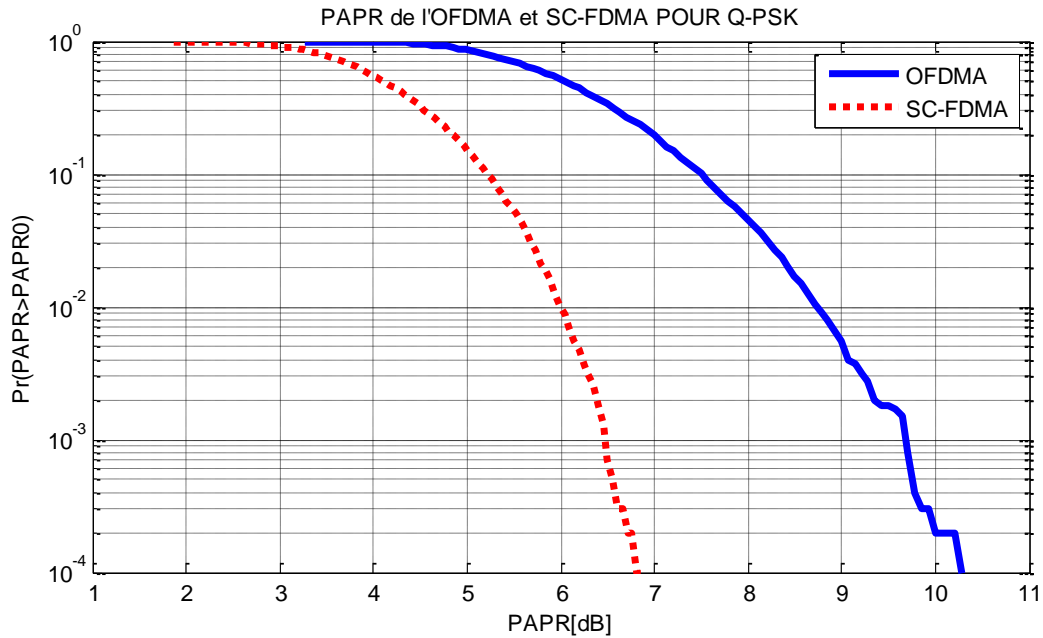


Fig. III.3: PAPR de l'OFDMA et SC-FDMA pour la modulation QPSK

En utilisant une modulation QPSK pour une largeur de bande de 5 MHz on constate que le CCDF de l'OFDMA est supérieur à celui du SC-FDMA. Pour une probabilité de  $10^{-4}$ , l'OFDMA nous donne un PAPR de 10,28 dB contre 6,81 dB pour la SC-FDMA.

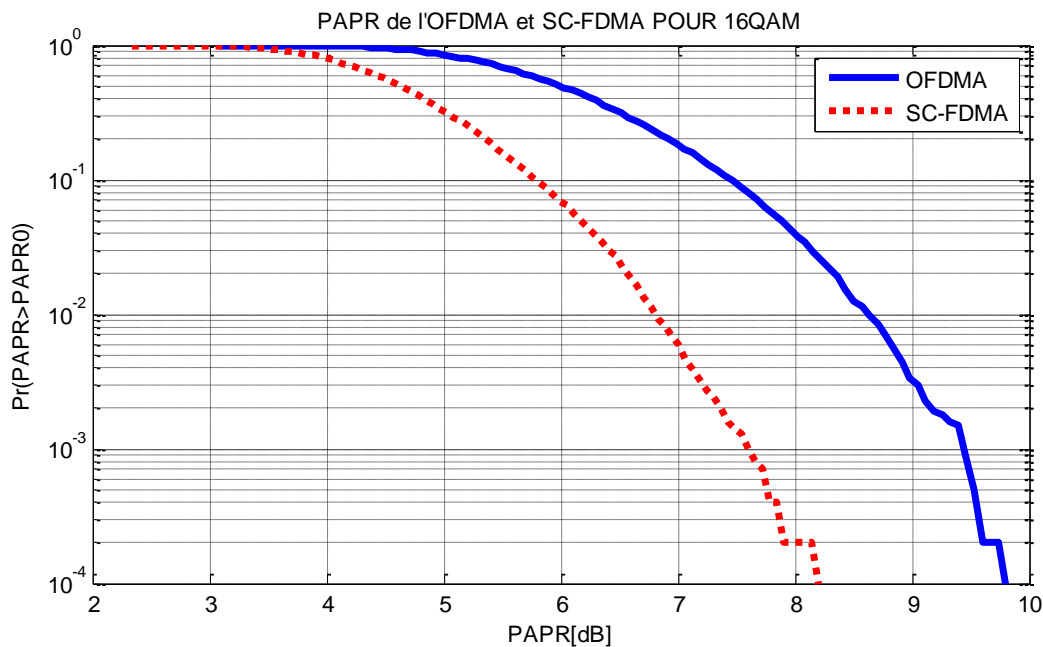


Figure III.4 : PAPR de l'OFDMA et SC-FDMA pour la modulation 16QAM

Avec une modulation 16QAM pour les mêmes paramètres le CCDF de l'OFDMA est toujours supérieur à celui du SC-FDMA. Mais le PAPR du SC-FDMA augmente à 8,20 dB pour une probabilité de  $10^{-4}$ .



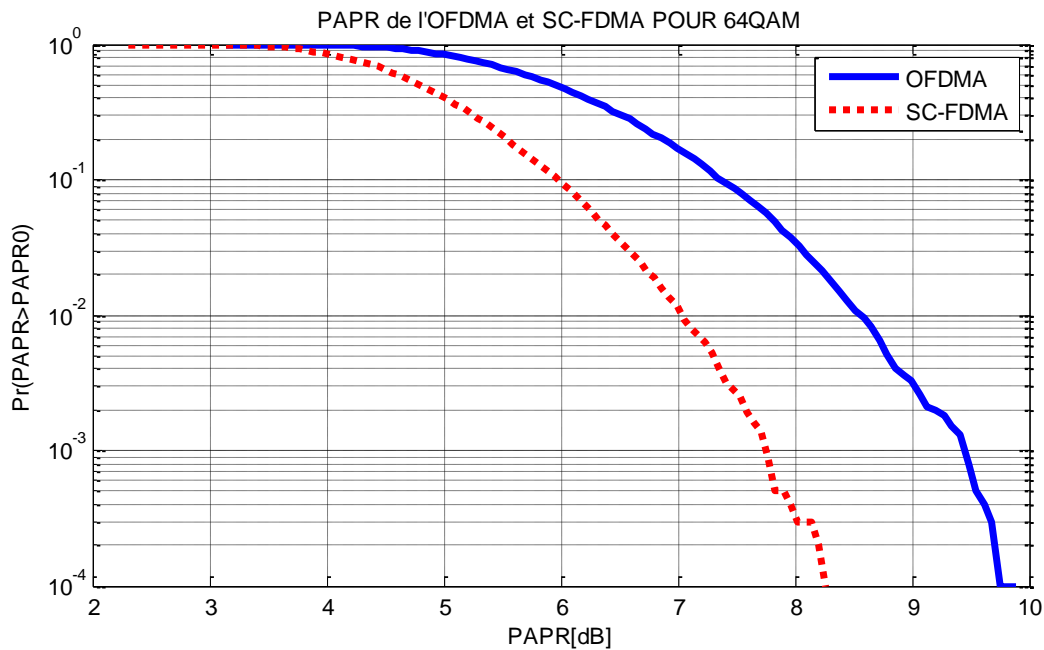


Fig. III.5 : PAPR de l'OFDMA et SC-FDMA pour la modulation 64QAM

Avec la modulation 64QAM avec les mêmes paramètres on obtient toujours les mêmes conditions. Mais le PAPR du SC-FDMA augmente considérablement à 8,26 dB pour une probabilité de  $10^{-4}$ .

Technique de modulation	QPSK	16QAM	64QAM
SC-FDMA	6.81 dB	8.20 dB	8.26 dB
OFDMA	10.28 dB	9.80 dB	9.75 dB

Tableau III.1 Comparaison des PAPR de l'OFDMA et SC-FDMA à l'utilisation des différentes modulations

A partir des figures III.3, III.4 et III.5, on constate qu'en passant de la modulation QPSK à la modulation 16QAM et ensuite à la 64QAM, le PAPR de SC-FDMA augmente et celui de l'OFDMA diminue. Cependant quelque soit les conditions et les paramètres le CCDF du PAPR de l'OFDMA reste toujours supérieur à celui du SC-FDMA.

Dans ce deuxième cas, nous choisirons un système de 10MHz de largeur de bande avec les modulations de type Q-PSK, 16QAM et 64QAM pour les deux signaux SC-FDMA et OFDM. La taille de la DFT au niveau émetteur est fixée à  $Q = 16$  et la taille de l'IDFT à  $N = 1024$  pour le système SC-FDMA, Pour les systèmes OFDM, aucun filtre n'est utilisé et la taille de l'IDFT est également fixée à  $N = 1024$ .

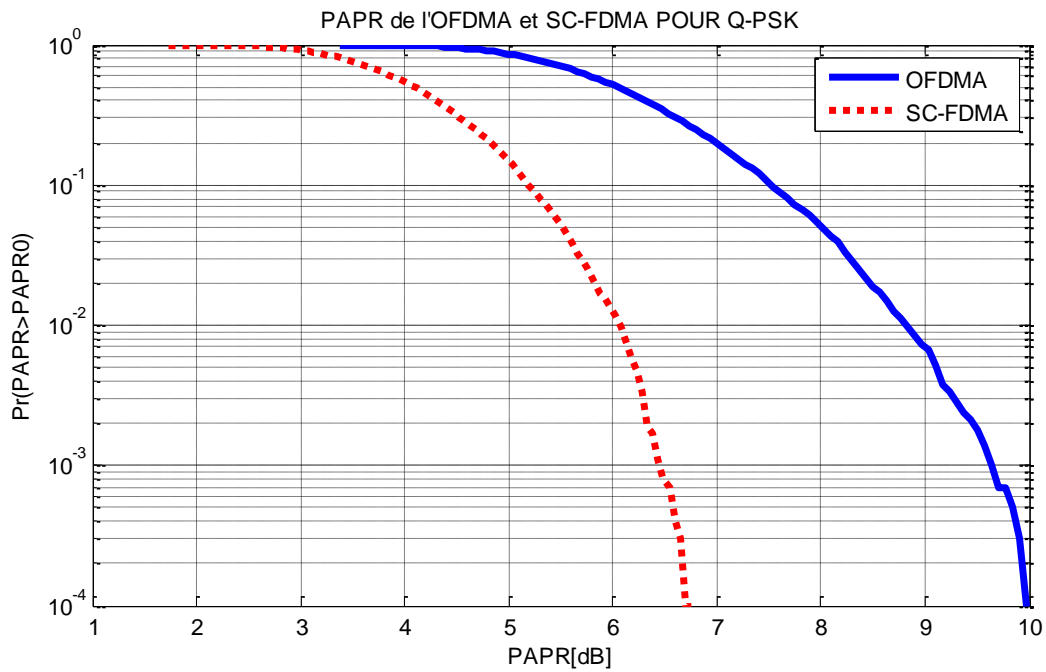


Fig. III.6 : PAPR de L'OFDMA et SC-FDMA pour la modulation QPSK

En utilisant la modulation Q-PSK pour une bande passante 10 MHz on a un PAPR d'environ 6,69 dB à une probabilité de  $10^{-4}$ . Celui de l'OFDMA reste bien supérieur avec 9,97 dB.

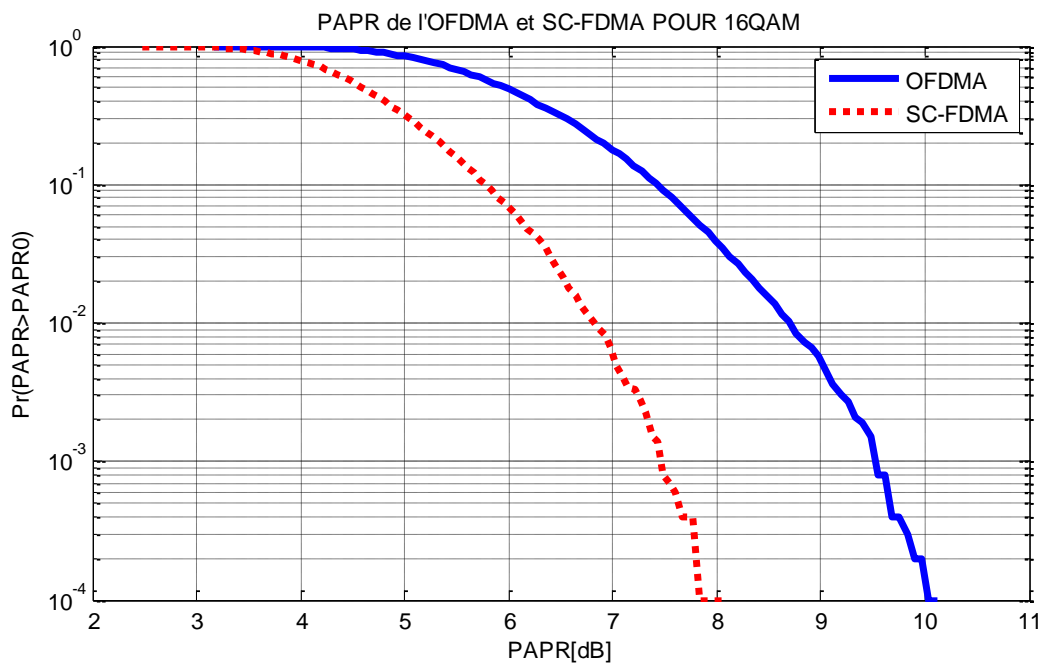


Fig.III.7 : PAPR de L'OFDMA et SC-FDMA pour la modulation 16QAM

Avec la modulation 16 QAM on voit qu'on obtient toujours un CCDF de l'OFDMA supérieur au CCDF du SC-FDMA.

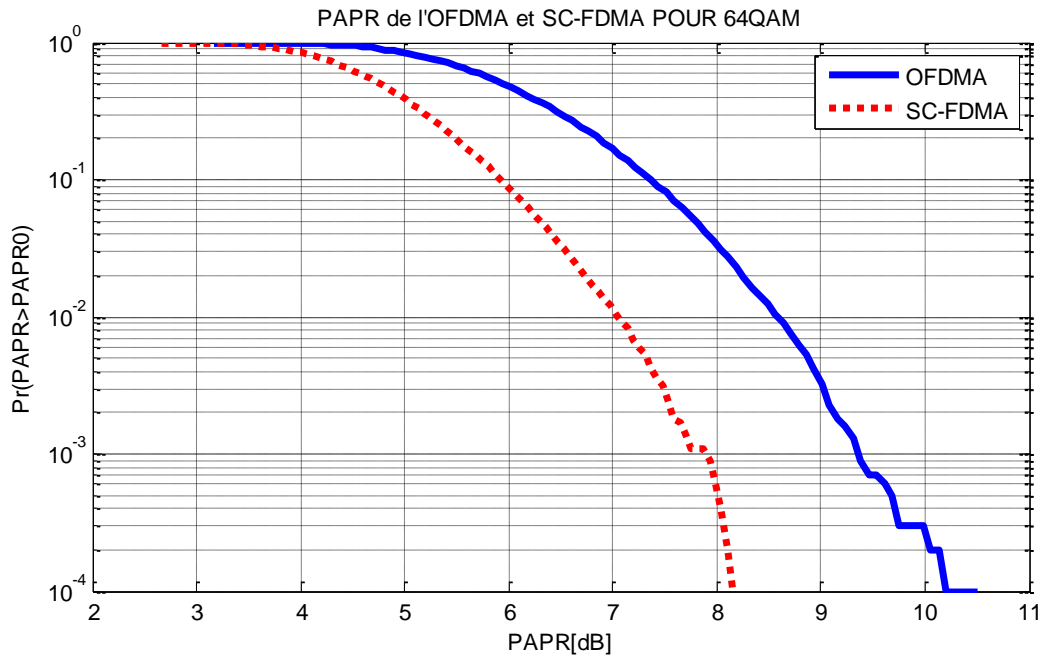


Fig.III.8 : PAPR de L'OFDMA et SC-FDMA pou la modulation 64QAM

On peut également noter l'influence du facteur de roll-off sur le PAPR du signal. Plus ce facteur diminue, plus le PAPR du signal SC-FDMA (IFDMA et LFDMA) augmente.

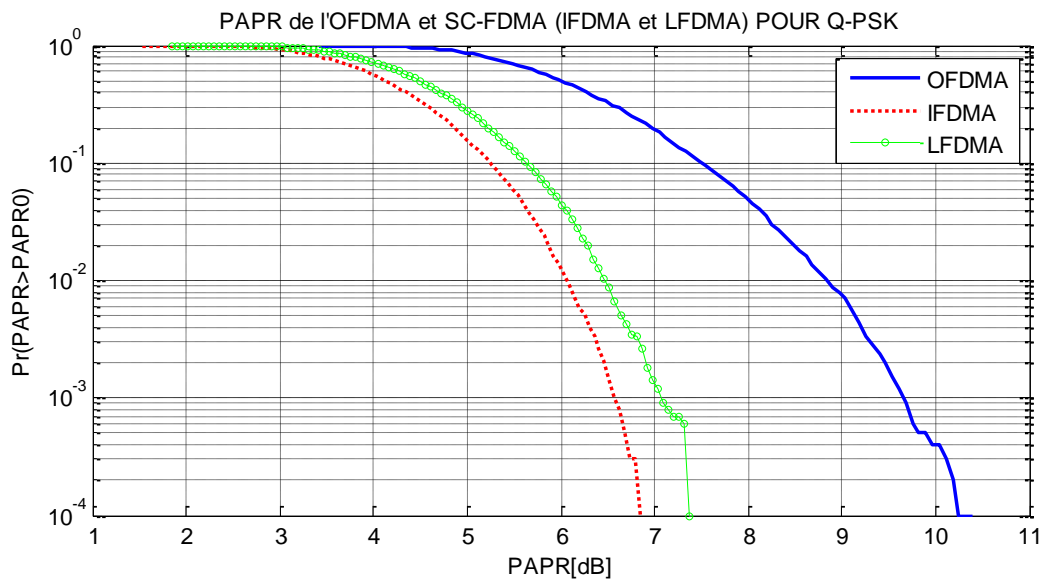


Fig.III.9 : Comparaison de la CCDF du PAPR du signal SC-FDMA avec un filtre de mise en forme en cosinus-surélevé (Roll-off  $\alpha=0.09999$ ), et du signal OFDMA.

On observe que le PAPR du signal I-FDMA est toujours inférieur à celui du signal L-FDMA, même si cet écart se resserre lorsque nous utilisons un filtre de mise en forme en cosinus surélevé. Mais malgré la dégradation du PAPR du signal SC-FDMA, le PAPR de l'OFDM reste très élevé par rapport à celui du signal SC-FDMA. Il est aussi intéressant de noter que le PAPR du L-FDMA ne varie pratiquement pas avec le facteur de roll-off.

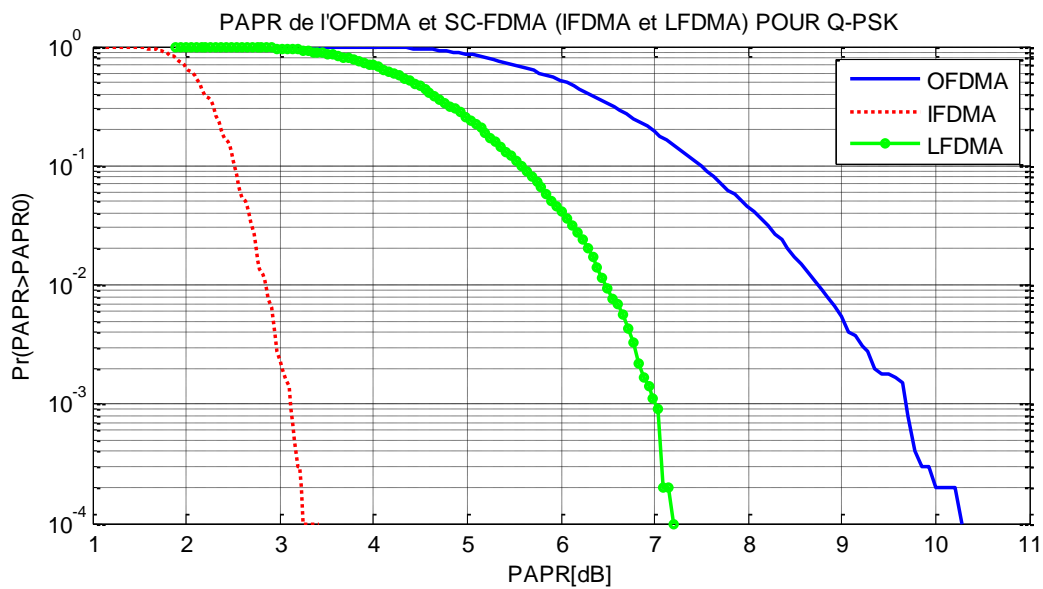


Fig.III.10 : Comparaison de la CCDF du PAPR du signal SC-FDMA avec un filtre de mise en forme en cosinus-surélevé (Roll-off  $\alpha=0.8$ ), et du signal OFDMA.

### III.4 Conclusion

La consommation des batteries dans les téléphones mobiles est un critère à considérer pour la transmission Uplink. A partir de nos simulations nous pouvons conclure que les modulations d'ordre élevé ont un impact sur le PAPR de l'OFDMA et celui du SC-FDMA. Le PAPR augmente pour le SC-FDMA et diminue légèrement pour l'OFDMA pour les modulations d'ordre élevé. Cependant la valeur du PAPR en SC-FDMA est toujours remarquablement inférieur à celle du PAPR de l'OFDMA quelque soit la modulation utilisé. C'est la raison de son adoption dans le système LTE. En se basant sur nos résultats nous proposerons une utilisation de modulation d'ordre inférieur comme les modulations BPSK, QPSK et 16 QAM afin d'obtenir un PAPR faible au niveau du terminal.

---

## Conclusion générale

Nous arrivons au terme de notre travail de projet de fin d'étude portant sur l'évaluation des performances OFDMA et SC-FDMA dans le cas des liaisons radio haut débit du Long Term Evolution (LTE). Cette étude s'installe dans le cadre de l'arrivée de la prochaine norme de téléphonie mobile (LTE advanced) sous la dénomination 4G « 4<sup>ème</sup> génération ».

La croissance fulgurante du trafic, accompagnée de la prolifération de nouvelles applications sur les réseaux, amènera très rapidement une saturation des différents réseaux mobiles et une inadaptation par rapport aux besoins des mobinautes. En effet, les techniques actuelles basées sur les techniques du CDMA qui a l'avantage d'allouer toute la bande de fréquence disponible à chaque mobile en les séparant par des codes spécifiques ne permettent pas l'atteinte cette satisfaction. Pour remédier à ce problème, depuis 2007, le 3GPP a servi de tremplin pour mettre en place la solution LTE à travers la release 8.

Ce nouveau système, le LTE, est une amélioration du cœur même de réseaux (U-TRAN) des systèmes existant. Dans notre travail, nous nous sommes limités à l'étude et l'évaluation des techniques d'accès dans ce nouveau système.

Ainsi dans la première partie nous avons procédé à une étude des réseaux cellulaires des différentes normes de téléphonie mobile précédentes. Cette étude préliminaire nous a permis de comprendre que le but recherché dans l'amélioration des systèmes radio mobiles était entre autre : Une bonne couverture des cellules, une facilité d'accès, une allocation et une gestion des ressources optimisés, des services multimédia facilitant le quotidien de l'utilisateur.

Mais avec le Long Term Evolution ces objectifs ont été complétés par des points comme le transport de la voix uniquement par IP, l'accès haut débit, etc.

Par la suite dans la deuxième partie de notre travail nous avons fait une étude approfondie des deux techniques d'accès l'OFDMA et la SC-FDMA utilisées respectivement pour les transmissions Downlink et Uplink. Une étude comparative de ces deux techniques a montré que la SC-FDMA bien qu'étant monoporteuse était bien proche de l'OFDMA. La robustesse de ces deux techniques contre les effets de multi trajets et les interférences entre symboles font d'elles les techniques d'accès par excellence. Une analyse de la notion du PAPR nous a permis de voir que l'augmentation de ce paramètre nécessitera une bonne linéarité de l'amplification du signal. Ceci causerait alors une forte consommation d'énergie. Il est donc compréhensible que la SC-FDMA, avec laquelle le PAPR est très faible, soit utilisé pour les transmissions Uplink, permettant ainsi une faible consommation d'énergie dans les terminaux mobiles. Ceci a été vérifié dans la dernière partie de notre travail par les simulations avec la technique de la CCDF, où pour plusieurs variations de paramètres comme le type de modulation, la largeur du canal, le PAPR de l'OFDMA et celui de la SC-FDMA ont été comparés. Les résultats ont bien confirmé la supériorité du PAPR de l'OFDMA à celui de la SC-FDMA.

De cette étude nous suggérons l'utilisation de modulation d'ordre inférieur pour la transmission uplink afin d'obtenir un meilleur PAPR. Aussi pour une bonne stabilité en puissance il serait nécessaire d'utiliser le mode localisé pour cette transmission.

Vu la quantité d'information à transmettre par les systèmes de communication à haut débit, l'étude de la fiabilité du système, à savoir le taux d'erreur « BER », le rapport signal sur bruit « SNR » pourraient faire l'objet d'autres travaux d'études.

## ***Résumé***

LTE est un système d'accès radio de prochaine génération qui soutient de futures exigences des utilisateurs. Le but fondamental du Long Term Evolution (LTE) est d'améliorer l'approvisionnement de service, de réduire le coût du trafic qui sera accompli par l'amélioration des débits, de la couverture, de la capacité de système et la réduction du temps de latence. Ce travail présente une vue d'ensemble technique du Long Term Evolution (LTE), son architecture, une analyse comparative des performances de la SC-FDMA et de l'OFDMA sur la base du Peak to Average Power Ratio (PAPR). Quelques défis principaux de recherches pour une amélioration de cette technologie y ont été abordés. La discussion fournit également une brève perspective pour le LTE-Advanced, qui est la prochaine étape sur la chaussée de la 4G. Ce mémoire fournit les informations valables et concises aux chercheurs dans le secteur de 3GPP LTE et 4G.

***Mots clés*** : LTE, OFDMA, SC-FDMA, PAPR, 3GPP, LTE-Advanced.

## ***Abstract***

3GPP LTE is a next generation radio access system that supports future end-user requirements. The fundamental aim of long-term evolution (LTE) is to improve the service provisioning and reduce user and operators cost, which will be fulfilled by improving data rates, coverage, system capacity and reducing latency. The thesis presents the technical overview of Long Term Evolution (LTE)/ System Architecture, the performance of SC-FDMA and OFDMA on the basis of Peak to Average Power Ratio (PAPR), the key research challenges and the ongoing work to provide solutions. The discussion also provides a brief insight into 3GPP LTE-Advanced, which is the future of LTE on the roadway to 4G. The thesis provides the valuable and concise information to the researchers in the area of 3GPP LTE and 4G.

***Key terms***: LTE, OFDMA, SC-FDMA, PAPR, 3GPP LTE-Advanced.



---

## Liste des tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Page</b>
Tableau I.1 Evolution du GSM au GPRS.....	10
Tableau I.2 les débits des liens radio LTE et LTE Advanced .....	16
Tableau I.3 : Evolution des générations de la téléphonie mobile .....	26
Tableau I.4 : Récapitulatif des caractéristiques des différents standards de la téléphonie mobile.....	26
Tableau II.1 : Paramètres de modulation pour Downlink.....	38
Tableau II.2 configuration uplink et downlink.....	40
Tableau II.3 : Nombre de « Resource blocks » pour les différents Bande passante.....	41
Tableau II.4 : Techniques de modulation utilisée par les signaux de référence et synchronisation.....	43
Tableau III.1 Comparaison des PAPR de l'OFDMA et SC-FDMA à l'utilisation les différentes modulations.....	63

---

# Table des matières

Titre.....	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	viii
Acronymes.....	ix
Introduction générale.....	1

## CHAPITRE I

### Evolution de la téléphonie mobile

I.1 Introduction.....	3
I.2 Naissance de la téléphonie Mobile .....	3
I.3 Différents standards de la téléphonie mobile .....	4
I.3.1 Première génération .....	4
I.3.2 Deuxième génération .....	5
I.3.2.1 GSM (Global System for Mobile communications).....	5
I.3.2.2 GPRS (Général Packet Radio Service).....	8
I.3.2.3 EDGE (Enhanced Data Rate for GSM Evolution).....	10
I.3.3 Troisième Génération.....	11
I.3.3.1 UMTS .....	11
I.3.3.2 HSDPA .....	13
I.3.3.3 HSUPA .....	14
I.3.3.4 HSPA .....	14
I.4 LTE (Long Term Evolution).....	14
I.4.1 Présentation.....	14
I.4.2 Objectif .....	15
I.4.3 Caractéristiques de la norme LTE .....	16
I.4.4 Architecture du LTE .....	19
I.4.2.1 EPS.....	19
I.4.2.2 Technologie MIMO.....	25
I.5 Conclusion .....	27

## CHAPITRE II

# Méthodes d'accès OFDMA et SC-FDMA dans LTE (Long Term Evolution)

II.1	Introduction.....	28
II.2	Technique OFDM.....	29
II.2.1	Présentation de L'OFDM.....	29
II.2.2	Principe de la modulation OFDM.....	30
II.2.3	Principe de la démodulation OFDM.....	33
II.2.4	Implémentation numérique de la technique OFDM.....	33
II.2.4.1	Implémentation numérique du modulateur OFDM.....	34
II.2.4.2	Implémentation numérique du démodulateur OFDM.....	34
II.3	Transmission Downlink.....	35
II.3.1	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA).....	35
II.3.2	Emission et réception.....	36
II.3.3	Paramètres de modulation en Downlink.....	38
II.3.4	Structure d'une Trame LTE.....	39
II.3.5	Les "Resources Block" en Downlink (PRB).....	40
II.3.6	Les canaux Physiques en Downlink.....	42
II.3.7	Les signaux Physiques.....	42
II.3.8	Les canaux de transport.....	44
II.4	Transmission Uplink.....	44
II.4.1	Paramétrisation de la SC-FDMA.....	45
II.4.2	Transmission en Uplink.....	45
II.4.2.1	Émetteur SC-FDMA.....	46
II.4.2.2	Allocation des ressources radio dans le système SC-FDMA.....	46
II.4.2.3	Récepteur SC-FDMA.....	49
II.4.3	Les canaux physiques en Uplink.....	50
II.4.4	Les signaux physique.....	50
II.4.5	Les canaux de transport.....	51
II.5	Etude Comparative de l'OFDMA et de la SC-FDMA.....	51
II.6	Conclusion.....	54

## CHAPITRE III

# Performance PAPR de l'OFDMA et la SC-FDMA

III.1	Introduction.....	55
III.2	Etude du PAPR (Peak to Average Power Ratio).....	55
III.2.1	Généralités sur les amplificateurs de puissance.....	55

III.2.2 Influence du PAPR sur l'amplification .....	59
III.2.3 Evaluation du PAPR du signal SC-FDMA .....	60
III.3 Simulation du PAPR des signaux SC-FDMA et OFDM.....	61
III.4 Conclusion.....	67
Conclusion générale.....	68
Bibliographie.....	70
Annexes .....	73

---

## Bibliographie

- [1] M. Benslimane, Cours GSM, Master Réseaux et système, Faculté de technologie, Université de Tlemcen (2012).
- [2] Bencherif hayat, Multiplexage des canaux de la téléphonie mobile et l'étude du taux d'erreur binaire par simulation d'un système WCDMA). Projet de fin d'étude Ingénieur d'état, Université de Tlemcen.
- [3] Téléphonie mobile GSM)/www.ulg.ac.be (Décembre 2011).
- [4] Architecture GSM, Formation RRM Mastère Spécialisé, Telecom Paristech.
- [5] Yvon Sosthène YAMEOGO, « Etudes de nouvelles techniques d'estimation et d'égalisation de canal adaptées au système SC-FDMA » Thèse pour l'obtention du grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1, (2011).
- [6] Berrichi Abdelkader, Optimisation Radio dans le GSM, Projet de fin d'étude pour l'obtention du titre d'ingénieur, Université de Tlemcen, (2010).
- [7] GPRS Overview, Formation RRM Mastère Spécialisé, Telecom Paristech
- [8] Peter Rysavy, "EDGE, HSPA & LTE: The Mobile Broadband Advantage", 3G Americas, September 2007
- [9] GSMA report, "HSDPA Operators Commitments", 19 November 2007
- [10] 3G Americas White Paper: "UMTS Evolution from 3GPP Release 7 to Release 8 – HSPA and SAE/LTE", June 2007
- [11] 3G Overview, Formation RRM Mastère Spécialisé, Telecom Paristech
- [12] La technologie 4G LTE : vers des réseaux IP mobiles, 01 net.entreprise.com (Avril 2012).
- [13] 3GPP, Long Term Evolution, [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org) , (Mars 2012).
- [14] 3GPP LTE Overview, cours Mastère spécialisé Architecture réseaux Telecom Paristech, (2011).
- [15] Tarek BCHINI (2011)Gestion de la Mobilité, de la Qualité de Service et Interconnexion de Réseaux Mobiles de Nouvelle Génération, Thèse de doctorat, université de Toulouse, 2010.
- [16] EPS Principes et architecture, <http://www.efort.com>, (2009).
- [17] Farook Khan, LTE For 4G Mobile Broadband, Air interface Technologies and performance ISBN-13978-0-511-51666-5 Telecom R&D Center Samsung Telecommunications, America,

- Cambridge University Press. 2009.
- [18] H. Holma and A. Toskala, LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA based radio access, John Wiley & Sons Inc. 2009.
- [19] Abdul Samad Shaikh ,Khatri Chandan Kumar,2010,Performance Evaluation of LTE Physical Layer Using SC-FDMA & OFDMA: Blekinge Institute of Technology.
- [20] 3GPP TS 36.211; Physical Channels and Modulation (Release 8)
- [21] J. Zyren and W. McCoy, "Overview of the 3GPP long term evolution physical layer," Freescale Semiconductor, Inc., white paper, 2007.
- [22] 3GPP TS 36.101; User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 8).
- [23] Rohde & Schwarz , " 2007 ;UMTS Long Term Evolution (LTE) Technology Introduction,"
- [24] Q. Li, G. li, W. Lee, M. Il. Lee, D. Clerckx, and Z. li, "MIMO techniques in WiMAX and LTE : A feature overview," IEEE Commun. Magazine. May 2010.
- [25] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, and P. Beming,2007, "3G evolution HSPA and LTE for mobile broadband," Academic Press is an Imprint of Elsevier,
- [26] Tobias Frank, Anja Klein, Elena Costa, and Egon Schulz, lfdma - a promising multiple access scheme future mobile radio systems. PIMRC. Berlin, 2005.
- [27] U. Sorger, De Broeck, and M. Schnell, June 1998, Interleaved fdma -a new spread-spectrum multiple-access scheme. Proc.IEEE ICC'98
- [28] H. G. Myung, Kyungjin Oh, Junsung Lim, and D. J. Goodman , Channel-dependent scheduling of an uplink sc-fdma system with imperfect channel information. In Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf. WCNC 2008, pages 1860–1864.
- [29] Junsung Lim, H. G. Myung, Kyungjin Oh, and D. J. Goodman, Channel dependent scheduling of uplink single carrier fdma systems. In Proc. VTC-2006 Fall Vehicular Technology Conf. 2006 IEEE 64th, pages 1–5.
- [30] LTE for 4G Mobile Broadband, <http://www.cambridge.org>
- [31] A. A. Moulthrop, 1997, C. J. Clark, C. P. Silva, and M. S. Muha. A dynamic am/am and am/pm measurement technique. In Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, volume 3, pages 1455–1458.
- [32] Yves Louet, Jan 2010,Prise en compte du facteur de crête dans le dimensionnement des systèmes de télécommunications. Supelec/SCEE.
- [33] M. K. Kazimierczuk, RF Power Amplifiers. December 2008.

- [34] I. M. Hussain et I. A. Tasadduq. 2008, Papr analysis in ofdm signals based on power variance. In Proc. 4th Int. Conf. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing WiCOM '08, pages 1–4.
- [35] R. Becker, W. Groeneweg, et R. Burdenski. 2003, Rf power control in gsm systems for constant and non constant envelope modulation schemes. In Proc. Int. Symp. Circuits and Systems ISCAS '03, volume 3
- [36] Hyung G. Myung et al. 1. Sep. 2006. Peak-to-average power ratio of single carrier fdma signals with pulse shaping. IEEE PIMRC
- [37] D. Wulich et L. Goldfeld. 2005. Bound of the distribution of instantaneous power in single carrier modulation. IEEE J. Trans. Wireless Commun, 4(4):1773–1778.
- [38] Ochiai. H et Imai. H. 2001, On the distribution of the peak-to-average power ratio in ofdm system. 49:282–289,

---

## Liste des figures

<b>Figure</b>	<b>Page</b>
Fig.I.1: Architecture du GSM.....	6
Fig.I.2: Architecture GPRS .....	9
Fig.I.3 : Architecture UMTS .....	12
Fig.I.4 : Evolution de l'efficacité spectrale .....	17
Fig.I.5 : Architecture de l'E-UTRAN .....	21
Fig.I.6 : Simplification de l'architecture LTE par rapport aux réseaux précédents .....	22
Fig.I.7 : Principe de la transmission multi-antenne avec MIMO (3X3).....	25
Fig.II.1 : Transmission parallèle et séquentielle des systèmes OFDMA et SC-FDMA.....	29
Fig.II.2 : Principe de l'OFDMA.....	30
Fig.II.3 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM.....	32
Fig.II.4 : Spectre du signal OFDM avec N porteuse.....	32
Fig.II. 5 : Schéma de principe de la démodulation OFDM.....	33
Fig.II. 6 : Modulateur OFDM numérique.....	34
Fig.II.7 : Démodulateur OFDM numérique.....	35
Fig.II.8 : Résultat de l'opération FFT.....	36
Fig.II.9 : Cyclic Préfix.....	36
Fig.II.10 : Absorption de l'interférence entre symbole IES.....	37
Fig.II.11 : Emetteur et récepteur OFDMA.....	38
Fig.II.12 : Structure de type 1.....	39
Fig.II.13: Structure de type 2.....	40
Fig.II.14 : la structure d'un slot ou Ressource block.....	41



Fig.II.15 : Représentation temporelle du slot d'un système SC-FDMA à 5 Mhz de largeur de bande.....	45
Fig.II.16 : Schéma de block de SC-FDMA a l'émetteur.....	46
Fig.II.17: Mapping I-FDMA.....	47
Fig.II.18: Mapping L-FDMA.....	48
Fig.II.19 : Comparaison des modes I-FDMA et L-FDMA.....	49
Fig.II.20 : SC-FDMA au Récepteur.....	49
Fig.II.21 : Format de Random access preamble.....	50
Fig.II.22 : Similitude entre une chaine OFDMA et SC-FDMA .....	52
Fig.II.23 : Egalisation des systèmes OFDMA et SC-FDMA.....	53
Fig.III.1 : Exemple de Caractéristique AM/AM d'un amplificateur de puissance .....	57
Fig.III.2 : Exemple de Caractéristique AM/AM d'un amplificateur de puissance .....	59
Fig.III.3: PAPR de l'OFDMA et SC-FDMA pour la modulation QPSK.....	62
Fig.III.4 : PARP de l'OFDMA et SC-FDMA pour la modulation 16QAM.....	62
Fig.III.5 : PAPR de l'OFDMA et SC-FDMA pour la modulation 64QAM.....	63
Fig.III.6 : PAPR de L'OFDMA et SC-FDMA pour la modulation QPSK (10MHz).....	64
Fig.III.7 : PAPR de L'OFDMA et SC-FDMA pour la modulation 16QAM (10MHz).....	64
Fig.III.8 : PAPR de L'OFDMA et SC-FDMA pou la modulation 64QAM (10MHz).....	65
Fig.III.9 : Comparaison de la CCDF du PAPR du signal SC-FDMA avec un filtre de mise en forme en cosinus-surélevé (Roll-off $\alpha=0.999$ ), et du signal OFDMA.....	65
Fig.III.10 : Comparaison de la CCDF du PAPR du signal SC-FDMA avec un filtre de mise en forme en cosinus-surélevé (Roll-off $\alpha=0.8$ ), et du signal OFDMA.....	66

---

## Acronymes

<b>1G</b>	1 <sup>st</sup> Generation
<b>2G</b>	2 <sup>nd</sup> Generation
<b>3GPP</b>	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project
<b>ACK</b>	ACknowledgment
<b>ADC</b>	Analogue to Digital Converter
<b>ARQ</b>	Automatic Repeat reQuest
<b>ATIS</b>	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
<b>AuC</b>	Authentication Centre
<b>BCH</b>	Broadcast CHannel
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying modulation.
<b>CCSA</b>	China Communications Standards Association.
<b>CP</b>	Cyclic Prefix
<b>CQI</b>	Channel Quality Indicator
<b>DAC</b>	Digital to Analogue Converter
<b>DFT</b>	Discrete Fourier Transform
<b>DFT-S-OFDMA</b>	Discrete Fourier Transform- Spread- Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>DwPTS</b>	Downlink Pilot TimeSlot
<b>EIR</b>	Equipment Identity Register
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute
<b>eNode B</b>	evolved NodeB
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplex
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple-Access
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>GP</b>	Guard Period
<b>GSM</b>	Global System for Mobile communications
<b>HARQ</b>	Hybrid ARQ
<b>HARQ ACK/NACK</b>	HARQ ACknowledgement/Negative ACknowledgement
<b>HLR</b>	Home Location Register
<b>ICI</b>	Inter-Carrier Interference
<b>IDFT</b>	Inverse Discrete Fourier Transform
<b>IFDMA</b>	Interleaved Frequency Division Multiple Access

---

<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform
<b>ISI</b>	Inter-Symbol Interference
<b>LTE</b>	Long-Term Evolution
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>MBSFN</b>	Multimedia Broadcast Single Frequency Network
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output.
<b>MSC</b>	Mobile Switching Centre
<b>NSS</b>	Network sub system
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>OSS</b>	Operating Sub-System
<b>PAPR</b>	Peak-to-Average Power Ratio.
<b>PDCCH</b>	Physical Downlink Control CHannel
<b>PDSCH</b>	Physical Downlink Shared Channel.
<b>PRACH</b>	Physical Random Access CHannel
<b>PRB</b>	Physical Resource Block
<b>PUCCH</b>	Physical Uplink Control CHannel
<b>PUSCH</b>	Physical Uplink Shared CHannel
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying. QPSK
<b>RACH</b>	Random Access CHannel
<b>RTCP</b>	Real-time Transport Control Protocol
<b>SC-FDMA</b>	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access.
<b>SIM</b>	Subscriber Identity Module.
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TD-CDMA</b>	Time Division Code Division Multiple Access
<b>TTA</b>	Telecommunications Technology Association
<b>UE</b>	User Equipment
<b>UL-SCH</b>	UpLink Shared Channel
<b>UpPTS</b>	Uplink Pilot TimeSlot
<b>USIM</b>	Universal Subscriber Identity Module
<b>UTRAN</b>	Universal Terrestrial Radio Access Network

---

# Annexes

## Annexe 1 : Code MATLAB

### OFDMA

```
function paprOFDMA()

dataType = 'Q-PSK'; % Technique de Modulation.
totalSubcarriers = 512; % Nombre des sous porteuse.
numSymbols =16; % Data block size.
Fs = 5e6; % Bande passant à utiliser.
Ts = 1/Fs; % System sampling rate.
Nos = 4; % Oversampling factor.
Nsub = totalSubcarriers;
Fsub = [0:Nsub-1]*Fs/Nsub; % espacement des sous porteuse.
numRuns = 1e4; % Nombre d'échantillons temporels

papr = zeros(1,numRuns); % Initialisation de résultat PAPR
for n = 1:numRuns,

    % Generation des donnees aléatoires.
    if dataType == 'Q-PSK'
        tmp = round(rand(numSymbols,2));
        tmp = tmp*2 - 1;
        data = (tmp(:,1) + j*tmp(:,2))/sqrt(2);
    elseif dataType == '16QAM'
        dataSet = [-3+3i -1+3i 1+3i 3+3i ...
                  -3+i -1+i 1+i 3+i ...
                  -3-i -1-i 1-i 3-i ...
                  -3-3i -1-3i 1-3i 3-3i];
        dataSet = dataSet / sqrt(mean(abs(dataSet).^2));

        tmp = ceil(rand(numSymbols,1)*16);
        for k = 1:numSymbols,
            if tmp(k) == 0
                tmp(k) = 1;
            end
            data(k) = dataSet(tmp(k));
        end
        data = data.';
    end
end
```

```

% Time range of the OFDM symbol.

t = [0:Ts/Nos:Nsub*Ts];

% OFDM modulation.
y = 0;
for k = 1:numSymbols,
    y= y + data(k)*exp(j*2*pi*Fsub(k)*t);
end

% Calcule de PAPR.

papr(n) = 10*log10(max(abs(y).^2) / mean(abs(y).^2));
end

% Plot CCDF.
[N,X] = hist(papr, 100);
semilogy(X,1-cumsum(N)/max(cumsum(N)), 'b');
hold on
title ('PAPR de l''OFDMA et SC-FDMA')
xlabel ('PAPR[dB]')
ylabel ('{Pr(PAPR>PAPR0)}')

% Save data.
save paprOFDMA

```

### Paramétrage de la modulation

```

if dataType == 'Q-PSK'

    tmp = round(rand(numSymbols,2));
    tmp = tmp*2 - 1;
    data = (tmp(:,1) + j*tmp(:,2))/sqrt(2);

elseif dataType == '16QAM'
    dataSet = [-3+3i -1+3i 1+3i 3+3i ...
               -3+i -1+i 1+i 3+i ...
               -3-i -1-i 1-i 3-i ...
               -3-3i -1-3i 1-3i 3-3i];

elseif dataType == '64QAM'
    dataSet = [-5+5i -1+5i 1+5i 5+5i ...
               -5+i -1+i 1+i 5+i ...
               -5-i -1-i 1-i 5-i ...
               -5-5i -1-5i 1-5i 5-5i];

```

```

function paprSCFDMA()

dataType = 'Q-PSK'; % Technique de Modulation.
totalSubcarriers = 512; % Nombre des sous porteuse.
numSymbols = 16; % Data block size.
Q = totalSubcarriers/numSymbols; % Bandwidth spreading factor of IFDMA.
Q_tilda = 31; % Bandwidth spreading factor of DFDMA. Q_tilda < Q.
subcarrierMapping = 'IFDMA'; %mode utilisé pour le mapping des sous-
porteuses.
pulseShaping = 1; % Whether to do pulse shaping or not.
filterType = 'rc'; % Type of pulse shaping filter.
rolloffFactor = 0.099999999; %Rolloff factor for the raised-cosine filter.
                                %To prevent divide-by-zero, for example, use
0.0999999999 instead of 0.1.
Fs = 5e6; % Bande passant à utilisé.
Ts = 1/Fs; % System sampling rate.
Nos = 4; % Oversampling factor.
if filterType == 'rc' % Raised-cosine filter.
    psFilter = rcPulse(Ts, Nos, rolloffFactor);
elseif filterType == 'rr' % Root raised-cosine filter.
    psFilter = rrcPulse(Ts, Nos, rolloffFactor);
end
numRuns = 1e4; % Nombre des itérations.

papr = zeros(1,numRuns); % Initialisation de résultat PAPR.

for n = 1:numRuns,

    % Generation des donnes aléatoires

    if dataType == 'Q-PSK'
        tmp = round(rand(numSymbols,2));
        tmp = tmp*2 - 1;
        data = (tmp(:,1) + j*tmp(:,2))/sqrt(2);
    elseif dataType == '16QAM'
        dataSet = [-3+3i -1+3i 1+3i 3+3i ...
                    -3+i -1+i 1+i 3+i ...
                    -3-i -1-i 1-i 3-i ...
                    -3-3i -1-3i 1-3i 3-3i];
        dataSet = dataSet / sqrt(mean(abs(dataSet).^2));
        tmp = ceil(rand(numSymbols,1)*16);
        for k = 1:numSymbols,
            if tmp(k) == 0
                tmp(k) = 1;
            end
            data(k) = dataSet(tmp(k));
        end
        data = data.';
    end

    % Conversion des donnes en domaine fréquentielle.
    X = fft(data);

% Initialisation des sous-porteuses.
    Y = zeros(totalSubcarriers,1);

```

```

% mapping des sous-porteuses.

if subcarrierMapping == 'IFDMA'
    Y(1:Q:totalSubcarriers) = X;
elseif subcarrierMapping == 'LFDMA'
    Y(1:numSymbols) = X;
elseif subcarrierMapping == 'DFDMA'
    Y(1:Q_tilda:Q_tilda*numSymbols) = X;
end

% Conversion des donnees en domaine temporelle.
y = ifft(Y);

% Perform pulse shaping.
if pulseShaping == 1
    % Up-sample the symbols.
    y_oversampled(1:Nos:Nos*totalSubcarriers) = y;
    % Perform filtering.
    y_result = filter(psFilter, 1, y_oversampled);
else
    y_result = y;
end

% Calcule de PAPR.
papr(n) = 10*log10(max(abs(y_result).^2) / mean(abs(y_result).^2));
end

% Plot CCDF.
[N,X] = hist(papr, 100);
semilogy(X,1-cumsum(N)/max(cumsum(N)), 'r')
hold on
title ('PAPR de l''OFDMA et SC-FDMA')
xlabel ('PAPR[dB]')
ylabel ('{Pr(PAPR>PAPR0)}')
% Save data.
save paprSCFDMA

```

### Fonction de filtrage

```

function r = rcPulse(Ts, Nos, alpha)

t1 = [-8*Ts:Ts/Nos:-Ts/Nos];
t2 = [Ts/Nos:Ts/Nos:8*Ts];

r1 = (sin(pi*t1/Ts)./(pi*t1)).*(cos(pi*alpha*t1/Ts)./(1-
(4*alpha*t1/(2*Ts)).^2));
r2 = (sin(pi*t2/Ts)./(pi*t2)).*(cos(pi*alpha*t2/Ts)./(1-
(4*alpha*t2/(2*Ts)).^2));

r = [r1 1/Ts r2];

function r = rrcPulse(Ts, Nos, alpha)

t1 = [-6*Ts:Ts/Nos:-Ts/Nos];
t2 = [Ts/Nos:Ts/Nos:6*Ts];

```

---

```
r1 =
(4*alpha/(pi*sqrt(Ts)))*(cos((1+alpha)*pi*t1/Ts)+(Ts./(4*alpha*t1)).*sin((1
-alpha)*pi*t1/Ts))./(1-(4*alpha*t1/Ts).^2);
r2 =
(4*alpha/(pi*sqrt(Ts)))*(cos((1+alpha)*pi*t2/Ts)+(Ts./(4*alpha*t2)).*sin((1
-alpha)*pi*t2/Ts))./(1-(4*alpha*t2/Ts).^2);

r = [r1 (4*alpha/(pi*sqrt(Ts)))+(1-alpha)/sqrt(Ts) r2];
```



## Annexe 2:LTE-Advanced Frequency bands

Operating bands of LTE-Advanced will involve E-UTRA operating bands as well as possible IMT bands identified by ITU-R. E-UTRA (LTE)

Table 9: Operating bands for LTE-Advanced					
Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive/UE transmit		Downlink (DL) operating band BS transmit /UE receive		Duplex Mode
	$F_{UL\_low}$	$F_{UL\_high}$	$F_{DL\_low}$	$F_{DL\_high}$	
1	1920 MHz	1980 MHz	2110 MHz	2170 MHz	FDD
2	1850 MHz	1910 MHz	1930 MHz	1990 MHz	FDD
3	1710 MHz	1785 MHz	1805 MHz	1880 MHz	FDD
4	1710 MHz	1755 MHz	2110 MHz	2155 MHz	FDD
5	824 MHz	849 MHz	869 MHz	894MHz	FDD
6	830 MHz-	840 MHz-	865 MHz	875 MHz-	FDD
7	2500 MHz	2570 MHz	2620 MHz	2690 MHz	FDD
8	880 MHz	915 MHz	925 MHz	960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz	1784.9 MHz	1844.9 MHz	1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz	1770 MHz	2110 MHz	2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	1447.9 MHz	1475.9 MHz	1495.9 MHz	FDD
12	698 MHz	716 MHz	728 MHz	746 MHz	FDD
13	777 MHz	787 MHz	746 MHz	756 MHz	FDD
14	788 MHz	798 MHz	758 MHz	768 MHz	FDD
15	Reserved		Reserved		-
16	Reserved		Reserved		-
17	704 MHz	716 MHz	734 MHz	746 MHz	FDD
18	815 MHz	830 MHz	860 MHz	875 MHz	FDD
19	830 MHz	845 MHz	875 MHz	890 MHz	FDD
20	832 MHz	862 MHz	791 MHz	821 MHz	FDD
21	1447.9 MHz	1462.9 MHz	1495.9 MHz	1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz	3500 MHz	3510 MHz	3600 MHz	FDD
...					
33	1900 MHz	1920 MHz	1900 MHz	1920 MHz	TDD
34	2010 MHz	2025 MHz	2010 MHz	2025 MHz	TDD
35	1850 MHz	1910 MHz	1850 MHz	1910 MHz	TDD
36	1930 MHz	1990 MHz	1930 MHz	1990 MHz	TDD
37	1910 MHz	1930 MHz	1910 MHz	1930 MHz	TDD
38	2570 MHz	2620 MHz	2570 MHz	2620 MHz	TDD
39	1880 MHz	1920 MHz	1880 MHz	1920 MHz	TDD
40	2300 MHz	2400 MHz	2300 MHz	2400 MHz	TDD
41	3400 MHz	3600 MHz	3400 MHz	3600 MHz	TDD