

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et télécommunications

Par : DALI YOUCEF Mehdi et BELAIDI Mohammed Hichem

Sujet

Architectures et techniques de modulation de la 5G Radio

Soutenu publiquement, le 30 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

| | | | |
|-----------------|------------|-----------------------|-------------|
| Mr ZERROUKI.H | MCA | Université de Tlemcen | Président |
| Mr ABDELMALEK.A | MCB | Université de Tlemcen | Examinateur |
| Mr CHIKH BLED.M | Professeur | Université de Tlemcen | Encadreur |

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et télécommunications

Par : DALI YOUCEF Mehdi et BELAIDI Mohammed Hichem

Sujet

Architectures et techniques de modulation de la 5G Radio

Soutenu publiquement, le 30 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

Mr ZERROUKI.H
Mr ABDELMALEK.A
Mr CHIKH BLED.M

MCA
MCB
Professeur

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur

Remerciements

Nous tenons avant tout à remercier Dieu tout puissant, de nous avoir donné la force, le courage et la patience durant ces années d'études, et pendant la réalisation de ce mémoire.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à notre encadreur Mr : Chikh-Bled Mohammed El-Kebir pour ses orientations et ses précieux conseils, qu'il trouve ici le témoignage de notre respect le plus profond.

Nos remerciements vont également aux professeurs :

Mr Zerrouki Hadj et Mr Abdelmalek Abdelhafid

pour avoir accepté de lire et d'examiner notre travail.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années d'études.

Nous remercions infiniment toutes les personnes qui nous ont aidés lors de la réalisation de ce mémoire à savoir nos parents, nos amis, nos familles et proches qui par leurs prières et leur encouragement on a pu surmonter tous les obstacles.

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail

A Mes chers parents ma mère et mon père Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir. Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin. Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez fait preuve. Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur, Vous êtes ma source de vie, d'amour et d'affection.

A Mon frère et ma grand-mère pour leur dévouement, leur compréhension et leur grande tendresse, pour m'avoir encouragé tout au long de mes études, et qui par leur soutien, leurs conseils et leur amour, m'ont permis d'arriver jusqu'ici car ils ont toujours cru en moi.

A toute ma famille.

A mes chers amis, Cousins (SBD, Zakaria, ChemsEddine, Anes et Sofiane) que j'aime du plus profond de mon cœur je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des personnes sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Mehdi

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail

*A mes Parents, à ma chère mère et mon cher père
qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me soutenir
et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs. Quoi que je dise ou que je
fasse, je ne saurai jamais vous remercier comme il se doit.*

*A mes chères Frères Amine et Yasser, puisse dieu vous donne
santé, bonheur et surtout réussite.*

*A mes ami(e)s, [Aladin, Toufik, Zakaria, Chemsou et Lamia] pour leur
soutien moral et leurs précieux conseils.*

*A mon cher Binôme Mehdi, Pour sa compréhension sa sympathie, et en
particulier pour son aide et sa patience. Et à sa Grand-Mère adorée qui nous a
toujours soutenu et nous a ouvert ses portes, Merci Grand-Mère !*

Fichem

Résumé :

Ce mémoire est dédié aux architectures réseau de la 5G, ainsi qu'aux techniques de modulation les plus pertinentes, et performantes à même de répondre face à ces nouveaux besoins, défis, et exigences.

Après une rétrospective de la 2G (GSM/GPRS), la 3G(UMTS/HSPA), et la 4G(LTE-LTE-A), et une justification des perspectives économiques, des performances attendues, et les services de la 5G, une implantation d'une nouvelle architecture 5G en termes d'interfaces du côté radio (RAN), et du côté cœur du réseau (CN) est présentée. Ceci nous amène ensuite vers les techniques de modulation utilisées dans la 5G comme l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), NOMA (Non Orthogonal Multiple Access), et OMA (Orthogonal Multiple Access) en donnant pour chacune d'elles les outils théoriques, ainsi que les avantages, et les inconvénients. Finalement, nous présentons, discutons, comparons, quelques résultats de simulation obtenus par d'autres auteurs.

Mots clés : 5G-RAN, OFDM, NOMA, OMA

Abstract :

This dissertation is dedicated to 5G network architectures, as well as to the most relevant and efficient modulation techniques capable of meeting these new needs, challenges and requirements.

After a retrospective of 2G (GSM/GPRS), 3G(UMTS/HSPA), and 4G(LTE-LTE-A), and a justification of the economic prospects, expected performances, and 5G services, a new 5G architecture implementation in terms of radio-side interfaces (RAN), and on the core side of the network (CN) is presented. . This then leads us to the modulation techniques used in 5G such as OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), NOMA (Non Orthogonal Multiple Access), and OMA (Orthogonal Multiple Access) giving for each of them the theoretical tools, and the pros and cons. Finally, we present, discuss, compare, some simulation results obtained by other authors.

Keywords: 5G-RAN, OFDM, NOMA, OMA

ملخص:

هذه الأطروحة مخصصة لبنى شبكات 5G، بالإضافة إلى تقنيات التعديل الأكثر صلة وفعالية والقادرة على تلبية هذه الاحتياجات والتحديات والمتطلبات الجديدة.

بعد معرض استعادي لـ 2G (GSM/GPRS) و 3G (UMTS/HSPA) و 4G (LTE-LTE-A)، وتبرير الأفاق الاقتصادية والأداء المتوقع وخدمات 5G، تنفيذ بنية 5G جديدة من حيث الواجهة الراديوية يقودنا هذا بعد ذلك إلى تقنيات التعديل المستخدمة في 5G مثل OFDM (تعدد الإرسال لقسم التردد المتعامد) و NOMA (الوصول المتعدد غير المتعامد) و OMA (الوصول المتعدد المتعامد) الذي يعطي لكل منها الأدوات النظرية والإيجابيات والموافقات. أخيرًا، نقدم،

الكلمات الرئيسية: 5G-RAN ، OFDM ، NOMA ، OMA

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES :

| | |
|---|----------|
| Résumé : | I |
| Acronymes et Abréviations : | II |
| Liste de Figures : | VII |
| Liste des Tableaux : | IX |
| Introduction Générale : | 1 |
| Chapitre I : Vers les communications sans fil 5G : | |
| I.1- Introduction : | 4 |
| I.2- Les cinq générations de réseaux de mobiles : | 5 |
| I.2.1- Introduction : | 5 |
| I.2.2- La 2G : | 6 |
| I.2.2.1- La mobilité dans les réseaux 2G : | 7 |
| I.2.3- La 3G : | 10 |
| I.2.3.1- L'UMTS : | 11 |
| I.2.4- HSPA (La 3G+) : | 15 |
| I.2.4.1- HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) : | 16 |
| I.2.4.2- HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) : | 16 |
| I.2.4.3- HSOPA (High Speed OFDM Packet Access) : | 17 |
| I.2.5- La 4G : | 17 |
| I.2.5.1- Le LTE (Long Term Evolution) : | 17 |
| I.2.5.2- Le LTE-A (Long Term Evolution Advanced) : | 18 |
| I.2.6- Tableau récapitulatif des générations de téléphonie mobile : | 20 |
| I.3- Aperçu de la 5G : | 20 |

| | |
|--|----|
| I.4- Les standards de la 5G : | 21 |
| I.4.1- Génération du Partenariat du Projet (3GPP) : | 21 |
| I.4.2 - Internet Engineering Task Force (IETF) : | 21 |
| I.4.3 – Union Internationale des Télécommunications (UIT) : | 22 |
| I.5- Que fait l’UIT?..... | 22 |
| I.6- La 5G, qu’est ce que c’est ? | 23 |
| I.6.1 – Est-ce seulement une question de vitesse ?..... | 23 |
| I.6.2 – Y’a-t-il d’autres avantages ?..... | 24 |
| I.7- Cas d’utilisation de la 5G | 25 |
| I.7.1 - eMBB (haut débit mobile amélioré) : | 25 |
| I.7.2 - mMTC (Massive machine type communication) : | 26 |
| I.7.3 - URLLC (communication ultra-fiable à faible latence): | 26 |
| I.8- Conclusion : | 26 |

Chapitre II : Architecture réseau 5G, défis et exigences :

| | |
|--|----|
| II.1 – Introduction : | 28 |
| II.2- Les briques technologiques pour atteindre les objectifs de la 5G : | 28 |
| II.2.1 – Les technologies de la 5G :..... | 28 |
| II.2.2 – Services et défis de la 5G :..... | 33 |
| II.2.2.1 – Une grande capacité :..... | 33 |
| II.2.2.2 – Un débit plus élevé :..... | 33 |
| II.2.2.3 – Disponibilité, connectivité et fiabilité massives :..... | 33 |
| II.2.2.4 – Une faible latence : | 34 |
| II.2.2.5 – Coût réduit et efficacité énergétique plus élevée :..... | 34 |
| II.2.3 – Pourquoi faut-il de nouvelles fréquences pour la 5G ?..... | 35 |

| | |
|---|----|
| II.3– Différence entre l’architecture des réseaux 4G et 5G : | 37 |
| II.4- Architecture du réseau 5G :..... | 39 |
| II.4.1- Les différents composants d’un réseau 5G : | 40 |
| II.4.2- Interfaces réseau 5G-NR, Types d’interface-Xn, NG, E1, F1, F2 dans la 5G :..... | 42 |
| II.4.3- La virtualisation de réseau : | 45 |
| II.5- Le cœur de réseau (CN) évolue vers la 5G : | 48 |
| II.5.1- Introduction : | 48 |
| II.5.2- L’évolution du cœur de réseau : | 48 |
| II.5.3- La 5G, quels impacts sur le cœur de réseau ? | 49 |
| II.6- Conclusion :..... | 50 |

Chapitre III : Les techniques de modulation pour les réseaux mobiles 5G :

| | |
|--|----|
| III.1 – Introduction : | 52 |
| III.2 – La technologie OFDM : | 52 |
| III.2.1 – Principe de la modulation : | 53 |
| III.2.2 – Principe de la démodulation : | 54 |
| III.2.3 – L’Orthogonalité : | 55 |
| III.2.4 – Intervalle de garde : | 56 |
| III.2.5 – Avantages et inconvénients du système OFDM : | 58 |
| III.2.5.1– Les Avantages : | 58 |
| III.2.5.2– Les Inconvénients : | 59 |
| III.3- Le système OFDMA : | 60 |
| III.3.1– De l’OFDMA à NOMA : | 60 |

| | |
|--|-----------|
| III.4– Orthogonal Multiple Access (OMA) : | 61 |
| III.5– Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) : | 61 |
| III.5.1-Introduction : | 61 |
| III.5.2-Qu'est-ce-que l'accès multiple non orthogonal (NOMA) ? | 62 |
| III.5.3-Paramètres d'évaluation et état de la normalisation : | 63 |
| III.5.4-Domains de puissance NOMA : | 64 |
| III.5.5-Domains de code NOMA : | 65 |
| III.5.6-Avantages du NOMA : | 66 |
| III.5.7-Limites du NOMA : | 67 |
| III.6- Comparaison entre NOMA et OMA : | 67 |
| III.7- Interprétation des résultats : | 69 |
| III.7.1– Introduction : | 69 |
| III.7.2– Algorithme PSO-PFS : | 69 |
| III.7.3– Paramètres de simulation : | 70 |
| III.7.4- Synthèse de comparaison : | 71 |
| III.7.4.1- Débit : | 71 |
| III.7.4.2- Equité : | 72 |
| III.7.4.3- Contrainte du délai : | 73 |
| III.7.4.4 – Efficacité spectrale et énergétique : | 74 |
| III.8 – Récapitulatif des résultats : | 76 |
| III.9 – Conclusion : | 78 |
| Conclusion Générale : | 80 |
| Bibliographie : | 82 |

Acronymes et Abréviations :

1G : Première Génération
2G : Deuxième Génération
3 GPP : 3rd Generation Partnership Project
3G : Troisième Génération
4G : Quatrième Génération
5G : Cinquième Génération
5GC : 5G Core Network
ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line
AMF: Access and Management Mobility Function
AMPS: Advanced Mobile Phone System
AR: Augmented Reality
ARIB: Association of radio Industries and Businesses
ATM: Asynchronous Transfer Mode
AUSF: Authentication Server Function
AVC: Automatic Volume Control
BSC: Base Station Controller
BSS: Base Station Subsystem
BTS: Base Transceiver Station
CDMA: Code Division Multiple Access
CDN: Content Delivery Network
CEI: International Electrotechnical Commission
CSFB: Circuit Switched Fall back
CU: Central Unit
CP : Cyclic Prefix
D2D: Device to Device
DAC : Digital Analog Converter
D-AMPS: Advanced Mobile Phone System
DSL: Digital Subscriber Line
DU: Distributed Unit
EC-GSM: Extended Coverage GSM
E-DCP: Enhanced Dedicated Channel
E-GPRS: Enhanced General Packet Radio Service
EIR: Equipment Identity Register
eLAA: enhanced Licensed Assisted Access

eMBB: enhanced Mobile Broadband
ENodeB: Evolved NodeB
EPC : Evolved Packet Core
ETSI : Institut européen des normes de télécommunications
E-UTRAN: Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
EV-DO: Evolution-Data Optimized
FDD: Frequency Division Duplexing
FDMA : Frequency Division Multiple Access.
FFT : Fast Fourier Transform
FTTH: Fiber to the Home
GGSN: Gateway GPRS Support Node
G-MSC: Gateway MSC
GN: Generation Network
gNB:Generation Node Base Station
GPRS: General Packet Radio Service
GSM MAP: GSM Mobile Application Part
GSM: Global System for Mobile communications
HARQ: Hybrid Automatic Repeatre Quest
HLR: Home Location Register
HMD: head-mounted display
HSDPA: High Speed Downlink Packet Access
HSOPA: High-Speed OFDM Packet Access
HSPA: High-Speed Packet Access
HSPA+: High-Speed Packet Access Evolution
HSUPA: High-Speed Uplink Packet Access
IMSI: International Mobile Subscriber Identity
IMT S: International Mobile Telecommunications System
IMT: Institut Mines-Télécom
Intra-RAT: intra-Radio Access Technology
IOE: Internet of Everything
IOT: Internet of Things
IEP : Interférence Entre Porteuse
IES : Interférence Entre Symbole.
IP: Internet Protocol
IPTV: Internet Protocol Television
IS : Interim Standard

IS-95: Interim Standard 95
KSP : Known Symbol Padding.
L'ANFR : L'Agence nationale des fréquences
LTE : Long Term Evolution
LTE-(e) MTC: Enhancements for Machine-Type Communications
LTE-A: Long Term Evolution-Advanced
MAC: Media Access Control
MBMS: Multimedia Broadcast/Multicast Service
MEC: Mobile Edge Computing
MEC:Multi-Access Edge Computing
MIMO: Multiple Input, Multiple Output
mMTC: massive Machine Type Communications
MPEG-4: Moving Picture Expert Group 4
MPLS: Multiprotocol Label Switching
MR: Mix Reality
MSC: Mobile service Switching Center
NAS: Network Attached Storage
NB-IoT: Narrow Band IoT
NEF: Network Exposure Function
NFV :Virtualisation Des Fonctions Réseau
NG-RAN : Réseau d'accès radio NG
NMT: Nordic Mobile Telecommunication
NOMA: Non Orthogonal Multiple Access
NR: New Radio
NRF: Network Repository Function
NS: Network slicing
OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR : Peak to Average Power Ratio.
PCF: Policy control function
PDC: Personal Data Communications system
PDU: Protocol Data Unit
PDMA : Pattern Division Multiple Access
PME: Power Management Event
QAM: Quadrature Amplitude Modulation
QOS: Quality of Service

RAN: Radio Access Network
RNC: Radio Network Controller
RNS: Radio Network Subsystem
RRH: Remote Radio Head
SBA: Architecture basée sur les services
SCMA: Sparse Code Multiple Access
SDN: Software Defined Networking
SGSN: Serving GPRS Support Node
SI: System Information
SIC: Successive Interference Cancellation
SIM: Subscriber Identity Module
SINR : Signal to Interference Noise Ratio
SMF: Session Management Function
SMS:*Short Message Service*
SMS-GMSC: SMS Gateway MSC
SNR : Signal to Noise Ratio
SV-LTE : Simultaneous Voice – LTE
TACS : Telecommunications Administration Centre
TDD : Time Division Duplexing
TDMA : Time Division Multiple Access.
TD-SCDMA : Time Division-Synchronous CDMA
TIC : Technologie de l'information et communication
ToIP: Telephony over Internet Protocol
TROF: technologie Radio over fiber
TTI: Transmission Time Interval
UDM: Unified Data Management
UE: User Equipment
UIT: International Telecommunication Union
UIT-D : Secteur Développement Des Télécommunications
UIT-R : Secteur Des Radiocommunications
UIT-T : Secteur De La Normalisation Des Télécommunications
UMTS :Universal Mobile Télécommunications System
UP : Uplink
UPF : User Plan Function
UPT : Universal Personal Telecommunications
URLCC : Ultra Reliable Low Latency Communications

U-SIM: Universal Subscriber Identity Module
UTRA: UMTS Terrestrial Radio Access
UTRAN: Universal Terrestrial Radio Access Network
UWC136: Universal Wireless Communications 136
V2V: Vehicle-to-Vehicle
V2X: Vehicle-to-everything communications
VLR: Visitor Location Register
VoLGA: Voice over LTE via GAN
VOLP: Voice over Internet Protocol
VoLTE: Voice over LTE
VR: Virtual Reality
W-CDMA: Wideband Code Division Multiple Access
WIFI: Wireless Fidelity
XPON: X Version Passive Optical Network
XR: Extended Reality
ZP : Zero Padding.

Liste de Figures :

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Ce qui se passe aujourd’hui en une minute sur internet. | 4 |
| Figure I.2 : Architecture d’un réseau mobile. | 6 |
| Figure I.3 : Handover et création d’un enregistrement dans un nouveau VLR. | 8 |
| Figure I.4 : Étapes de mise à jour du HLR. | 8 |
| Figure I.5 : Évolution des technologies mobiles 2G-3G. | 10 |
| Figure I.6 : Architecture générale de l’UMTS. | 12 |
| Figure I.7 : Le passage de la 3G vers LTE. | 18 |
| Figure I.8 : Le monde où tout est connecté. | 24 |
| Figure II.1 : Illustration de full-duplex, comparé au FDD et TDD. | 29 |
| Figure II.2 : Exemple d’utilisation d’une antenne à formation de faisceau utilisée pour connecter des points d’accès Wi-Fi. | 30 |
| Figure II.3 : Antenne massive MIMO de Nokia. | 30 |
| Figure II.4 : La technologie Beamforming. | 31 |
| Figure II.5 : Illustration de multiplexage power domain NOMA..... | 32 |
| Figure II.6 : Réseau mobile sans fils illustrant la technologie des Small-cell. | 32 |
| Figure II.7 : Fréquences attribuées à la téléphonie mobile..... | 35 |
| Figure II.8 : Fréquences utilisées pour la 5G | 37 |
| Figure II.9 : Différence entre l’architecture des réseaux 4G et 5G | 38 |
| Figure II.10 : Schéma de l’architecture 5G..... | 40 |
| Figure II.11 : Architecture Globale 5G NR..... | 42 |
| Figure II.12 : Types d’interface 5G NR Gnb..... | 43 |
| Figure II.13 : Centralisation du plan de contrôle dans un Software Defined Network | 46 |
| Figure II.14 : Illustration d’une architecture réseau CloudRAN..... | 46 |
| Figure II.15 : Développement du cœur réseau de la 1G à la 5G..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figure III.1 : Principe de l'OFDM..... | 53 |
| Figure III.2 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM..... | 54 |
| Figure III.3 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM..... | 55 |
| Figure III.4 : Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM..... | 56 |
| Figure III.5 : Intervalle de garde..... | 56 |
| Figure III.6 : Différents intervalles de garde..... | 57 |
| Figure III.7 : Insertion de préfixe cyclique (PC)..... | 58 |
| Figure III.8 Schéma bloc d'émetteur OFDMA..... | 60 |
| Figure III.9 Schéma bloc du récepteur OFDMA..... | 60 |
| Figure III.10 : Liaison descendante NOMA dans une seule cellule avec une station de base et deux utilisateurs..... | 62 |
| Figure III.11 : Une comparaison imagée de la OMA et NOMA..... | 68 |
| Figure III.12 : Performances en termes de débit..... | 72 |
| Figure III.13 : Performances en termes d'équité..... | 73 |
| Figure III.14 : Probabilité de retard par rapport au temps. | 74 |
| Figure III.15 : Efficacité énergétique en fonction des utilisateurs. | 75 |
| Figure III.16 : Efficacité spectrale en fonction des utilisateurs. | 76 |

Liste des Tableaux :

| | |
|--|----|
| Tableau I.1 : Comparaison de la terminologie du réseau d'accès radio. | 13 |
| Tableau I.2 : Cycle des générations de téléphonie mobile. | 20 |
| Tableau I.3 : Débits maximaux et moyens associées aux différentes générations. | 20 |
| Tableau II.1 : Liste des services par bande de fréquences..... | 36 |
| Tableau II.2 : Différences de spécifications entre la 4G et la 5G. | 39 |
| Tableau III.1 : Paramètres de simulation..... | 70 |
| Tableau III.2 : Paramètres de l'algorithme PSO..... | 71 |
| Tableau III.3 : Comparaison entre NOMA et OFDMA | 77 |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale :

La technologie mobile et ses performances ont évolué au fil du temps depuis le premier appel téléphonique : les services vocaux, la messagerie, l'utilisation de l'internet mobile et enfin des applications mobiles multiservices ont caractérisé l'évolution des réseaux mobiles et le passage d'une génération à l'autre. La naissance de la technologie LTE et de la 4^{ème} génération, couplée à la démocratisation des smartphones et des tablettes, a considérablement augmenté la quantité de données échangées en déplacement.

L'usage des téléphones portables et de leurs applications est désormais bien ancré dans le quotidien de nos concitoyens, et les appareils portables connectés deviennent de plus en plus performants. Aujourd'hui, 5 millions de vidéos par minute sont visionnées sur YouTube, 6900 photos sont téléchargées et 695 000 stories sont partagées sur Instagram.

La 5G est la 5^{ème} génération. Elle possède de nombreuses fonctionnalités suffisamment avancées pour résoudre de nombreux problèmes de notre vie moderne. Notamment ceux confrontés à l'utilisation des technologies actuelles, la 1^{ère} génération (1G, ces téléphones étaient analogiques et sont les premiers téléphones portables ou cellulaires utilisés, offrant un très faible niveau d'efficacité et de sécurité. La 2^{ème} génération (2G est basé sur le numérique et offraient une bien meilleure efficacité à être utilisés ainsi qu'une meilleure sécurité et de nouvelles fonctionnalités telles que les message texte et les communications à bas débit). La 1^{ère} et la 2^{ème} génération sont des technologies de téléphonie mobile qui rendent finalement les téléphones mobiles accessibles à tous. Quant à la 3^{ème} génération (3G le but de cette technologie était de fournir des données à haute vitesse, la technologie originale a été améliorée pour offrir des données allant jusqu'à 14 Mbps et plus. Et enfin, la 4^{ème} génération (4G est une technologie tout IP, offrant des débits de données jusqu'à 1 Gbps). Les deux générations mobiles, 3G et 4G fournissent une technologie mobile à large bande.

Pour nous, la 5G n'est plus le monde des opérateurs mobiles et des communications grand public, mais un nouveau. Ouvrez votre perspective, permettez la coexistence de diverses applications et applications intégrées dans une seule technologie, et permettez une société entièrement connectée. À tout moment, n'importe où, toute personne ayant un accès illimité à l'information et aux discussions virtuelles. Il couvre la connectivité pour tous les types d'applications, pas seulement les téléphones haut débit et mobiles. Et ce n'est pas seulement la connectivité des gens, c'est une connexion à tous les appareils et une connectivité disponible à tout moment, n'importe où. L'idée qui commence à se former derrière le terme 5G est qu'il ne correspond pas à de simples augmentations de débit comme c'était le cas dans les générations précédentes. La 5G n'a rien d'autre en commun que cette technologie, mais elle cible une variété de secteurs qui sont des piliers clés de la société, tels que l'énergie, la santé, les médias, l'industrie et les transports.

Ce mémoire se décline en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux communications sans fil 5G.

Le deuxième chapitre traite de l'architecture réseau 5G, avec ses défis et ses exigences

Le troisième, et dernier chapitre est consacré aux principales techniques de modulation utilisées dans la 5 G comme l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), NOMA (Non Orthogonal Multiple Access), et OMA (Orthogonal Multiple Access) en donnant pour chacune d'elles les outils théoriques, ainsi que les avantages, et les inconvénients. Une synthèse de résultats de simulation obtenus par d'autres auteurs sera également présentée.

CHAPITE I

Vers les communications sans fil 5G

I.1 - INTRODUCTION :

Aujourd'hui, l'utilisation des technologies de communication mobile est très diversifiée et les réseaux de communication font face à une grande hétérogénéité. Jusqu'à présent, chaque génération de réseaux cellulaires (1G, 2G, 3G, 4G) a été implémentée pour permettre l'utilisation d'applications spécifiques. Le contraire de la 5G (5^{ème} génération) est la nécessité de répondre à des besoins variés. En effet, ce nouveau réseau 5G est apparu comme un nouveau type d'objet de communication, à côté des utilisateurs cellulaires classiques, ou ce qu'on appelle désormais l'Internet des Objets (IOT Internet of Things). Dans ce chapitre, nous nous intéressons principalement à l'évolution des générations de technologies mobiles, allant de la 1^{ère} génération jusqu'à la 5^{ème} génération qui est toujours en déploiement dans certains pays. Cette technologie cellulaire conçue pour améliorer la vitesse et la réactivité des réseaux sans fil, elle fournit des débits binaires élevés jusqu'à 20 Gbps (supérieurs au filaire) et une latence inférieure à 1 milliseconde pour les applications qui nécessitent un retour d'information en temps réel.[1]

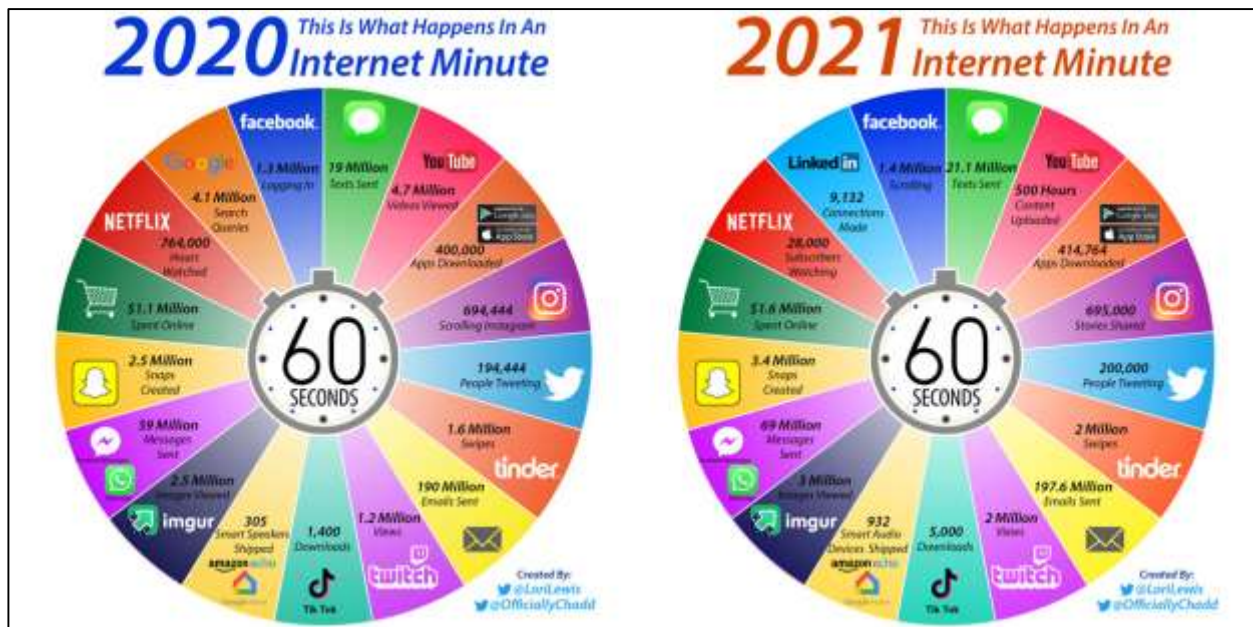


Figure I.1 : Ce qui se passe aujourd'hui en une minute sur internet.

I.2 - Les cinq générations de réseaux de mobiles :

I.2.1 - Introduction :

La communication entre utilisateurs de téléphones mobiles évolue rapidement et représente un énorme marché. Cinq générations de réseaux mobiles se sont succédé, qui se distinguent par la nature de la communication transportée :

1G : Communication analogique.

2G : Communication numérique sous forme circuit.

3G : Communication par paquet, exceptionnellement pour la parole téléphonique.

4G : Communication multimédia par paquet à très haut débit.

5G : Communication multimédia avec mobilité à très haut débit, connexion de milliards d'objets, support de missions critiques.

Ce chapitre détaille les générations 2G, 3G, 3G+, 4G, 4,5G et 5G. En ce qui concerne la 5G, les groupes de travail ont suffisamment avancé pour avoir une idée précise de cette nouvelle génération.

Les services fournis par la première génération de réseaux de mobiles sont quasi inexistantes en dehors de la téléphonie analogique. En raison du coût des appareils non miniaturisés, son succès est resté très faible. La deuxième génération est passée au circuit numérique. La normalisation d'un faible nombre d'interfaces air a permis le développement de composants en grande série et l'arrivée de la téléphonie mobile dans le grand public. La troisième génération repose sur une technologie paquet, mais garde le circuit pour la parole. La quatrième génération est totalement paquet et les débits deviennent conséquents pour supporter toute sorte d'applications. La cinquième génération apporte trois grandes catégories d'applications : le haut débit mobile, les missions critiques et la connexion massive des objets.

I.2.2 - La 2G :

La 2G représente réellement le démarrage des réseaux de mobiles. Cette section commence par décrire l'architecture de ce système, qui a été repris par les générations suivantes, mais en utilisant un vocabulaire en grande partie différent.

Chaque cellule dispose d'une station de base, ou BTS (Base Transceiver Station), qui assure la couverture radio. Une station de base comporte plusieurs porteuses, qui desservent les canaux de trafic des utilisateurs, un canal de diffusion, un canal de contrôle commun et des canaux de signalisation. L'interface intermédiaire est l'interface air.

Chaque station de base est reliée à un contrôleur de station de base, ou BSC (Base Station Controller). Le BSC et l'ensemble des BTS qui lui sont raccordés constituent un sous-système radio, ou BSS (Base Station Subsystem). Les BSC sont tous raccordés à des commutateurs du service mobile, appelés MSC (Mobile services Switching Center). L'interface entre le sous-système radio et le commutateur de service mobile est appelée interface A.

L'architecture d'un réseau de mobiles 2G est illustrée à la figure suivante.

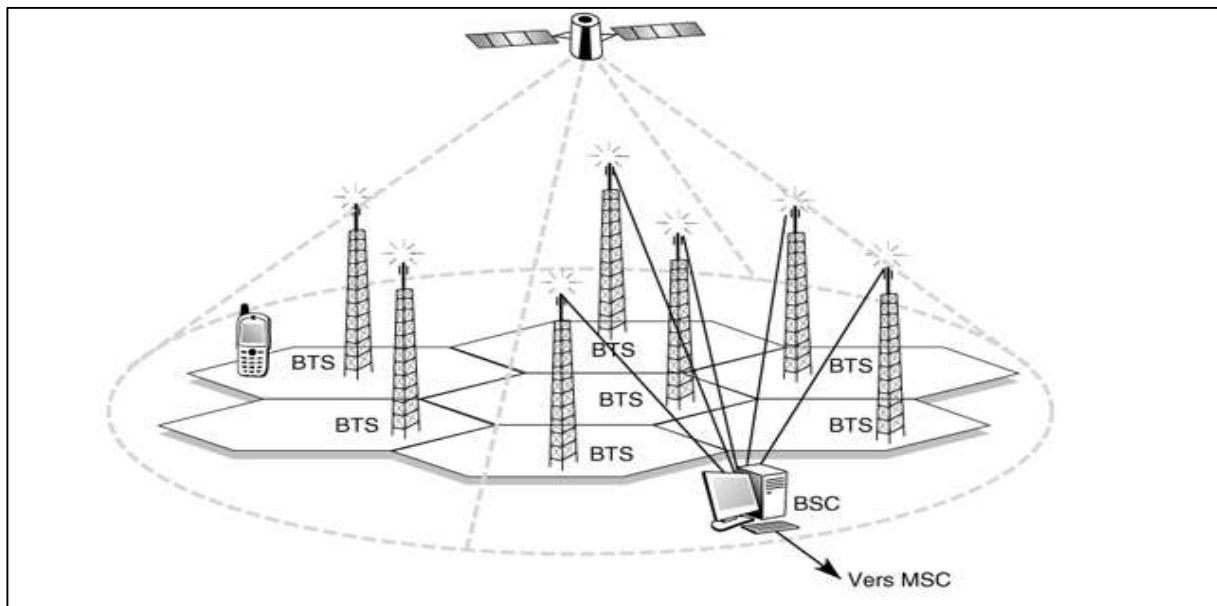


Figure I.2 : Architecture d'un réseau mobile.

I.2.2.1 -La mobilité dans les réseaux 2G :

La mobilité, caractéristique essentielle des réseaux étudiés dans ce chapitre, donne la possibilité de se déplacer dans la zone de couverture sans que la communication soit coupée, et donc de changer de cellule, voire de réseau.

La gestion de la mobilité revêt deux aspects :

- La gestion de la localisation, qui permet au réseau de connaître à tout instant l'emplacement du terminal, des utilisateurs et du point d'accès au réseau avec suffisamment de précision pour acheminer les appels aux utilisateurs appelés là où ils se trouvent.
- Le transfert intercellulaire, ou handover, qui permet d'assurer une continuité des appels lors d'un changement de cellule.

Les réseaux de deuxième génération proposent à l'utilisateur ce que l'on appelle une mobilité personnelle, en s'appuyant sur les concepts UPT (Universal Personal Telecommunications) de télécommunications personnelles universelles.

Les réseaux cellulaires offrent une plus grande mobilité du terminal. En outre, ils n'autorisent qu'une faible mobilité personnelle. Pour des systèmes comme le GSM, les fonctions UPT se limitent à la possibilité d'utiliser la carte d'identification qui se trouve à l'intérieur du terminal, la carte SIM (Subscriber Identity Module), dans n'importe quel autre équipement terminal.

La mobilité requiert une gestion, qui s'effectue généralement à l'aide de deux bases de données : le HLR, qui tient à jour les données de l'abonné, et le VLR, qui gère l'utilisateur dans la cellule où il se trouve.

Dans la réalisation de la mise à jour, deux types de localisation sont prévus : lorsque l'IMSI (International Mobile Subscriber Identity) peut être fourni par l'ancien VLR, et lorsque l'IMSI ne peut pas être fourni par l'ancien VLR.

Les figures suivantes illustrent le handover et la création d'un nouvel enregistrement dans la nouvelle base de données VLR ainsi que les étapes de mise à jour du HLR. Les flèches indiquent l'ordre dans lequel les commandes sont envoyées lors de la procédure de changement de cellule.

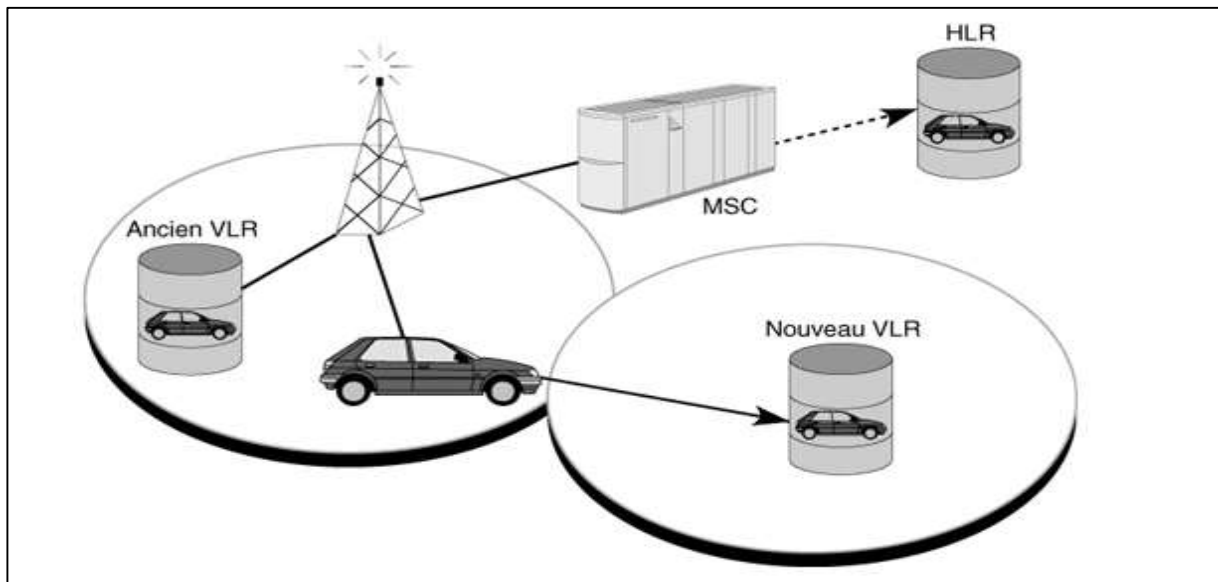


Figure I.3 : Handover et création d'un enregistrement dans un nouveau VLR.

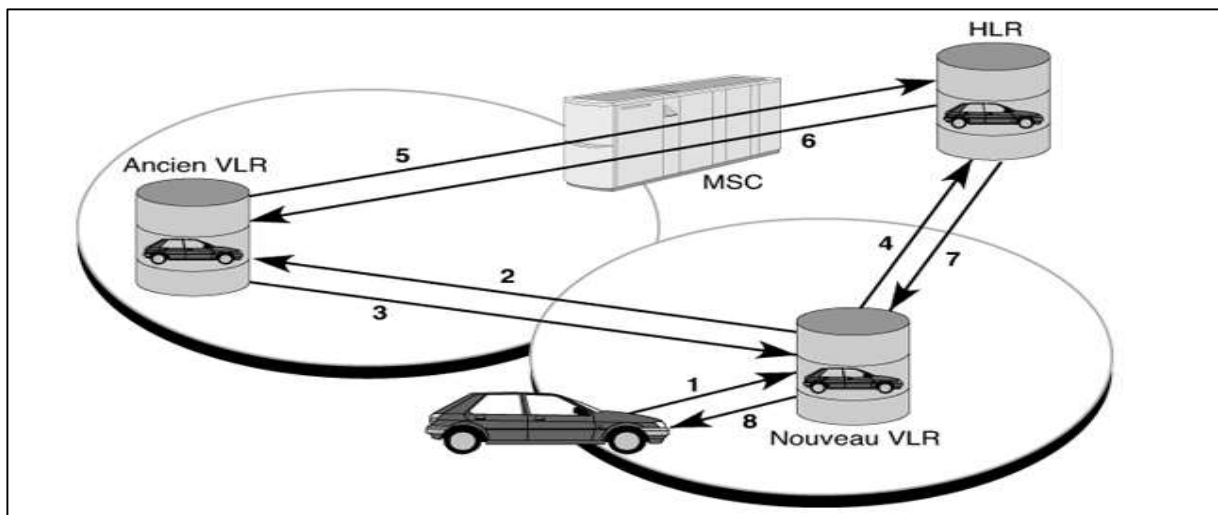


Figure I.4 : Étapes de mise à jour du HLR.

- **La transition vers la 3G :**

La mise en place de la troisième génération de réseaux de mobiles a demandé un laps de temps assez long, de l'ordre d'une dizaine d'années. Les raisons à cela sont, d'une part, le besoin de repartir de zéro du point de vue des infrastructures et, d'autre part, un manque de capitaux de la part des opérateurs de mobiles à la suite de l'achat de licences à des prix très élevés dans certains pays comme la Grande-Bretagne ou l'Allemagne. Ce laps de temps a été mis à profit pour améliorer la deuxième génération et lui permettre d'approcher les performances de la troisième.

Le GPRS (General Packet Radio Service) est le nom donné en Europe à l'amélioration de la technique GSM pour obtenir cette deuxième génération et demie.

Les réseaux de la génération 2,5G se caractérisent souvent, comme c'est le cas dans le GPRS, par un double réseau cœur, un réseau cœur pour le transport du téléphone et un réseau cœur pour le transport des données sous forme de paquets. À ce double réseau cœur, s'ajoutent des terminaux spécifiques, capables de gérer à la fois les voies téléphoniques, comme dans le GSM, et les voies de données, beaucoup plus sporadiques.

Les données sont mises dans de tout petits paquets dans le terminal lui-même, où elles attendent que le canal radio soit vide avant d'être émises. En d'autres termes, la téléphonie s'effectue de la même façon que dans la deuxième génération, en utilisant des slots de temps réservés lors de la mise en place du circuit téléphonique. Les circuits de l'interface radio sont prolongés sur les circuits du réseau cœur.

On retrouve ici le caractère circuit de la transmission de la deuxième génération. En revanche, les paquets de données attendent des slots libres pour être émis vers le réseau à transfert de paquets.

Pour ces transferts de données, la difficulté consiste à déterminer de façon probabiliste le nombre de clients qui peuvent être acceptés sur une même fréquence, sachant que les clients paquet émettent à des instants aléatoires. Il est donc très difficile de prévoir le moment de passage des paquets sur l'interface radio. Le service est évidemment fortement asynchrone. Le coût est lié au nombre de paquets transmis et non à la durée de la communication, comme lors d'une conversation téléphonique.

Les infrastructures d'un tel réseau sont quasiment identiques à celles du réseau GSM. Il suffit d'ajouter le réseau à transfert de paquets et la gestion des slots vides qui doivent être mis à profit pour émettre des paquets de données. La deuxième génération et demie utilise des réseaux à commutation de trames. Si cette génération se prolonge longtemps, le réseau cœur pour les données se transformera en un réseau ATM ou en un réseau MPLS.

I.2.3 - La 3G :

La figure suivante illustre les évolutions des systèmes de deuxième génération vers des systèmes de troisième génération. L'ETSI (**Institut européen des normes de télécommunications**) propose l'UTRA, la partie radio de l'UMTS, et l'E-GPRS comme évolutions du GSM. De son côté, l'ARIB (**Association of radio Industries and Businesses**) propose le WCDMA (**Wideband Code Division Multiple Access**) comme évolution du PDC (**Personal Data Communications system**). Ces systèmes sont fondés sur le réseau fixe du GSM.

Les interfaces radio de l'UMTS et du WCDMA étant semblables, la recherche de compromis a consisté à modifier quelques paramètres de la couche physique, tels que la vitesse de modulation ou le nombre de slots par trame. Des propositions très semblables, tels le TD-SCDMA chinois et les CDMA I et II coréens ont été fondées dans l'UMTS.

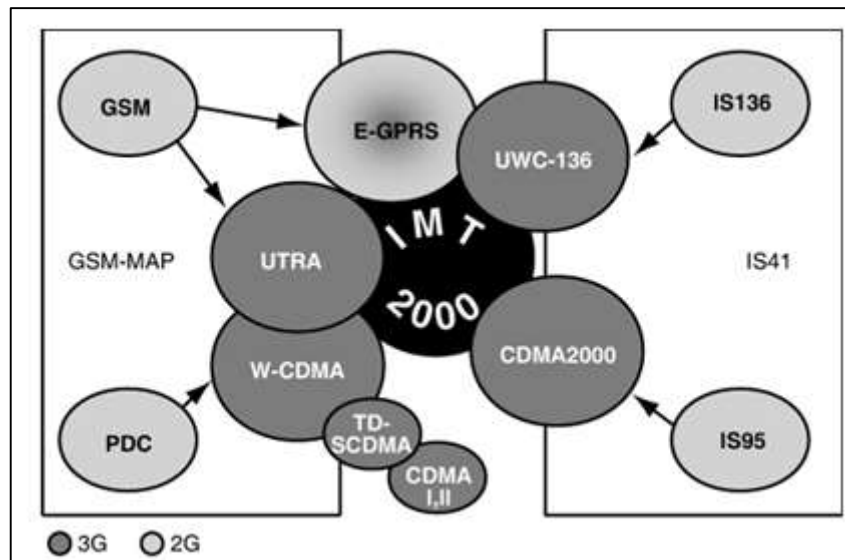


Figure I.5 : Évolution des technologies mobiles 2G-3G.

Soutenant des solutions techniques fondées sur le réseau fixe du GSM, les organismes de normalisation régionaux se sont regroupés autour de l'UMTS pour lui donner du poids en tant que solution candidate à l'IMT 2000.

I.2.3.1 - L'UMTS :

- **ARCHITECTURE GÉNÉRALE :**

L'architecture de l'UMTS s'appuie sur la modularité. Ses composants doivent être indépendants, et en théorie telle ou telle partie du système peut être mise à jour sans redéfinir l'ensemble.

L'UMTS définit trois domaines : le domaine utilisateur, le domaine d'accès radio, ou UTRAN, et le réseau cœur (Core Network). Ces domaines sont séparés par des interfaces, respectivement l'interface Uu et l'interface lu.

Des strates fonctionnelles sont appliquées à cette architecture d'une manière à séparer les fonctions en groupes indépendants :

La strate d'accès radio (transport/access stratum) contient les protocoles et fonctions relatifs à l'accès radio.

La strate de service (serving stratum) contient tout ce qui permet l'établissement d'un service de télécommunications.

La strate « personnelle » (home stratum) est dédiée à la capacité de stocker et de récupérer des informations sur un utilisateur afin de personnaliser les services et l'environnement de l'utilisateur.

La couche applicative (application stratum) représente les applications implémentées de bout en bout.

Le domaine utilisateur est pareil à ce qui a été défini en GSM. Il se compose d'un terminal capable de gérer l'interface radio et d'une carte à puce, la carte U-SIM, qui contient les caractéristiques de l'utilisateur et de son abonnement. De même, le domaine du réseau fixe est semblable à celui du GPRS. En revanche, l'accès radio de l'UMTS, l'UTRAN, est complètement différent et est décrit en détail ci-dessous.

L'architecture générale de l'UMTS est illustrée dans la figure suivante.

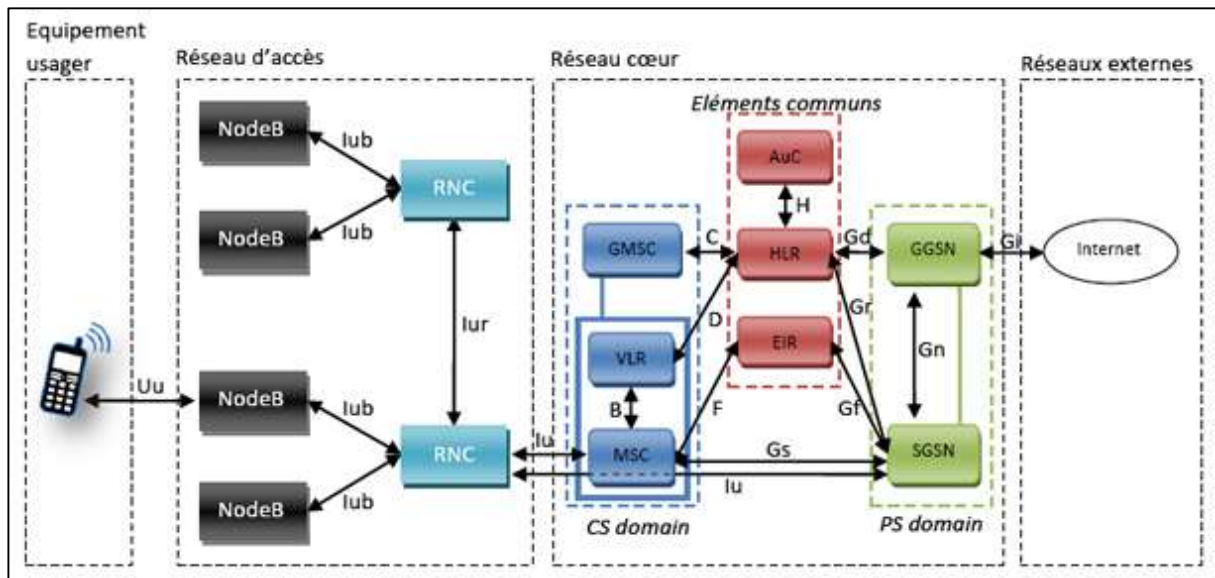


Figure I.6 : Architecture générale de l'UMTS.

L'UTRAN regroupe les stations de base, appelées NodeB dans le vocabulaire de l'UMTS, et les contrôleurs de stations de base, ou RNC (Radio Network Controller).

Scindé en deux parties, le réseau cœur est constitué d'un réseau cœur de type circuit et d'un réseau cœur de type paquet. Le réseau cœur circuit est composé, à l'image de celui du GSM, de commutateurs circuits, les MSC (Mobile service Switching Center), de passerelles vers les réseaux téléphoniques publics, les G-MSC (Gateway MSC), et de serveurs dédiés aux SMS, les SMS-GMSC (SMS Gateway MSC).

Le réseau cœur orienté paquet est similaire à celui du GPRS. Il est composé de commutateurs paquet, les SGSN (Serving GPRS Support Node) et les GGSN (Gateway GPRS Support Node), qui relie le réseau de l'opérateur au monde extérieur, lequel peut être représenté par un réseau paquet public ou un réseau paquet d'un autre opérateur.

Pour gérer les données relatives aux utilisateurs, telles que leur position dans le réseau, leur abonnement, etc., les bases de données introduites dans le GSM sont toujours présentes dans l'UMTS. Il s'agit, entre autres, des HLR, VLR et EIR (Equipment Identity Register).

- **L'UTRAN :**

UTRAN signifiait UMTS Terrestrial Radio Access. Lors de la création du 3GPP, le sigle a perdu son origine européenne pour signifier Universal Terrestrial Radio Access. On y retrouve l'approche modulaire qui domine dans l'UMTS, la signalisation étant séparée du transport des informations.

Il existe par conséquent deux catégories de protocoles, les protocoles du plan utilisateur (user plane protocols) et les protocoles du plan de contrôle (control plane protocols).

Le niveau d'accès UTRAN est connecté aux autres niveaux par trois types de points d'accès de services (service access point) : service de contrôle commun, pour la diffusion d'informations générales, service de contrôle dédié, pour un utilisateur spécifique, et service de notification, pour diffuser des informations non pas à toute la cellule, mais à des utilisateurs spécifiques.

Les éléments constituant l'UTRAN sont les stations de base, ou NodeB, dans le vocabulaire de l'UMTS, et les contrôleurs de stations de base, les RNC (Radio Network Controller). Un RNC et plusieurs NodeB forment un sous-système radio, ou RNS (Radio Network Subsystem).

- **Terminologie UMTS-GSM :**

Plutôt que de reprendre les sigles du GSM, l'UMTS a redéfini la majorité d'entre eux, même s'ils renvoient à des entités similaires dans le réseau d'accès radio. Le tableau ci-dessous compare la terminologie du GSM et celle de l'UMTS relative au réseau d'accès radio.

| UMTS | GSM | Commentaire |
|---------------------------------------|---|--|
| UE (User Equipment) | MS (Mobile Station) | |
| NodeB | BTS (Base Transciever Station) | Un NodeB est moins autonome qu'une BTS |
| RNC (Radio Network Controller) | BSC (Base Station Controller) | Un RNC est plus complexe qu'un BSC puisqu'il contrôle complètement les NodeB. |
| UMSC (UMTS MSC) | MSC (Mobile-services Switching Center) | |
| RNS (Radio Network Subsystem) | BSS (Base Station Subsystem) | |
| Interface lub | Interface Abis | Entre BTS et BSC (NodeB-RNC) |
| Interface lu | Interface A | Entre BSC (RNC) et réseau cœur |
| Interface lur | Inexistante | Entre 2 RNC |

Tableau I.1 : Comparaison de la terminologie du réseau d'accès radio.

Un NodeB est connecté à un RNC par le biais de l'interface lub, et un RNC l'est au réseau cœur par le biais de l'interface lu. Contrairement au GSM, l'UTRAN définit une interface supplémentaire entre deux RNC l'interface lur.

Cette interface a été introduite en raison de la spécificité de l'accès radio, qui est basé sur du CDMA. Le CDMA permet le soft-handover, c'est-à-dire l'établissement de deux chemins ou davantage entre le réseau et un mobile via deux stations de base potentiellement différentes. La séparation-combinaison des deux chemins se fait dans l'UTRAN, et il n'y a donc, au-delà du RNC, qu'un chemin possible vers le réseau cœur.

- **Les services et la OoS :**

La philosophie de définition des services de l'UMTS est différente de celle du GSM et de ses évolutions. Plutôt que de standardiser des services, l'UMTS a préféré définir des boîtes à outils permettant de construire des services.

Le GSM ne donne pas aux opérateurs la possibilité de se différencier les uns des autres pour les services de télécommunications, la distinction ne pouvant se faire que sur la couverture d'un territoire — mais désormais tous les opérateurs possèdent une couverture nationale en GSM - ou l'approche commerciale. De plus, la rigidité du système et la nécessité de standardiser ces services rendent difficile l'introduction de nouveaux services dans le GSM. Cette limitation, particulièrement ressentie par des opérateurs bridés dans la proposition de nouveaux services, disparaît dans l'UMTS.

Les débits offerts par l'UMTS sont conformes aux exigences de l'IMT 2000 : 2 Mbit/s pour une mobilité faible et des conditions radio favorables, le mobile ne devant pas trop s'éloigner de la station de base, 384 kbit/s pour une mobilité moyenne, dans une ville, par exemple, et 144 kbit/s dans un environnement rural.

Bien que ces débits soient techniquement réalisables, ils ne sont que rarement atteints en pratique. L'une des raisons à cela est que, comme dans tout système radio mobile, il existe une différence entre les débits théoriques, vantés dans les approches commerciales, et les débits réels, que constatent les utilisateurs.

I.2.4 - HSPA (LA 3G+) :

Les premières générations de réseaux de mobiles se préoccupaient en priorité de la téléphonie. Avec la 3G + et la 4G, l'important devient la transmission de données et l'intégration des réseaux de mobiles dans l'environnement IP. La 4G marque une convergence complète avec le réseau Internet fixe. Les utilisateurs ne remarqueront plus aucune différence entre une connexion mobile et une connexion fixe.

La 3G+ commence avec la release 5 de l'UMTS. Les différentes releases sont les suivantes :

- Release 5 (2002) — UMTS R5 : introduction du HSDPA (High-Speed Down link Packet Access) permettant un débit descendant des données jusqu'à 10 Mbit/s ; amélioration du GSM-Edge, en particulier pour la téléphonie.

- Release 6 (2004) — UMTS R6 : introduction du HSUPA (High-Speed Up link Packet Access) permettant d'augmenter le débit descendant à 6 Mbit/s ; interconnexion simple avec les réseaux Wi-Fi ; introduction du MBMS (Multimedia Broadcast/Multicast Service).

- Release 7 (2007) — UMTS R7 : introduction de la technologie MIMO utilisée dans Wi-Fi ; amélioration des performances et de la QoS ; introduction de HSPA+ (High-Speed Packet Access Evolution) ; introduction du « sans contact » en vue de nouvelles applications, comme le paiement.

- Release 8 (2008) — UMTS R8 : introduction de LTE (Long Term Evolution), de l'OFDMA à la place du CDMA et d'un réseau tout IP (sauf pour la partie téléphonique, qui utilise encore le GSM).

- Release 9 (2009) — UMTS R9 : introduction d'un calendrier « green », c'est-à-dire de solutions permettant d'économiser l'énergie électrique dépensée par les stations de base du fait de l'importante consommation des antennes et équipements associés. Cette release propose également une normalisation des services d'alerte et une amélioration de la compatibilité IP.

On considère souvent que la 3G+ correspond aux hauts débits de données, c'est-à-dire de plus de 1 Mbit/s. Cette valeur est obtenue par la technologie HSDPA dans le sens descendant et par son successeur HSUPA (High-Speed Up link Packet Access) dans le sens montant. Ces deux technologies sont détaillées dans les sections suivantes :

I.2.4.1 - HSDPA (High Speed Down link Packet Access) :

Le HSDPA offre des performances approximativement dix fois supérieures à la 3G (UMTS R5).

C'est principalement une évolution logicielle qui permet cette augmentation des débits.

Le HSDPA possède un lien descendant du réseau vers le terminal en mode paquet en augmentation forte par rapport à l'UMTS.

Le HSDPA est de la famille HSPA (High-Speed Protocol Access).

Sur la liaison descendante, le déploiement existant en 2007 offre des débits de 1,8 Mbit/s, 3,6 Mbit/s, 7,2 Mbit/s et 14,4 Mbit/s.

Un autre aspect encore plus important concerne la bande passante globale, qui permet à de nombreux clients de se connecter simultanément.

Le HSDPA est une évolution relativement simple de l'UMTS, et c'est la raison pour laquelle on la classe dans la 3,5G, ou 3G+.

Dans ce dernier protocole, une redondance incrémentale améliore considérablement le débit : même si le paquet arrive avec une erreur, le paquet erroné est conservé. Il est possible que, même si le renvoi du paquet provoque un paquet incorrect, la combinaison des deux paquets incorrects peut corriger l'erreur.

I.2.4.2 - HSUPA (High Speed Up link Packet Access) :

Le HSUPA s'intéresse à la voie montante, qui devrait atteindre à terme 5,76 Mbit/s. Le HSUPA utilise un canal montant amélioré nommé E-DCP (Enhanced Dedicated Channel), qui utilise les mêmes ingrédients que le HSDPA sur le canal descendant : adaptation des communications entre les terminaux et le NodeB pour optimiser l'utilisation globale du canal.

Les algorithmes proposés dans cette norme incluent :

- TTI (Transmission Time Interval) de longueur réduite.
- Protocole HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request), qui effectue de la redondance incrémentale.
- Ordonnanceur de paquets, qui décide quand et comment les paquets sont envoyés en utilisant la qualité de la communication et l'état des files d'attente du récepteur.
- Possibilité de faire passer des paquets prioritaires, comme ceux de la ToIP (**Telephony over Internet Protocol**) hors du champ de l'ordonnancement.

Ces paquets sont dits « non-scheduled ». L'objectif est de transmettre des paquets fortement contraints qui ne sont pas satisfaits par l'ordonnanceur, sans tenir compte de la synchronisation requise par un flux particulier.

- Couche MAC qui prend en compte des priorités des paquets ordonnancés et non ordonnancés. Le débit est déterminé à l'ouverture de la connexion.

Après la technologie HSUPA, le 3GPP a travaillé à une nouvelle amélioration avec le HSOPA, qui marque l'entrée dans la quatrième génération de réseaux de mobiles et l'entrée vers le très haut débit.

I.2.4.3 - HSOPA (High Speed OFDM Packet Access) :

Le HSOPA (High-Speed OFDM Packet Access) est une supposition du 3GPP LTE (Long Term Evolution).

On appelle parfois cette norme le super 3G.

La différence fondamentale entre le HSOPA et les deux techniques précédentes réside dans l'interface radio, qui a été complètement modifier pour passer à l'OFDMA. Cette interface étant incompatible avec les versions précédentes, HSDPA et HSUPA, il y a, à bien des égards, un changement de génération ; cependant, les normalisateurs ont préféré repousser l'introduction véritable de la 4G à la compatibilité totale avec Internet.

Les débits sont de 50 Mbit/s dans le sens montant et 100 Mbit/s dans le sens descendant.

Le HSOPA travaille de concert avec le HSDPA et le HSUPA, de sorte qu'un client puisse se connecter sur la meilleure cellule possible par rapport à l'application en cours. Les passages d'une technologie à l'autre se font de façon transparente.

I.2.5 - La 4G :

I.2.5.1 - Le LTE (Long Term Evolution):

Le LTE, ou Long Term Evolution, marque l'arrivée de la 4G, pour désigner la technologie commerciale correspondant au HSOPA, c'est-à-dire l'arrivée des technologies de radio mobile utilisant l'OFDMA.

Le LTE a fait son arrivée en 2010 et la plupart des pays dans le monde ont déployé cette technologie pour prendre en charge les énormes débits de données provenant des smartphones et des tablettes. Les débits sont de l'ordre de ceux de l'ADSL c'est-à-dire de plusieurs mégabits par seconde.

Le réseau LTE se compose de deux parties : la partie radio, ou E-UTRAN, et la partie réseau équipée d'EPC (Evolved Packet Core).

Dans l'E-UTRAN, les fonctions de contrôle sont intégrées dans les E-Node B alors qu'elles étaient repoussées dans les RNC (Radio Network Controller) dans les réseaux UMTS.

L'EPC est lui totalement IP.

Les performances des réseaux LTE se sont améliorées depuis le lancement de ces réseaux.

• **ARCHITECTURE GÉNÉRALE :**

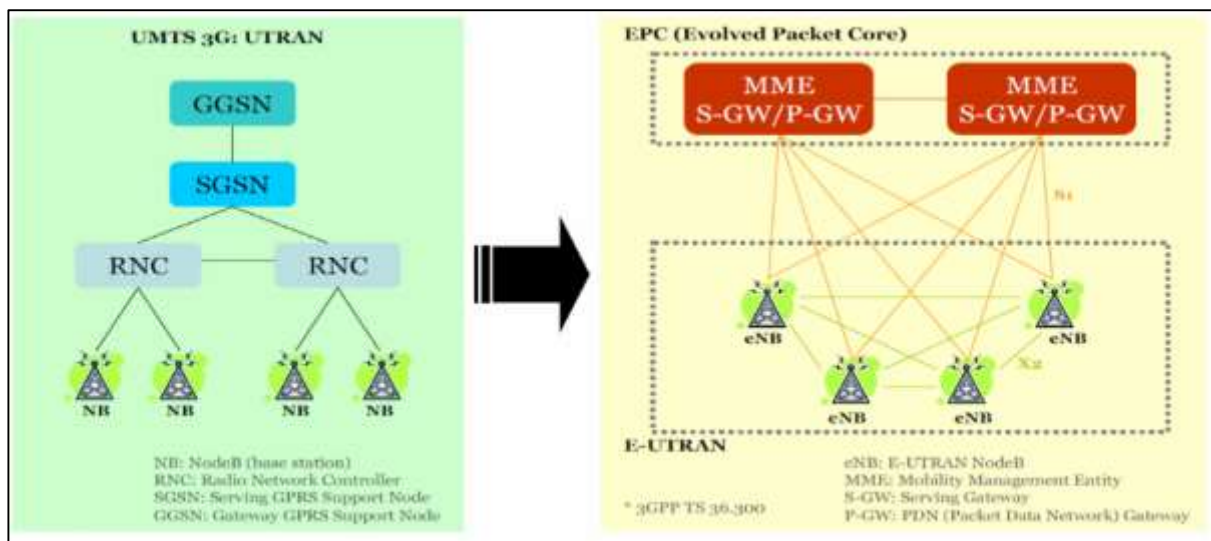


Figure I.7 : Le passage de la 3G vers LTE.

I.2.5.2 - LTE Advanced (Long Term Evolution Advanced):

De nombreux éléments nouveaux par rapport à la 3G sont pris en compte dans la 4G représentée par le LTE Advanced. Les points marquants sont les suivants :

- Les nœuds relais qui permettent d'atteindre une antenne eNodeB (Evolved NodeB) ou encore eNB par l'intermédiaire d'un point relais.
- Les solutions MIMO sont utilisées dans le sens antenne vers terminal et dans le sens inverse. Le MIMO devient massif pour indiquer qu'un grand nombre d'antennes est mis en œuvre à l'émetteur et au récepteur.
- Les bandes passantes utilisées vont de 20 MHz à 100 MHz, ce qui permet de multiplier les débits jusqu'à un facteur 5, si nécessaire.

- L'interface air est optimisée en fonction de l'emplacement du terminal et des interférences. En d'autres termes, on retrouve, comme dans la 3G+, un ensemble d'outils qui permettent d'accélérer les débits dès que le terminal se situe dans une zone où le signal est reçu avec une bonne qualité et au contraire dégradent le débit dès que le client se trouve dans un environnement difficile ou qu'il est fortement mobile.
- La 4G joue la carte de la compatibilité avec les environnements Wi-Fi qui se développent à grande vitesse afin de profiter de ces réseaux pour l'écoulement de trafics importants.
- La gestion et le contrôle du réseau sont beaucoup plus automatisés et deviennent autonomiques. En d'autres termes, un effort important est effectué pour obtenir un autopilotage de l'ensemble du système en matière de configuration, de sécurité, de disponibilité et de monitoring.
- Le codage de l'information est amélioré pour obtenir des taux de compression encore plus élevés que dans la 3G+. Les corrections d'erreurs sont également améliorées, en utilisant de façon plus efficace les techniques déjà développées dans la 3G+.
- La gestion des interférences est fortement améliorée, au point qu'ils sont quasiment supprimés.

Sur la partie purement technique, le LTE-A offre des débits nettement plus élevés grâce à l'agrégation de plusieurs porteuses (Carrier Aggregation) et à la disparition de la parole numérique de type GSM pour devenir totalement VoIP. L'agrégation de porteuses permet de rassembler des porteuses qui ne sont pas contiguës. Avec une largeur de spectre de 100 MHz on obtient un débit de l'ordre de 1 Gbit/s.

Passons à la Release 14 de la 4G qui englobe une grande partie du sujet de notre mémoire, et qui est une étape préparative pour la 5G.

La release 14 sera quasiment une pré-5G. On y retrouvera les ingrédients de la 5G, avec l'amélioration des missions critiques grâce à des temps de réaction approchant la milliseconde, une haute fiabilité, une disponibilité de type carrier-grade et une forte sécurité. L'une de ses utilisations principales, et qui est déjà en cours de développement, est le V2V (Vehicle-to-Vehicle), où des temps de réaction de l'ordre de la milliseconde sont nécessaires.

Les services V2X entre véhicules, véhicule et piéton, véhicule et infrastructure font également partie du paysage pour avoir des systèmes autonomes.

Le eLAA (enhanced Licensed Assisted Access) est également à l'étude pour permettre à un utilisateur qui n'a pas d'abonnement chez un opérateur d'utiliser le réseau de celui-ci s'il n'y a pas d'autre réseau disponible là où il se trouve.[2]

I.2.6 – Tableau récapitulatif des générations de téléphonie mobile :

| Période | Années 1980 | Années 1990 | Années 2000 | Années 2010 | Années 2020 |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------------|
| Génération de mobile | 1G | 2G | 3G | 4G | 5G |
| Objet de la transmission | Voix | Voix et texte | Données mobiles | Mobile à large bande | Tous types de transferts |
| Débits typiques | 2,4 kbps | 64 kbps | 384 kbps | 100 Mbps, 1 Gbps | 10 Gbps |
| Exemples de technologies utilisées | NMT, AMPS, TACS | GSM, IS-95, D-AMPS | W-CDMA, UMTS, CDMA1x, EV-DO | LTE | IMT 2020 |

Tableau I.2 : Cycle des générations de téléphonie mobile. [3]

| | 2G | 3G | 3G+ | 4G | 4G+ | 5G |
|---------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------------|-----------------|
| Débit maximal | 0.3 Mbps | 7.2 Mbps | 42 Mbps | 150 Mbps | 300 Mbps-1 Gbps | 1-10 Gbps |
| Débit moyen | 0.1 Mbps | 1.5 Mbps | 5 Mbps | 10 Mbps | 15 Mbps-50 Mbps | 50 Mbps et plus |

Tableau I.3 : Débits maximaux et moyens associés aux différentes générations.[3]

I.3 - Aperçu de la 5G :

Les communications mobiles ont profondément changé la vie des gens. Malgré cela, la recherche de communications mobiles plus performantes est sans fin. La cinquième génération de technologies mobiles, la 5G, a été poussée vers l'avant pour s'adapter à la croissance explosive du trafic de données mobiles, aux connexions massives d'appareils et à l'émergence de nouveaux services et scénarios d'application.

La 5^{ème} génération reprend les technologies déjà utilisées avec la 4G LTE. Elle se distingue toutefois de cette dernière, par plusieurs points importants : La 5G est d'abord une mise à jour technologique de la 4G LTE et peut réutiliser les mêmes bandes de fréquences que cette dernière. Grâce à cette mise à jour, un téléphone portable 5G bénéficie d'un meilleur débit qu'un téléphone portable 4G pourtant connecté à la même antenne et en utilisant la même fréquence. La 5G fait également appel à de nouvelles bandes de fréquences qui se divisent en deux groupes : Celui des bandes de fréquences 5G Sub-6 et celui des ondes millimétriques. Ce qui permet d'augmenter sensiblement le débit au détriment de la portée [4].

I.4 - Les standards de la 5G :

En absence d'une véritable norme de la technologie 5G, le marché est encore en train de déterminer les caractéristiques et les fonctionnalités essentielles de cette nouvelle génération. Dans le but de trouver des normes standardisées de la 5G, voici les principaux organismes de normalisation 5G qui actuellement participent à ces processus : la 3^{ème} Génération de Partenariat du Projet (3GPP), le Groupe de Travail sur l'ingénierie de l'Internet (IETF : Internet Engineering Task Force) et l'Union Internationale des Télécommunications (UIT).

I.4.1 - Génération de Partenariat du Projet (3GPP) :

Le projet de partenariat de troisième génération (3GPP) est un projet de collaboration entre des associations de télécommunications dont l'objectif initial est de développer des spécifications applicables au niveau mondial pour les systèmes mobiles de troisième génération (3G). Notamment les systèmes mobiles basés sur les réseaux GSM évolués ainsi que sur les technologies d'accès radio qu'ils prennent en charge, sans oublier les capacités de service et la sécurité. Cela comprend aussi la maintenance et le développement des technologies suivantes : les normes 2G/2.5G, les normes 3G, les normes LTE (4G) et aussi la nouvelle génération 5G. En fin 2017, le 3GPP a commencé à définir les spécifications détaillées nécessaires à la conception et à la construction d'un réseau 5G. [5]

I.4.2 - Internet Engineering Task Force (IETF) :

L'IETF est le premier organisme de normalisation d'internet, développant des standards via des processus ouverts pour améliorer le fonctionnement d'internet. L'IETF est une grande communauté internationale ouverte pour les concepteurs de réseaux, d'opérateurs, de fournisseurs et de chercheurs qui se préoccupent de l'évolution de l'architecture et du bon fonctionnement d'internet. L'IAB (Internet Architecture Board) et l'IRTF (Internet Research Task Force) enrichissent le travail de l'IETF en fournissant, respectivement, une direction technique à long terme pour le développement d'internet et la promotion de la recherche qui est importante pour son évolution. [6]

I.4.3 - Union Internationale des Télécommunications (UIT) :

L'UIT est l'agence des Nations unies pour le développement spécialisé dans les technologies de l'information et de la communication, basée à Genève (Suisse). Elle attribue dans le monde entier des fréquences radioélectriques et des orbites de satellite, élabore les normes techniques qui assurent l'interconnexion harmonieuse des réseaux et des technologies et s'efforce d'améliorer l'accès aux TIC (Technologie de l'information et communication) pour les communautés mal desservies partout dans le monde.

Les travaux de l'UIT sont bénéficiés quotidiennement ; par exemple lors d'un appel avec téléphone portable, accès à Internet ou l'envoi d'un courrier électronique. La mission principale de cette institution est d'assurer une connexion à tous les habitants de la planète, quel que soit l'endroit où ils vivent et leurs moyens [7].

I.5 - Que fait l'UIT ?

L'UIT se compose de trois grands domaines d'activités ou "Secteurs" qui travaillent dans le cadre de conférences ou de réunions.

- **RADIOCOMMUNICATIONS (UIT-R) :** Son rôle est de gérer le spectre des fréquences radio par, notamment, le développement de standards.
UIT-R : définit et gère le cadre réglementaire international régissant l'utilisation du spectre des orbites de satellites par les services de radiocommunication. Elabore également des normes mondiales sur les radiocommunications.
- **NORMALISATION (UIT-T) :**
 - **Security** : coordonne les normes pour les télécommunications et les technologies de l'information et de la communication telles que X.509 pour la cybersécurité, Y.3172 et Y.3173 pour l'apprentissage automatique et H.264/MPEG-4 AVC pour la compression vidéo
 - **Multimedia** : IPTV, Voix IP, e-santé ou santé numérique, Affichage dynamique, norme de codage audio et vidéo de la parole.
 - **QOS, Cloud Computing , IOT**
 - **Transport and Access** : FTTH

- **DÉVELOPPEMENT(UIT-D)** : L'UIT-D s'efforce de diffuser un accès équitable et abordable aux télécommunications comme moyen de stimuler un développement social et économique plus large
Emergency Telecommunications and Climate change
Applications mobiles [8]

I.6 -La 5G, qu'est-ce que c'est ?

La 5G est plus un voyage qu'une destination. Son objectif consiste à faire évoluer les réseaux de la 4G pour répondre aux différents besoins complémentaires : augmenter les débits, supporter les communications denses de longues portées et assurer des communications quasi-temps réel spécialement dans des applications critiques telles que la télémédecine.

I.6-1 - Est-ce seulement une question de vitesse ?

La réponse est non ! La 5G réduit considérablement la latence. Il s'agit du temps de réponse entre le clic sur un lien ou le démarrage de la diffusion vidéo par téléphone et l'envoi d'une demande au réseau jusqu'à ce que le réseau réponde et diffuse le site Web ou envoie la vidéo.

Ce délai peut durer environ 20 millisecondes sur les réseaux actuels. Cela ne semble pas beaucoup, mais avec la 5G, le délai est réduit à seulement 1 milliseconde.

Cette réactivité est essentielle dans certains domaines. Surtout compte tenu de la réalité augmentée / réalité virtuelle et de la chirurgie à distance. La 5G devrait apporter une expérience de jeu plus pratique aux amateurs de cloud gaming (xCloud, Google Stadia, etc.).

Si la 5G n'élimine pas complètement ce retard qui afflige les amateurs de visioconférence, elle devrait rendre les conversations très fluides.

Ces connexions à faible latence signifient également que les voitures autonomes peuvent communiquer entre elles en temps réel. Cependant, il faut une couverture 5G suffisante pour connecter ces véhicules.

I.6-2 - Y a-t-il d'autres avantages ?

Les réseaux 5G sont conçus pour connecter beaucoup plus d'appareils que les réseaux cellulaires traditionnels. L'Internet des Objets vous dit quelque chose ? La 5G a la possibilité alimenter plusieurs appareils autour de vous, qu'il s'agisse d'un collier de chien ou d'un réfrigérateur. L'ANFR^A a annoncé que "la 5G fournit une densité de connexion qui multiplie par 10 le nombre d'objets connectés au réseau en même temps.

^A **L'ANFR** : L'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) gère l'ensemble des fréquences radio en France. Cette ressource rare et stratégique utilisée pour toutes les communications sans fil est la propriété publique de l'État, qui est sous-traitée à l'ANFR. Sa mission est donc de négocier au niveau international sur l'utilisation future de la bande de fréquences et de défendre la position de la France. Elle autorise également toutes les installations sur les sites d'émetteurs (> 5 watts) de la zone et garantit le respect des restrictions d'exposition du public aux ondes radio. Enfin, l'ANFR réglemente l'utilisation des fréquences et assure la bonne coexistence de leur utilisation par tous les usagers.



Figure I.8 : Le monde où tout est connecté.[9]

Les réseaux 5G sont également conçus pour gérer les appareils utilisés par les entreprises telles que les machines agricoles et les distributeurs automatiques de billets, et peuvent s'adapter à une variété de besoins. Par exemple, certains produits, tels que les capteurs pour machines agricoles, ne nécessitent pas de connexion permanente. Ces types de scanners à faible puissance sont conçus pour durer 10 ans sur la même batterie tout en transmettant des données de manière régulière.[9]

I.7 - Cas d'utilisation de la 5G :

Les réseaux 5G sont conçus pour prendre en charge trois catégories de services :

I.7.1- eMBB (haut débit mobile amélioré) : accès Internet haut débit adapté à la navigation Web, au streaming vidéo et à la réalité virtuelle. C'est le service d'accès à Internet auquel nous sommes habitués avec les smartphones.

eMBB : VR (Virtual Reality) / AR (Augmented Reality) / MR (Mixed Reality) [10]

• VR, AR et MR : qu'est-ce que c'est ?

La réalité virtuelle (VR), la réalité augmentée (AR) et la réalité mixte (MR) sont de nouvelles technologies basées sur l'intégration d'éléments numériques virtuels avec le monde réel : en surimpression (AR), interaction avec des éléments de cet environnement réel (MR), ou immersion complète de l'utilisateur dans un monde virtuel séparé du monde réel (VR).

La réalité virtuelle (VR de virtual reality) comprend une expérience immersive disponible via un casque de réalité virtuelle (également appelé **HMD pour head-mounted display**). **L'utilisateur est complètement séparé du monde réel et se trouve dans un environnement virtuel** qui peut être visualisé à travers un casque de réalité virtuelle.

AR for Augmented Reality vous permet de superposer le monde réel (objets virtuels, informations, etc.) avec du contenu numérique. L'utilisateur continuera de voir l'environnement réel recouvert de cette couche de contenu numérique. L'affichage est généralement effectué sur l'écran affiché à l'utilisateur via des lunettes de réalité augmentée ou via un smartphone avec une application spéciale qui fournit des fonctionnalités de réalité augmentée.

La réalité mixte (MR pour Mixed Reality) est une combinaison de plusieurs technologies. Les casques de réalité mixte permettent d'intégrer des éléments virtuels dans le monde réel en faisant interagir ces éléments avec l'environnement.

Les utilisateurs ne sont pas séparés du monde réel et peuvent voir à travers des casques et des lunettes de réalité mixte.

Enfin, la réalité étendue (XR pour extended reality) englobe tous types d'environnements réels et virtuels incluant la réalité virtuelle, la réalité augmentée et la réalité mixte. [11]

I.7.2- mMTC (Massive machine type communication) :

La MTC (Machine Type communication) est un paradigme de communication dans lequel un certain nombre de dispositifs ou d'objets sont connectés à l'internet ou directement connectés et communiquent entre eux avec peu ou pas d'intervention humaine. À l'arrivée des technologies 5G, de nouvelles applications des MTC sont développées pour servir un grand nombre d'objets, introduisant ce qu'on appelle le MTC massif (mMTC), ou l'Internet massif des objets (mIoT)[12]

I.7.3- URLLC (communication ultra-fiable à faible latence) :

« Automated Driving » services pour les appareils sensibles à la latence pour des applications telles que l'automatisation d'usine, la conduite autonome et la chirurgie à distance. Ces applications nécessitent une latence inférieure à la milliseconde avec des taux d'erreur inférieurs à 1 perte de paquet sur 10^5 paquets.[10]

I.8 – Conclusion :

Dans ce chapitre, afin de mieux comprendre le concept de base des réseaux de téléphonie mobile, nous avons décrit l'évolution des réseaux de communication mobile de la 1G à la 5G. Enfin, nous avons présenté la norme 5G, ses caractéristiques ainsi que ses différents cas d'utilisation.

CHAPITRE II

Architecture réseau 5G, défis et exigences

II.1 - Introduction :

Les technologies de 5^{ème} génération 5G-NR arrivent à grands pas. Une véritable révolution digitale qui possède un potentiel de transformation immense pour nous offrir une vie meilleure.

Tout connecter est la principale caractéristique de la 5G, partout et tout le temps. Elle vise les appareils qui prennent en charge la voix sur IP (VoIP), où l'utilisateur verra un taux élevé de transmission de données et un volume approprié de l'appel. Cette technologie a pour but de répondre à toutes les exigences des clients qui aspirent à des fonctionnalités avancées dans les téléphones mobiles.

Récemment, une forme du spectre électromagnétique appelée bande millimétrique était suggérée pour être employé dans la 5G, où plusieurs GHz de cette partie du spectre peut être utilisé pour fournir des commandes élevées de la taille des données pour les utilisateurs de téléphones mobiles, peuvent également prendre en charge les connexions entre les petites cellules dans ces fréquences, plus de détails seront citer dans ce chapitre, ainsi la différente technologie de la 5G. Nous allons aussi présenter les défis et les objectifs de cette nouvelle évolution des générations des réseaux mobiles, en se focalisant sur l'architecture réseaux et architecture radio partant d'une simple comparaison avec l'architecture de celle de la 4G.

II.2 - Les briques technologiques pour atteindre les objectifs de la 5G :

Avec la croissance rapide de la demande de trafic de données des utilisateurs, l'amélioration de la capacité du système et l'augmentation du débit sont devenus des préoccupations essentielles pour le futur réseau de communication sans fil de la 5^{ème} génération. Dans ce contexte : la bandes millimétriques, full Duplex, massive MIMO, Beamforming, NOMA et Small-cell sont proposées comme solution potentielle pour atteindre de nouveaux niveaux de performance.

II.2.1 – Les technologies de la 5G :

- **Bandes millimétriques :** L'utilisation de bandes millimétriques est l'une des technologies disruptives de la 5G. Cette désignation correspond aux fréquences supérieures à 6 GHz. Cela n'a pas été pris en compte lors du déploiement du réseau mobile (fronthole) en raison de la maturité de la technologie et de la qualité de propagation.

Pour faire face à la vitesse et au volume toujours croissants de données échangées, une nouvelle bande passante doit être utilisée sur des canaux très larges (100MHz et plus par utilisateur). : Les bandes d'ondes millimétriques peuvent fournir de telles réserves spectrales, qui peuvent être utilisées pour atteindre très rapidement dans certains cas. Comparaison des performances 4G et 5G. D'autre part, son utilisation nécessite le développement de toutes les technologies nécessaires pour atteindre une miniaturisation, un faible coût et une consommation d'énergie compatible avec les terminaux mobiles (amplificateurs, encodeurs, traitement). En particulier, la mauvaise qualité de propagation des ondes millimétriques réduit la couverture de chaque cellule. Cela nécessite la mise en œuvre des techniques de formation de beamforming décrites ci-dessous afin de mieux focaliser l'énergie transmise depuis l'antenne.

- **Full Duplex** : Les systèmes classiques ont différentes bandes de fréquences pour l'émission et la réception (duplexage de fréquence connue sous le nom de FDD, frequency division duplexing, utilisé dans toutes les bandes de réseau cellulaire) ou différents moments (duplexage temporel dit TDD, time division duplexing) pressenti pour les réseaux de boucle locale radio LTE. Le full duplex est destiné à permettre l'envoi et la réception simultanés d'informations à la même fréquence et au même endroit.

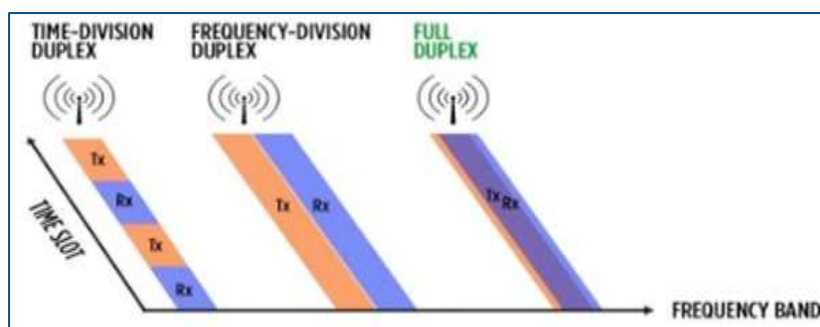


Figure II.1 : Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD [14]

- **Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs)** : cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « intelligentes », situées sur le même panneau (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquences supérieures à 6 GHz). L'attrait de l'utilisation du massive MIMO est double : d'une part, elle permet de focaliser l'énergie sur un terminal, pour améliorer son bilan de liaison, grâce à la formation de faisceau, ou beamforming; d'autre part, cette technologie augmente les débits, grâce au multiplexage spatiotemporel.[14]



Figure II.2 : Exemple d'utilisation d'une antenne à formation de faisceau utilisée pour connecter des points d'accès Wi-Fi [15]

→ COMMENT FONCTIONNE LE MIMO MASSIF ?

L'utilisation du MIMO massif, ou massive MIMO, est l'une parmi les nouveautés de la 5G. Il permet de mieux couvrir les zones saturées tel que les stades, les aéroports ou les centres commerciaux. Le MIMO massif permet l'amélioration de la fiabilité et la réduction de la latence et l'augmentation des débits tandis que le MIMO classique, celui-ci utilise quelques antennes par pylône, le MIMO massif s'appuie sur une centaine d'antennes pour émettre le signal aux appareils connectés. [16]



Figure II.3 : Antenne massive MIMO de Nokia [16]

- **Le beamforming** : est une technologie réseau qui permet de constituer des faisceaux très directs vers les terminaux. Cela améliore la stabilité du signal émis et sa puissance, notamment dans des endroits surchargés, comme les lieux publics.[17]

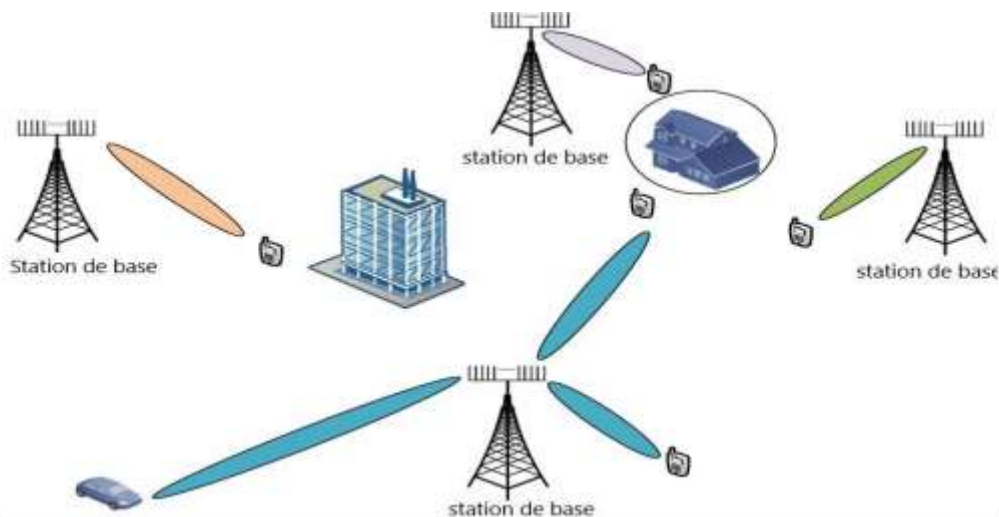


Figure II.4 : La technologie Beamforming [17]

- **Multiplexage NOMA (Non Orthogonal Multiple Access)** : le LTE utilise un multiplexage dit orthogonal, chaque terminal utilisant, de manière unique, une partie des fréquences à un moment donné (ressource blocks). Pour l'amélioration de l'efficacité spectrale de la 5G, par rapport à la 4G, des méthodes de multiplexage non orthogonales, c'est-à-dire que plusieurs utilisateurs peuvent recourir aux mêmes fréquences au même moment, sont envisagées. La discrimination entre plusieurs utilisateurs peut se faire en attribuant des codes différents à chaque usager (SCMA, sparse code multiple access, combinaison du CDMA, code division multiple access, de la 3G et de l'OFDMA, orthogonal frequency division multiple access, de la 4G) ou en jouant sur la différence des niveaux du rapport signal à bruit des différents utilisateurs (power domain NOMA, illustré ci-dessous). Ce sont les deux modes privilégiés pour NR.[14]

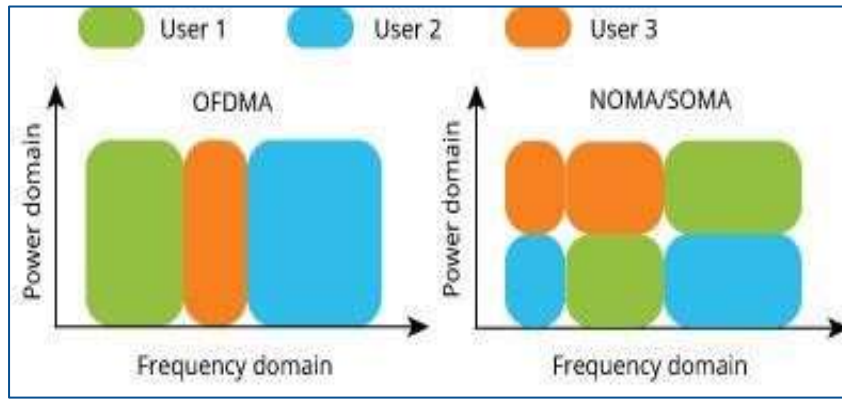


Figure II.5 : illustration de multiplexage power domain NOMA [14]

- **Small-cell** : Cette technologie consiste à installer dans les moindres espaces des zones urbaines des antennes pouvant émettre des données à très hauts débits et à courte portée. L'augmentation du trafic oblige les opérateurs de densifier leurs réseaux avec des cellules plus petites « Small-cell ».[18]

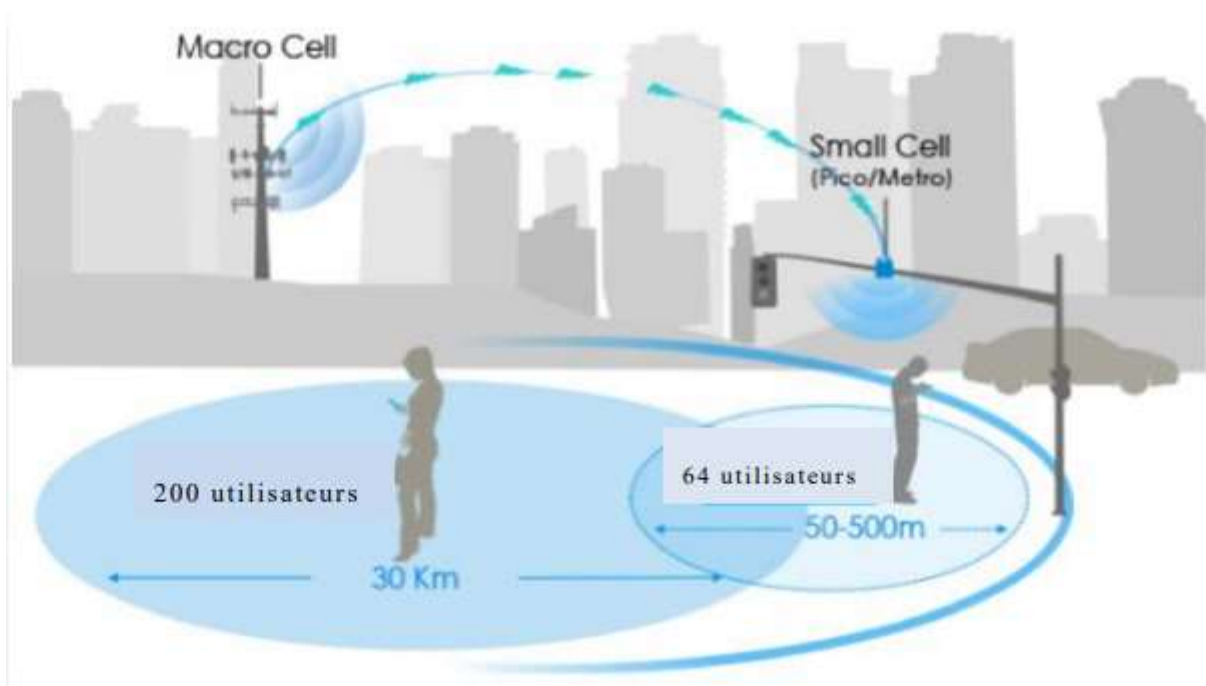


Figure II.6 : Réseau mobile sans fils illustrant la technologie des Small-cell[18]

I.2.2 – Services et défis de la 5G :

La technologie 5G doit aujourd'hui relever plusieurs défis et améliorer les performances (débit, capacité, réactivité, densité) afin de répondre aux attentes des différents utilisateurs.

I.2.2.1 - Une grande capacité :

Avec la progression du nombre d'appareils mobiles qui devraient être connectés au réseau 5G, nous nous attendons à ce que le volume de trafic soit encore plus important par rapport à ce qu'il est de nos jours. L'augmentation en capacité du réseau pourrait même atteindre plus de 1 000 fois la demande actuelle. Or pour gérer un si grand nombre de connexions, y compris la signalisation et le volume de trafic de données, des moyens techniques et matériels doivent accompagner cette évolution. Il s'agit-là d'un défi technique très important pour la 5G. Cette exigence est considérée comme la plus dure pour les réseaux 5G. [19]

I.2.2.2- Un débit plus élevé :

Etant donné que la 5G est la prochaine évolution des réseaux cellulaires, elle devrait au moins être en mesure d'offrir un débit plus élevé par rapport aux générations précédentes. Avec l'augmentation des services et des applications qui peuvent être lancées par les utilisateurs mobiles n'importe quand et n'importe où, les pics de débit seront moins significatifs. Plusieurs scénarios avec différents débits cibles devraient être étudiés.[20]

Le débit théorique validé des réseaux 5G est de 1 Tbit/s au km² et 100 Mbit/s de débit assuré pour l'utilisateur. Qui sera plus élevé que le débit offert avec la 4G : 1 Gbit/s par cellule, un débit qui est donc partagé entre les habitants couverts par cette cellule, soit en pratique aux alentours de 30Mb/s. [21]

I.2.2.3- Disponibilité, connectivité et fiabilité massives :

- Le réseau 5G doit être capable de supporter tous les cas d'utilisation qui seront intégrées au réseau cellulaire.
- Tous les composants doivent toujours trouver le moyen de se connecter au réseau.
- Le réseau 5G devrait avoir une connectivité massive permettant de prendre en charge simultanément le nombre croissant de périphériques connectés.

- Il devrait également assurer une grande fiabilité et disponibilité, en particulier dans les cas de situations critiques ou de gestion des crises.
- Dans d'autres cas tels que celui des services Cloud, le réseau devrait être disponible lorsque des ressources à la demande sont requises du côté des utilisateurs.

A cela, s'ajoute une autre exigence clé pour les réseaux 5G. Il s'agit de la robustesse. Un réseau robuste et fiable est nécessaire pour garantir la sécurité des données des utilisateurs et de l'infrastructure. Enfin, le réseau 5G deviendra la plate-forme de base des applications de gestion et de surveillance de la vie courante, telles que la surveillance et le contrôle médicale, la sécurité publique, la distribution de l'eau et du gaz et la sécurité des maisons. Ceci confirme la nécessité d'un réseau avec une grande disponibilité et une grande fiabilité [20].

I.2.2.4- Une faible latence :

La latence est le temps de réponse d'un réseau mobile dont il est important de le réduire. Certaines applications à implémenter sur les réseaux 5G nécessitent un délai très faible et estimé en millisecondes [20]. Pour les applications e -santé, par exemple, on peut citer, le cas dans un bloc opératoire, où le débit et la latence de la 5G apportent une participation considérable au développement de la télé-chirurgie. L'objectif de la 5G est fixé à une latence globale de l'ordre de 1ms. C'est à-dire une réduction en latence de 5 à 10 fois par rapport aux générations précédentes de réseaux cellulaires.

I.2.2.5- Coût réduit et efficacité énergétique plus élevée :

La consommation d'énergie des réseaux mobiles peut être vue sous deux angles différents :

- Une première perspective est liée à la consommation d'énergie du côté du réseau. C'est une façon de réduire la consommation globale d'énergie du réseau est d'accroître l'efficacité du spectre. Toutefois, et en raison de l'explosion du volume de trafic, il convient également d'accorder une attention particulière à la consommation d'énergie par bit (Joules/bit) qui a un effet direct sur l'efficacité énergétique du réseau. En outre, la performance énergétique des réseaux est un élément très important pour réduire les coûts opérationnels.
- Dans une autre perspective, la consommation d'énergie du côté des dispositifs sans fil devrait également être considérée. Une faible consommation d'énergie pour les appareils sans fil a toujours été recherchée.

Avec l'intégration de l'IoT qui pourrait inclure différents types de capteurs, la durée de vie de la batterie est très importante pour cela les dispositifs 5G devraient être en mesure de fonctionner sur une très faible consommation d'énergie, menée à la fois par une conception matérielle adéquate, des protocoles et des techniques de communication à haut rendement énergétique.[22]

I.2.3 - Pourquoi faut-il de nouvelles fréquences pour la 5G ?

Les réseaux mobiles se caractérisent par la possibilité pour les utilisateurs de connecter leurs appareils cellulaires (téléphones mobiles, *smartphones*) directement aux antennes des opérateurs par l'utilisation d'ondes radio (ou fréquences radio). L'Arcep a autorisé les opérateurs mobiles (et donc leurs clients) à utiliser des fréquences radio sur lesquelles ils font fonctionner leurs réseaux 2G, 3G et 4G.

Même si les réseaux actuels supportent l'augmentation de trafic lors de la crise sanitaire, les fréquences actuellement disponibles ne permettront pas de répondre à l'augmentation successive du trafic. Le saut de performance permis par la 5^{ème} génération accompagnée de l'attribution de nouvelles fréquences dans la bande 3,5 GHz permet de répondre à la croissance et à la diversification des usages.[23]

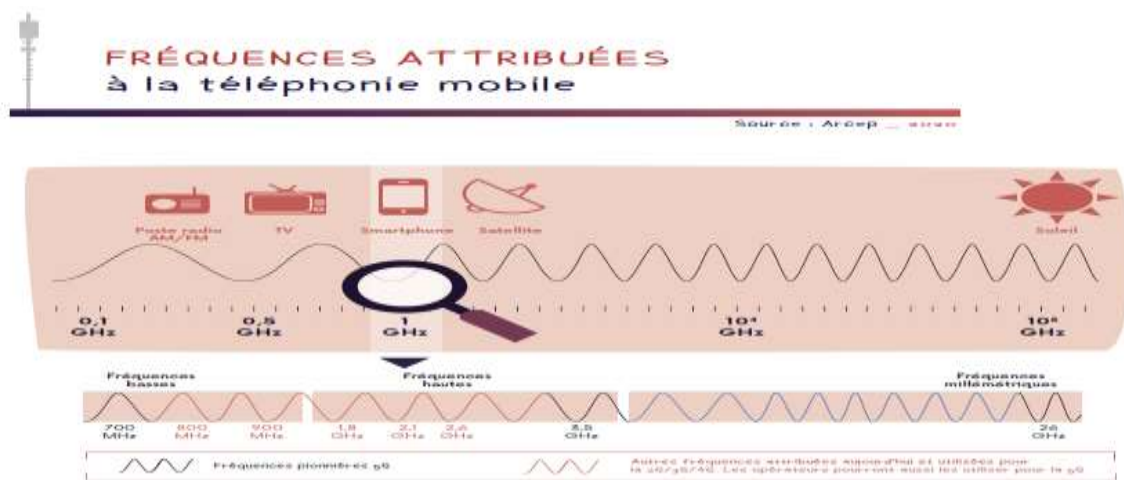


Figure II.7 : Fréquences attribuées à la téléphonie mobile. [23]

| Bande de fréquences | Services |
|---|--|
| 100 kHz – 30 MHz | Services HF (ondes courtes, moyennes et longues) |
| 30 Mhz – 87,5 Mhz (hors TV) | PMR (Réseaux radio mobiles professionnelles) |
| 87,5 Mhz – 108 Mhz, 174 Mhz – 223 Mhz | Radiodiffusion sonore (FM – RNT) |
| 108 MHz – 880 MHz (hors RNT, TV & TM), GSM R (921 – 925 Mhz) | PMR – BALISES – Objets communicants |
| 47 MHz – 68 MHz, 470 MHz – 790 MHz | TV |
| 758 MHz – 788 MHz | TM 700 (Téléphonie Mobile en bande 700MHz) |
| 791 MHz – 821 MHz | TM 800 (Téléphonie Mobile en bande 800MHz) |
| 925 MHz – 960 MHz | TM 900 |
| 960 MHz – 1710 MHz | RADARS – BALISES – FH |
| 1805 MHz – 1880 MHz | TM 1800 |
| 1880 – 1900 MHz | DECT (Téléphones sans fils domestiques numériques) |
| 2100 – 2170 MHz | TM 2100 |
| 2620 – 2690 MHz | TM 2600 |
| 2200 – 6000 MHz (hors RLAN et TM) | RADARS – BLR – FH |
| 2400 – 2483,5 MHz, 5150 – 5350 MHz, 5470 – 5725 MHz | Réseaux locaux radioélectriques ou RLAN (Wi-Fi) |

Tableau II.1 : Liste des services par bande de fréquences [3]

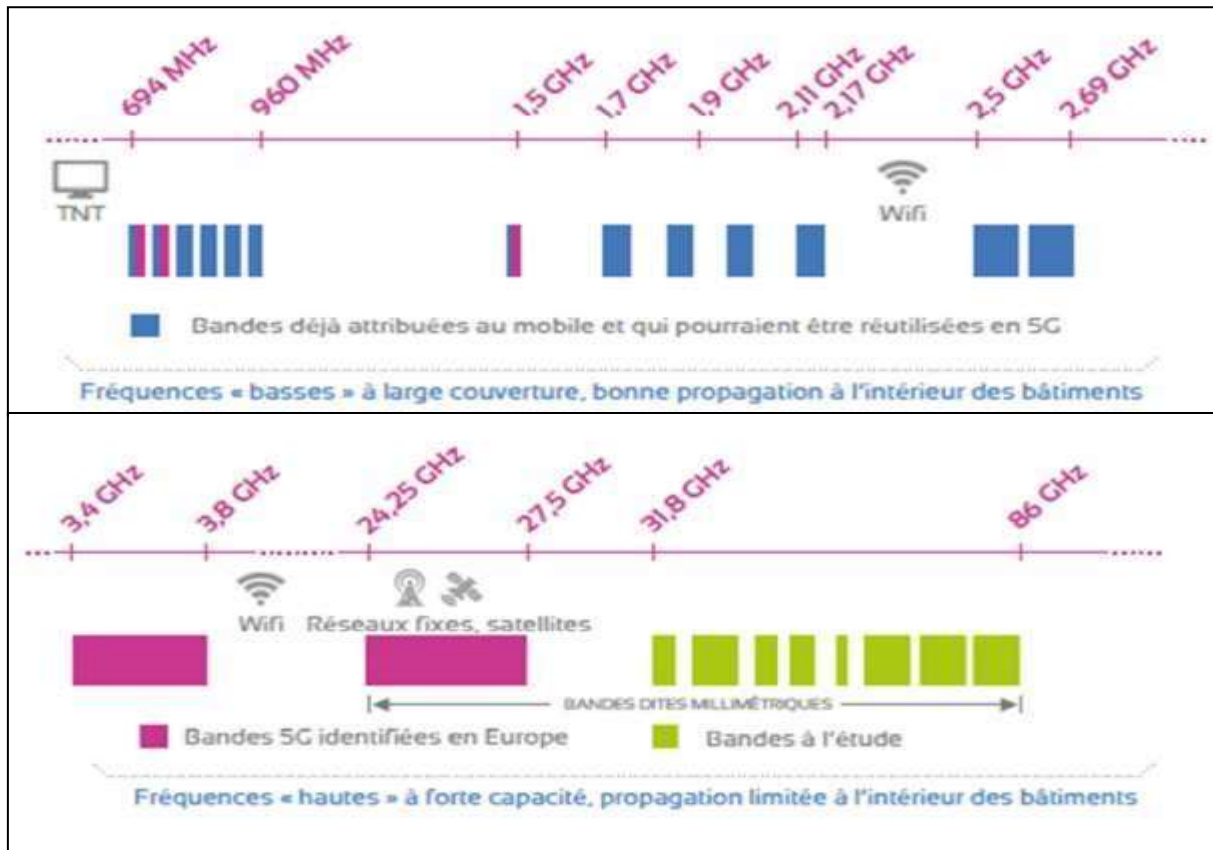


Figure II.8 : Fréquences utilisées pour la 5G [3]

Comme la 4G, la 5G utilise les bandes de fréquences basses actuellement utilisées par la 2G,3G et 4G (certes moins performantes) en plus des bandes dédiées (3,5 GHz et 26 GHz) en fonction des stratégies de déploiement des opérateurs et de la disponibilité des équipements (couple station de base/terminaux).

I.3 - Différence entre l'architecture des réseaux 4G et 5G :

Dans cette section, nous allons voir en quoi les architectures 4G et 5G diffèrent. Dans les architectures de réseau 4G LTE, les RAN LTE et les eNodeB sont généralement situés à proximité les uns des autres, souvent près de la base ou de la tour cellulaire, et fonctionnent sur du matériel dédié. En revanche, les EPC monolithiques sont souvent centralisés et éloignés de l'eNodeB. Cette architecture rend la communication de bout en bout difficile, voire impossible, avec un débit élevé et une faible latence.

Lorsque les organismes de normalisation comme le 3GPP et les fournisseurs d'infrastructures comme Nokia et Ericsson ont conçu le cœur de la nouvelle radio 5G (5G-NR), ils ont démantelé l'EPC monolithique, et chaque fonction est implémentée de manière à pouvoir être exploitée indépendamment avec du matériel de serveur commun standard.

Cela permet aux cœurs 5G de devenir des nœuds 5G décentralisés et flexibles. Par exemple, les fonctions centrales 5G peuvent désormais être colocalisées avec les applications dans un centre de données périphérique, ce qui permet de raccourcir les chemins de communication et d'améliorer la vitesse et la latence de bout en bout.

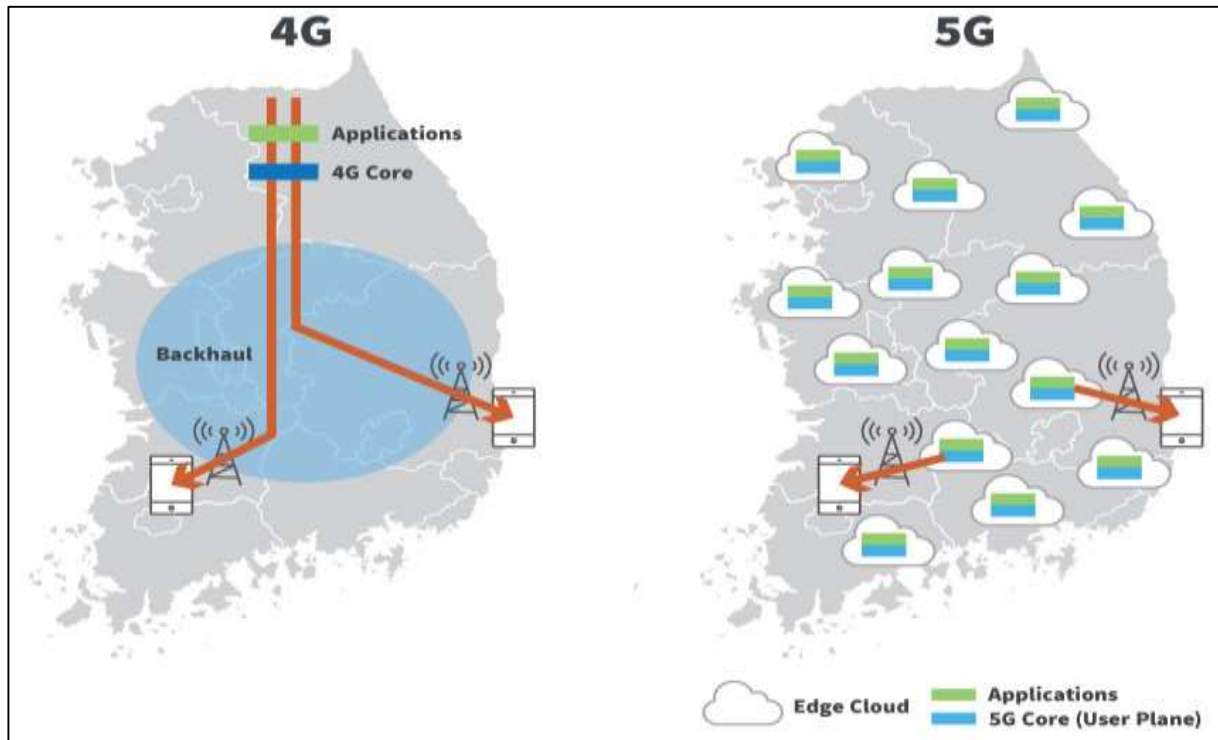


Figure II.9 : Différence entre l'architecture des réseaux 4G et 5G [24]

Un autre avantage de ces composants 5G de base plus petits et plus spécialisés exécutés sur du matériel commun est la possibilité de personnaliser le réseau grâce au découpage du réseau. Le découpage du réseau permet plusieurs "tranches" logiques de fonctionnalités optimisées pour un cas d'utilisation particulier, toutes exécutées sur un seul noyau physique au sein de l'infrastructure du réseau 5G. [24]

Il n'y a pas de différences fondamentales dans le codage et le multiplexage des signaux entre les interfaces radio 4G et 5G qui utilisent la modulation QAM. La 4G avec des paramètres optimisés et le multiplexage^E OFDMA. La radio 5G est une 4G étendue basée sur un cœur de réseau qui va à terme révolutionner et offrir une gamme de services hautement personnalisés (faible latence, Internet-des-objets-massif...

^E Le multiplexage est une technologie de télécommunication qui permet de recevoir ou de transmettre des communications téléphoniques provenant de différentes sources sur un seul canal ou de les transmettre à plusieurs destinataires. Cela peut être la fréquentiel ou le temporel.

| Spécifications | 4G | 5G |
|--|--|--|
| Libellé complet | Quatrième Génération | Cinquième Génération |
| Débit de crête | 1 Gbps (pour 4G+) | 10 Gbps |
| Largeur de bande (débit) | 2 Mbps à 1 Gbps | 1 Gbps et plus selon les besoins |
| Efficiéce spectrale | 30 b/s/Hz | 120 b/s/Hz |
| Intervalle de temps de transmission | 1 ms | variable (100 µs (min.) à 4ms (max.)) |
| Latence | 10 ms (radio) | <1 ms (radio) |
| Mobilité – vitesse maximale de déplacement à laquelle l'on peut utiliser la nG | 350 km/h | 500 km/h |
| Densité de connexion | 1 000/km ² | 1 000 000/km ² |
| Bande de fréquences | 2 à 8 GHz | 3 à 300 GHz |
| Services | Accès dynamique à l'information, appareils portables, streaming haute définition, <i>roaming</i> mondial | Accès dynamique à l'information, appareils portables, <i>streaming</i> haute définition, toute demande utilisateur |

Tableau II.2 : Différences de spécifications entre la 4G et la 5G. [25]

I.4 – ARCHITECTURE DU RÉSEAU 5G :

L'objectif principal des réseaux cellulaires des générations précédentes était simple : fournir aux utilisateurs du réseau des services de données mobiles rapides et fiables. La 5G étend cette portée en offrant une large gamme de services sans fil à l'utilisateur final sur plusieurs plateformes d'accès et via des réseaux à plusieurs couches.

La 5G est en fait un cadre dynamique, cohérent et flexible pour de multiples technologies avancées qui prennent en charge une variété d'applications. Elle utilise une architecture plus intelligente, avec des réseaux d'accès sans fil (RAN) qui ne sont plus soumis aux contraintes de proximité avec la station de base ou d'infrastructure complexe. La 5G ouvre la voie à un réseau d'accès virtuel sans fil (RAN) fragmenté et flexible avec de nouvelles interfaces pour créer des points d'accès aux données supplémentaires.

Le schéma de topologie de réseau 5G suivant montre les composants clés d'un réseau 5G :

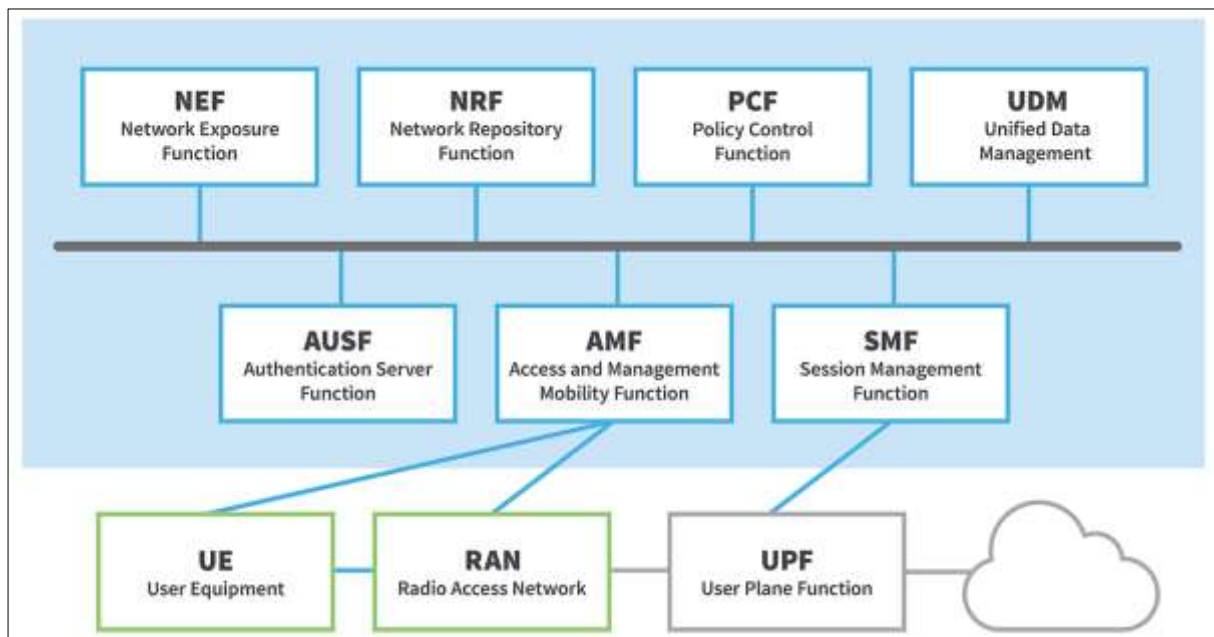


Figure II.10 : Schéma de l'architecture 5G. [24]

I.4.1 – Les différents composants d'un réseau 5G :

• Amdocs Network Exposure Function (NEF) :

- La fonction d'exposition au réseau 5G (NEF) facilite un accès sécurisé, robuste et convivial pour les développeurs aux services et capacités réseaux exposés de votre réseau 5G, permettant aux développeurs tiers et aux entreprises de créer et d'adapter leurs propres services réseau composites ou spécialisés à la demande, et vous aider à stimuler l'innovation des services avec et à travers un écosystème étendu.[26]

• Network Repository Function (NRF) :

- Le NRF est l'un des principaux composants clés de l'architecture basée sur les services 5G. Il prend en charge les mécanismes de découverte qui permettent aux éléments 5G de se découvrir et d'obtenir l'état mis à jour des éléments souhaités. En plus de maintenir les profils, il prend également en charge les fonctions de découverte de service, permettant à d'autres NF d'obtenir des informations concernant les NF disponibles qui peuvent prendre en charge des services spécifiques.[27]

• **Policy Control Function (PCF) :**

- Fournit des règles de stratégie pour la fonctionnalité du plan de contrôle. Cela comprend le découpage du réseau, l'itinérance et la gestion de la mobilité.
- Accède aux informations d'abonnement pour les décisions politiques prises par l'UDR.
- Prend en charge les nouvelles politiques de qualité de service 5G et les fonctionnalités de contrôle de charge. [28]

• **Unified Data Manager (UDM) :** est un moyen centralisé de traiter les données des utilisateurs du réseau en 5G via des interfaces Nudm. Il fournit également des services tels que l'autorisation d'accès, l'enregistrement, les services interrompus.[29]

• **Authentication Server Function (AUSF) :**

- La fonctionnalité de serveur d'authentification (AUSF) permet à l'AMF d'authentifier l'UE et d'accéder aux services de base 5G. [24]

• **Access and Mobility Management Function (AMF) :**

- La fonction de gestion de l'accès et de la mobilité (AMF) fait office de point d'entrée unique pour la connexion de l'UE. Elle est responsable du suivi et des autorisations d'accès.[24]

• **Session Management Control Function (SMF) :**

La Fonction de contrôle de gestion de session, prend en charge les éléments suivants :

- Gestion des sessions.
- Attribution et gestion des adresses IP de l'UE (y compris l'autorisation facultative).
- Sélection et contrôle de la fonction User Plane.
- Fonctionnalité d'itinérance.[30]

• **User Equipment (UE) :**

- Les équipements utilisateurs (UE), tels que les smartphones, ou les appareils cellulaires compatibles avec la 5G, se connectent via le nouveau réseau d'accès radio au cœur du réseau 5G, puis aux réseaux de données (DN), comme l'internet.[24]

• User Plane Function (UPF) :

- La fonctionnalité de plan utilisateur fait référence à l'architecture 3GPP 5G. Ceci est similaire au rôle que jouent les passerelles de services/paquets dans les systèmes 4G LTE. L'UPF prend en charge des fonctionnalités qui facilitent le fonctionnement du plan utilisateur. Les exemples incluent : le routage et le transfert de paquets, la connectivité du réseau de données, l'application des politiques et la mise en mémoire tampon des données. [31]

I.4.2 – Interfaces réseau 5G NR et types d'interface-Xn, NG, E1, F1, F2 dans la 5G :

Ce rapport sur les interfaces réseau 5G NR décrit les différentes interfaces 5G utilisées dans l'architecture 5G. Il comprend l'interface Xn, l'interface NG, l'interface E1, et l'interface F1 et l'interface F2 utilisées dans l'architecture de réseau 5G NR (New Radio). Il couvre les fonctions et les emplacements de ces interfaces NR 5G utilisées entre RAN 5G et 5GC.

Le réseau 5G NR est composé de NG RAN (Next Generation Radio Access Network) et 5GC (5G Core Network). Tel que représenté, le NG-RAN est composé de gNB (stations de base 5G) et de ng-eNB (stations de base LTE)

Il existe une interface-Xn entre ces stations de base, c'est-à-dire entre gNB-gNB, entre (gNB) (ng-eNB) et entre (ng-eNB) -(ng-eNB).

Xn est l'interface réseau entre les noeuds NG-RAN.

Xn-U signifie Xn User Plane interface et Xn-C signifie Xn Control Plane interface.

Il existe une interface GN entre 5GC et ces stations de base (c.-à-d. gNB et ng-eNB).

L'architecture globale 5G NR est représentée dans la figure ci-dessous :

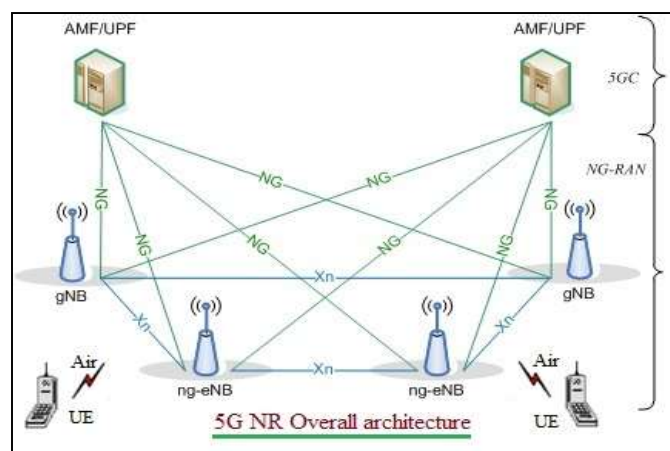


Figure II.11 : Architecture Globale 5G NR [32]

- **NG-C** : interface du plan de commande entre le NG-RAN et le 5GC.
- **NG-U** : interface de plan utilisateur entre NG-RAN et 5GC.
- **gNB** : nœud fournissant des terminaisons de protocole de plan utilisateur NR et de plan de commande vers l'UE, et connecté via l'interface NG au 5GC.

Le 5G NR (New Radio) gNB est connecté à AMF (Access and Mobility Management Function) et UPF (User Plane Function) dans 5GC (5G Core Network). Les couches de protocole sont mappées en trois unités, à savoir RRH (Remote Radio Head), DU (Distributed Unit) et CU (Central Unit).

ng-eNB : nœud fournissant des terminaisons de protocole de plan utilisateur et de plan de commande E-UTRA vers l'UE et connecté via l'interface NG au 5GC.

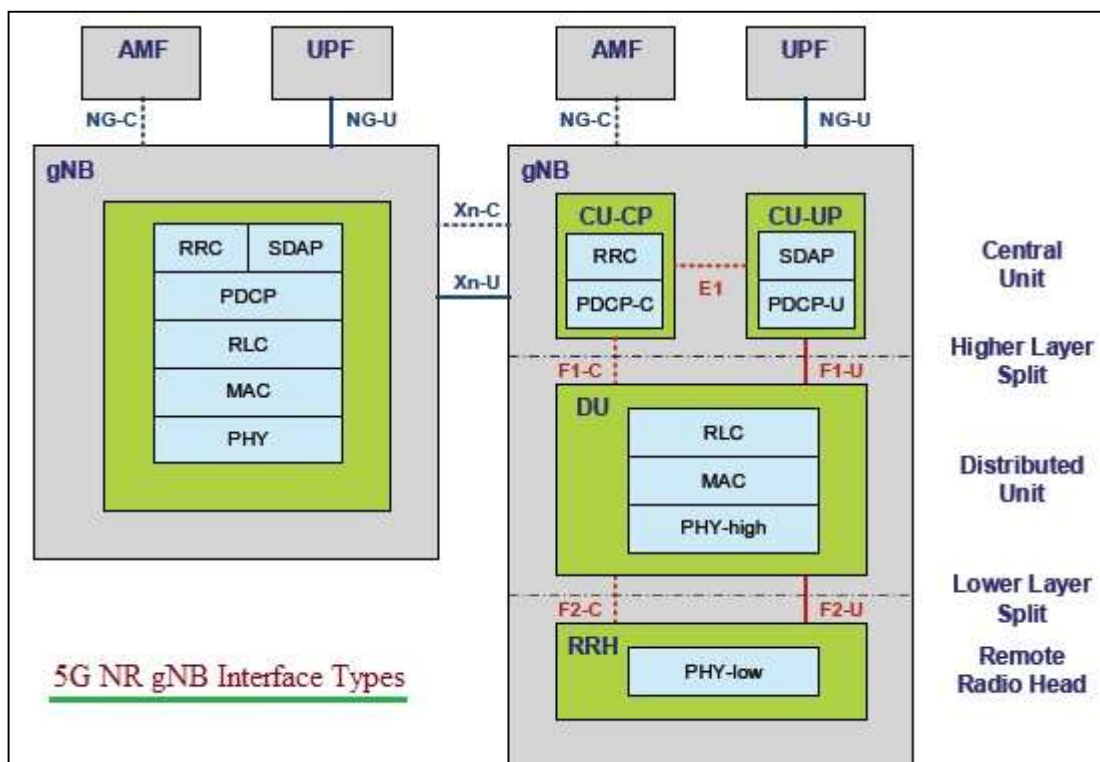


Figure II.12 : Types d'interface 5G NR gNB [32]

Il existe des interfaces plan de commande et plan utilisateur vers le réseau central 5G (5GC). Voici les emplacements et les fonctions des interfaces 5G NR :

• Interface-Xn NR 5G :

- **Lieu :** L'interface Xn est située entre les noeuds NG-RAN, à savoir gNB et ng-eNB.
- **Plan de contrôle Les fonctions sont les suivantes :**
 - Gestion de l'interface et gestion des erreurs (par exemple, installation, réinitialisation, suppression, mise à jour de la configuration)
 - Gestion de la mobilité en mode connecté (procédures de transfert, transfert d'état de numéro de séquence, récupération de contexte UE)
 - Support de la paging RAN
 - Fonctions de connectivité double (ajout de nœud secondaire, reconfiguration, modification, libération, etc.)
- **Les fonctions du plan utilisateur sont les suivantes :**
 - Transfert de données.
 - Régulation du débit.

• Interface 5G NR NG :

- **Lieu :** Entre la technologie RAN 5G et le réseau central 5G.
Le plan de commande et le plan d'utilisateur se trouvent tous deux entre eux et il y a donc deux interfaces sous l'interface NG, à savoir NG-C et NG-U.
Il est similaire aux interfaces LTE, à savoir respectivement S1-C et S1-U.
- **Fonctions et objectifs :**
 - L'interface GN prend en charge l'échange d'informations de signalisation entre GN-RAN et 5GC.
 - Il définit l'interconnexion des nœuds NG-RAN avec les AMF fournis par différents fabricants.
 - Il spécifie la séparation de la fonctionnalité de réseau radio d'interface GN et de la fonctionnalité de réseau de transport pour faciliter l'introduction de la technologie future.
- **Capacités :**
 - Les procédures d'établissement, de maintenance et de libération de la partie NG-RAN des sessions PDU.
 - Procédures pour effectuer un transfert intra-RAT et un transfert inter-RAT.
 - La séparation de chaque UE au niveau du protocole pour la gestion de la signalisation spécifique à l'utilisateur.
 - Le transfert de messages de signalisation NAS entre UE et AMF.
 - Mécanismes de réservation de ressources pour des flux de données par paquets.

• **Interface 5G NR E1 :**

• **Lieu :** D'un point de vue logique, l'interface E1 est une interface point à point entre un gNB-CU-CP et un gNB-CU-UP.

• **Fonctions :**

- L'interface-E1 prend en charge l'échange d'informations de signalisation entre les points terminaux.
- Il sépare la couche réseau radio et la couche réseau de transport.
- Il permet l'échange d'informations associées à l'UE et d'informations non associées à l'UE.

• **Interface 5G NR F1 :**

• **Lieu :** Entre gNB-CU et gNB-DU. Il est également séparé en F1-C et F1-U en fonction du plan de commande et des fonctionnalités du plan utilisateur.

• **Fonctions :**

- L'interface-F1 définit l'interconnexion d'un gNB-CU et d'un gNB-DU fournis par différents fabricants.
- Il prend en charge la séparation du plan de contrôle et du plan utilisateur.
- Il sépare la couche réseau radio et la couche réseau de transport.
- L'interface-F1 permet l'échange d'informations associées à l'UE et d'informations non associées à l'UE.

• **Interface 5G NR F2 :**

Cette interface se trouve entre les parties inférieure et supérieure de la couche physique 5G NR. Il est également séparé en F2-C et F2-U en fonction du plan de commande et des fonctionnalités du plan utilisateur. [32]

I.4.3 – LA VIRTUALISATION DE RÉSEAU :

- Contrôleur de réseau logiciel (SDN) et virtualisation du réseau (NFV) :

SDN a un plan de contrôle centralisé séparé du plan de données, tandis que NFV se compose de fonctions réseau et d'une séparation matérielle. Ce sont deux technologies différentes, mais leur combinaison effective offre une perspective spécifique sur l'utilisation des réseaux. Contrairement aux réseaux actuels, également appelés « legacy », l'architecture SDN dispose d'un plan de contrôle centralisé. C'est l'un des principaux obstacles à un déploiement effectif. Cela nécessite également un investissement initial supplémentaire, tel que le remplacement de l'équipement existant, l'acquisition et le déploiement de nouveaux équipements pouvant prendre en charge la technologie SDN. Cela permet de fournir des services à forte valeur ajoutée (équilibre de charge, routage intelligent, configuration dynamique, etc.) dans des environnements hétérogènes.

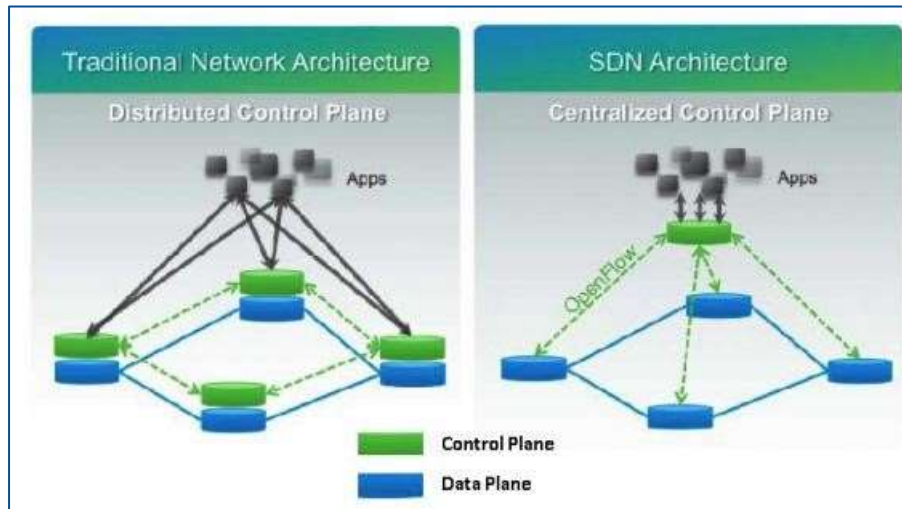


Figure II.13 : Centralisation du plan de contrôle dans un Software Defined Network[14]

- Le NFV repose sur une séparation des fonctions réseaux et du matériel sous-jacent en transférant donc le software vers une machine virtuelle par exemple. Cela est rendu possible notamment grâce aux dernières innovations sur les technologies de virtualisation. Par conséquent, les différentes fonctions réseaux peuvent être déployées sans tenir compte de leur localisation. Elles peuvent se trouver dans des « data-centers » par exemple. En outre, cela devrait permettre de réduire le surplus de coût dû à la part du matériel dans le prix d'achat d'un équipement réseau.

- **CloudRAN** : cette fonctionnalité, également connue sous le nom de centralized-RAN, nécessite une architecture réseau très différente de l'actuelle. Il s'agit d'une évolution du SDN. Les unités de traitement du signal de la station de base actuellement situées dans la station de base elle-même seront déplacées vers le cloud et centralisées. Ils communiquent avec la tête de réseau la plus proche de l'antenne à travers un réseau de fibre optique (technologie radio sur fibre). Cette centralisation offre une vue d'ensemble de toutes les stations installées et la coordination du traitement de signal et de la gestion des interférences entre les cellules et les terminaux.[14]

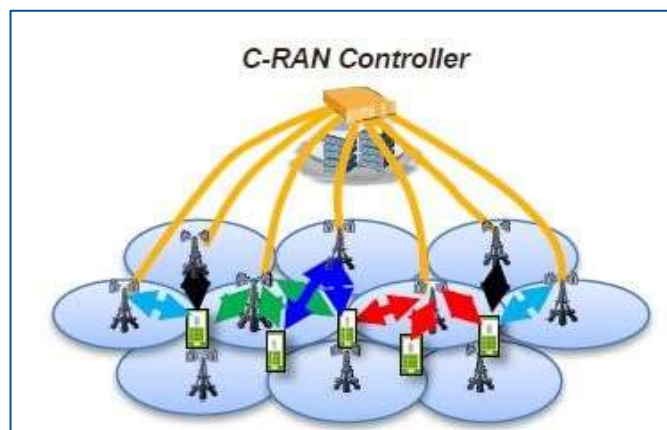


Figure II.14 : Illustration d'une architecture réseau CloudRAN[14]

- **Optimisation de la fourniture de contenus (mobile content delivery network, mobile CDN) :** Il prend en charge un ensemble de serveurs qui fonctionnent ensemble de manière transparente pour optimiser la diffusion de contenu sur un réseau sans fil (mobile ou Wi-Fi) aux utilisateurs finaux avec une disponibilité et des performances élevées. En 5G, l'objectif de ces CDN est d'amener les contenus au plus près de l'utilisateur, notamment grâce à des algorithmes prédictifs pour réduire l'encombrement et la latence du réseau.

Les opérateurs de réseau 5G ont une section optimisée pour les applications à haut débit, une autre section plus optimisée pour une faible latence et une troisième section optimisée pour un grand nombre d'appareils IoT. En fonction de ce réglage, certaines des fonctionnalités de base de la 5G peuvent ne pas être disponibles du tout. Par exemple, si vous n'utilisez que des appareils IoT, vous n'avez pas besoin des fonctionnalités vocales dont votre téléphone mobile a besoin. De plus, toutes les tranches n'ont pas besoin d'avoir exactement la même capacité, de sorte que la puissance de calcul disponible est utilisée plus efficacement.

- **MEC (mobile edge computing) :** Un autre environnement cloud de taille moyenne est MEC (Mobile Edge Computing). Le MEC est un développement ultérieur des CDN mobiles qui visent non seulement à rapprocher les données des terminaux, mais également à leur fournir une puissance de calcul accessible avec une latence très faible dans certains domaines pour les applications exigeantes.

Celui-ci recouvre un ensemble de services fournis par des data-centers que les opérateurs placent essentiellement près du bord des réseaux. Le centre de données MEC dessert tous les clients derrière des antennes 3G ou 4G et 5G.

- **Device to device:** le D2D (Device to Device) est une communication directe entre deux appareils proches qui n'ont pas besoin de passer par le réseau cellulaire. Ce type de communication n'est pas nouveau. Des technologies telles que Bluetooth et Wi-Fi Direct permettent déjà la communication D2D. Cependant, avec le déploiement des réseaux 4.9G puis 5G, une nouvelle technologie de mesh networking, sera introduite : Le LTE Direct. Ce dernier est beaucoup plus économe en énergie que les technologies précédentes, permettant une portée jusqu'à 500 mètres et des services de géolocalisation pour favoriser les échanges. Cette technologie est très utile pour les échanges V2V (Vehicle-to-Vehicle) ou V2X (Vehicle-to-Everything Communications) à faible latence, ou pour des applications régaliennes. [14]

I.5 – LE CŒUR DE RÉSEAU ÉVOLUE VERS LA 5G :

I.5.1 – INTRODUCTION :

Qu'est-ce qu'un cœur de réseau Télécom ? Pour simplifier le sujet, le réseau de télécommunications peut être décomposé en trois parties :

- **Le Réseau d'accès :** Essentiellement Radio pour la téléphonie mobile et la fibre optique (technologie Ethernet point à point ou xPON), ou la paire de cuivre pour l'accès au réseau fixe (technologie xDSL).

- **Un réseau central** qui agit comme une tour de contrôle et permet d'acheminer les appels vers leurs destinations.

- **Un système d'information (SI)** qui gère les opérations et la gestion de la relation client (factures, abonnements...).

Par conséquent, **le réseau central** est un élément important du réseau de télécommunications et se compose des fonctions clés suivantes :

- Gestion des accès et de la sécurité.
- Authentification des abonnés.
- Transfert d'appel.
- Gérer les services d'abonné.
- Contrôle de flux et sa priorisation.
- Gérer la collaboration avec d'autres réseaux.
- Contrôler la communication en cours d'appel pour assurer la continuité de l'appel, notamment lorsque l'utilisateur se déplace pour un réseau cellulaire (handover).
- Contrôle de la qualité des services.

I.5.2 – L'ÉVOLUTION DU CŒUR DE RÉSEAU :

Au fil des années de nouveaux types d'usages ont fait leur apparition. Le cœur réseau a également évolué pour mieux gérer cet afflux d'innovations. De la gestion des communications voix au Tout-IP, le cœur de réseau a été transformé pour mieux gérer les différents services attendus par les abonnés.

Par exemple, le passage de la 2G à la 3G grâce à l'introduction de l'accès à Internet pour les téléphones mobiles, puis le passage à la 4G via le haut débit, ont transformé le cœur de réseau le rendant plus efficace et plus adapté à ces nouvelles fonctionnalités. La virtualisation offre désormais aux opérateurs des opportunités d'isoler les applications logicielles de communication de l'infrastructure matérielle qui les héberge. Le réseau s'adapte de manière dynamique, optimisant les ressources et assurant la meilleure qualité de service dont vous avez besoin. Pour ce faire, utilisez le concept de « slicing ». Il consiste à diviser le réseau de l'opérateur en partitions de ressources pour créer des sous-réseaux plus efficaces. Ces nouveaux concepts préparent à la 5G.

I.5.3 – La 5G, quels impacts sur le cœur de réseau ?

La 5G va continuer à s'accélérer, mais surtout, elle pourra répondre aux besoins spécifiques de l'industrie. À cette fin, le cœur réseau continue de se développer dans la mesure où ses fonctionnalités sont divisées en micro-services. Une nouvelle interface a été introduite qui améliore considérablement les éléments suivants :

- **Latence du réseau** en rapprochant des fonctionnalités spécifiques de l'utilisateur final et en gérant la topologie selon les besoins.
- **Gestion des ressources** en sélectionnant chaque ressource en fonction des besoins et des cas d'utilisation.
- **Introduction des interfaces** standardisées vers des applications tierces pour exposer votre réseau et faciliter les échanges avec les applications « métier » industrielles.
- **La sécurité** par la mise en place de mécanismes standardisés et de modules dédiés à ces aspects clés pour ces nouvelles interactions.[33]

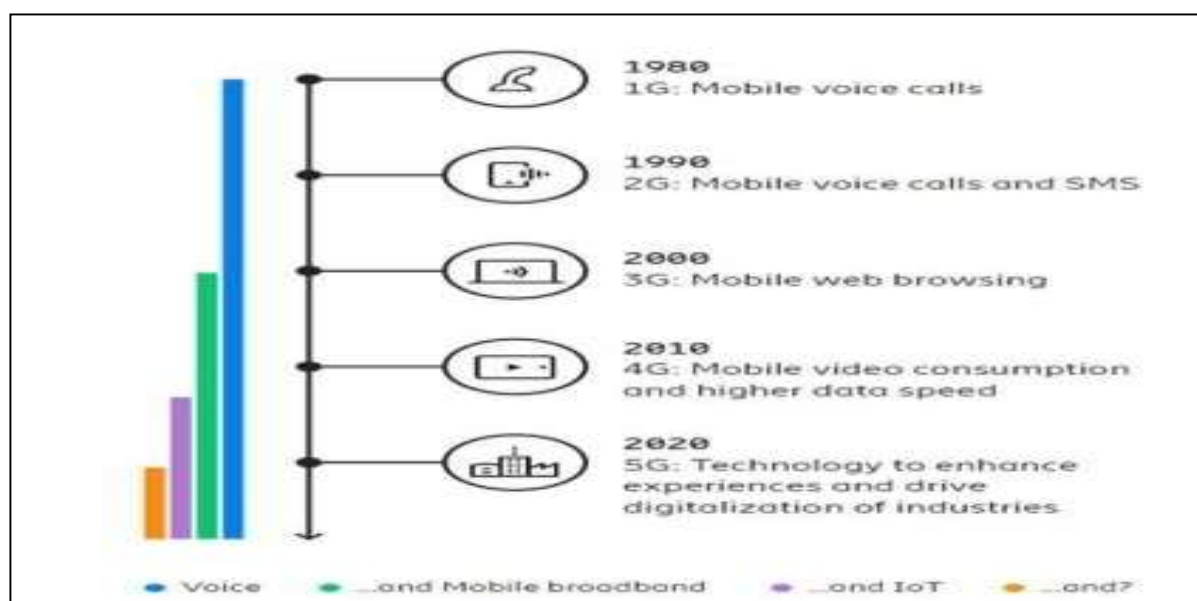


Figure II.15 : Développement du cœur réseau de la 1G à la 5G. [33]

I.6 – Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons introduit quelques généralités sur les réseaux 5G, ses technologies et services, ainsi que ses défis et exigences. Par la suite, nous avons élaboré son architecture radio C-RAN ainsi que les types d'interférences existantes dans les réseaux cellulaires.

Les recherches sur cette nouvelle génération ne cessent de s'arrêter, elles sont en évolution croissante jour après jour afin d'atteindre les exigences voulues. En occurrence, pour répondre à ces exigences et obtenir une meilleure qualité de service, une stratégie d'allocation de ressource utilisant des techniques de modulations doit être mise en œuvre, et sont présentés dans le prochain chapitre.

CHAPITRE III

Les techniques de modulation pour les réseaux mobiles 5G

III.1 - Introduction :

Dans le présent chapitre, on va présenter dans un premier temps les principales techniques de modulation utilisées dans la 5G qui sont l'OFDM (**Orthogonal Frequency Division Multiplexing**), NOMA (**Non Orthogonal Multiple Access**), et OMA (**Orthogonal Multiple Access**) en donnant pour chacune d'elles les outils théoriques, ainsi que les avantages, et les inconvénients. Une comparaison entre les différentes techniques sera également abordée.

Dans un deuxième temps, on va présenter une synthèse de quelques résultats de simulation réalisés par D. Alkama Dina et S. Berkouk de l'Université Abderrahmane Mira de Béjaia [70]. Ces résultats seront discutés en termes de performances, de débit, d'efficacité spectrale, d'équité, de nombre d'utilisateurs, et d'algorithme utilisé.

III.2 - La technologie OFDM :

L'OFDM est une technique de transmission de donnée analogique ainsi qu'une solution efficace pour lutter contre les effets des trajets multiples.

Cette technique divise la bande du système en un grand nombre de porteuse individuelles appelés sous-porteuse, ces dernières sont dites orthogonale car pour une transmission idéale, un symbole transmis sur une sous porteuse peut être démodulé sans interférence de la part des sous porteuse adjacentes.

D'un point de vue implémentation numérique, les systèmes OFDM transmettent les données par blocs : le flux original de donnée de débit R est multiplexé en N flux parallèles de débit R/N . Il s'agit bien d'un multiplexage fréquentiel puisque les données sont transmises sur N canaux différents.

Afin d'effectuer cette transmission, au lieu de transmettre les données en série comme le font les systèmes mono-porteuse, les systèmes OFDM transmettent les données par bloc en introduisant aux informations utiles de la redondance (appelée intervalle de garde qu'il faut être plus long que le délai maximal du canal multi-trajets), dont la structure cyclique permet, à l'aide de transformées de Fourier, une inversion simple (scalaire) du canal propagation.

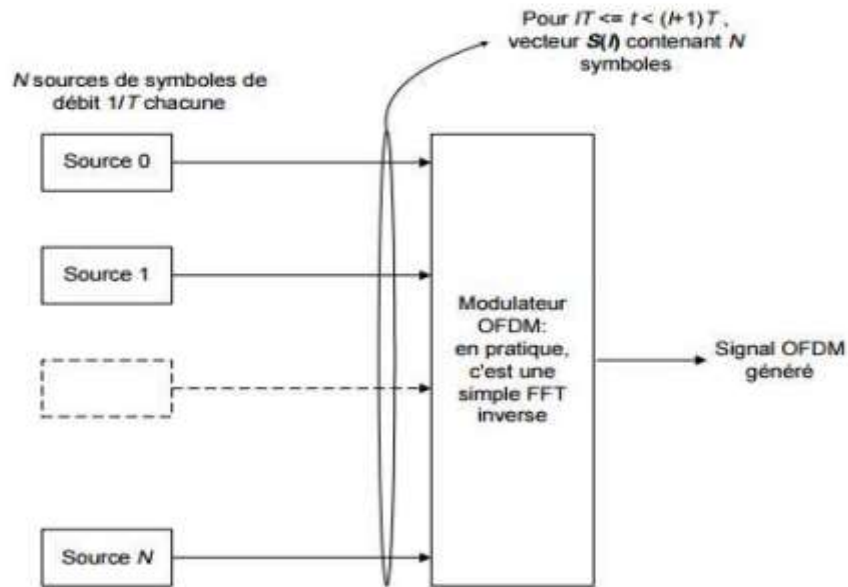


Figure III.1 : Principe de l'OFDM.[34]

III.2.1 -Principe de la modulation :

Contrairement aux systèmes mono-porteuses qui modulent sur une porteuse unique à un débit de R_s , le principe de la modulation multi-porteuse de type OFDM consiste à transmettre les données de manière simultanée sur N porteuses modulées à un débit de R_s/N . Le débit global reste inchangé mais chaque porteuse est moins sensible à l'étalement des trajets sur le canal de propagation.

La figure III.2 décrit le schéma de principe d'un modulateur OFDM en bande de base : après un codage Bit/Symboles des bits à transmettre, les symboles complexes $\{X_l\}_{l=1,2,\dots}$ sont successivement regroupés par blocs de N (conversion série/parallèle), mis en forme sur une durée T (forme d'onde $g(t)$) puis envoyés sur les N porteuses $\{f_n\}_{n=-N/2\dots N/2-1}$ afin de former le signal de sortie.

Durant l'intervalle du temps $[iT, (i+1)T]$, le signal OFDM généré s'écrit :

$$S_i(t) = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} X_{i,n} g(t - iT - \frac{T}{2}) e^{j2\pi f_n t} \quad (\text{III.1})$$

Il représente le $i^{\text{ème}}$ symbole OFDM, tandis que les $\{X_{i,n}\}_{n=-N/2 \dots N/2-1}$ représentent les N symboles complexes $\{X_i\}$ qu'il transporte.

Le signal reçu s'écrit de façon suivante :

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} X_{i,n} g\left(t - iT - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi f_n t} + n_n(t) \quad (\text{III.2})$$

où $n_n(t)$ est le bruit blanc additif gaussien introduit par le canal sur la $n^{\text{ème}}$ porteuse.

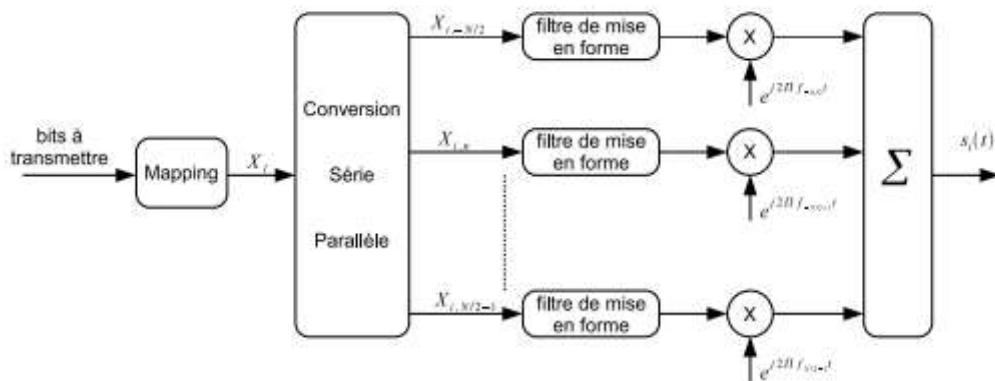


Figure III.2 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM.[35]

III.2.2 - Principe de la démodulation :

Le signal parvenu au récepteur s'écrit sur une durée symbole T_s :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})} \quad (\text{III.3})$$

$H_k(t)$ 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_s ($T_s \ll 1 \text{ Bd}$).

La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les N sous-porteuses suivant le schéma classique.

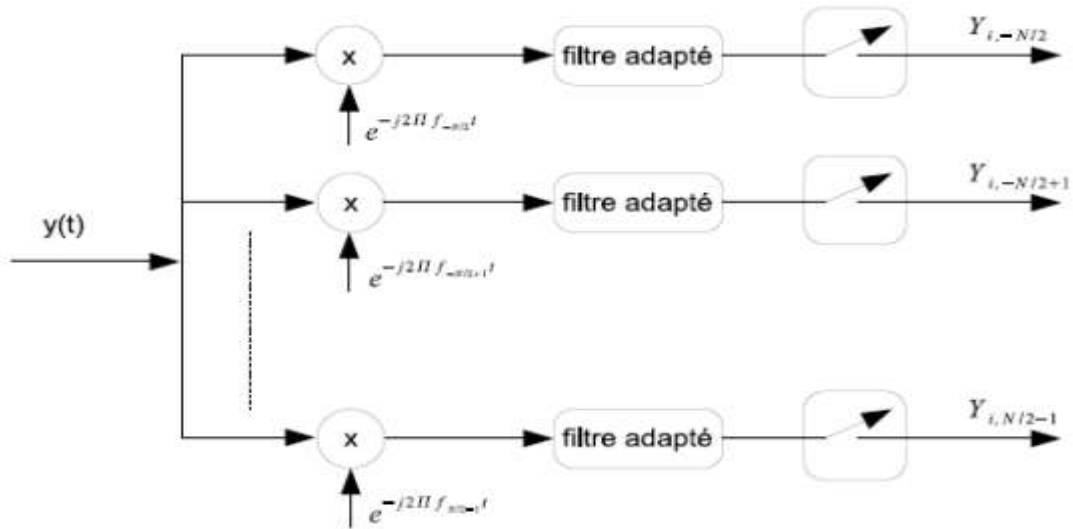


Figure III.3 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM.[36]

III.2.3 - L'Orthogonalité :

On peut percevoir la notion d'orthogonalité du signal OFDM dans le domaine fréquentiel. Chaque sous-porteuse OFDM a une réponse en fréquence sinus cardinal, $\text{sinc}(x)/x$. La forme sinus cardinal a un lobe principal étroit, avec de nombreux lobes latéraux. L'orthogonalité dans le domaine fréquentiel est réalisée lorsque le maximum de chaque sous porteuse correspond à un "zéro" des autres. Cette condition permet ainsi d'avoir une occupation spectrale idéale et d'éviter les interférences entre sous-porteuses. Le spectre total du signal OFDM est la somme des spectres individuels des différentes porteuses.[37] [38]

L'orthogonalité de deux signaux est évaluée en fonction du résultat de leur produit scalaire. Dans le cas de signaux continus, nous évaluons le produit scalaire de deux exponentielles par la formule suivante :[39]

$$\langle e^{j2\pi fkt}, e^{j2\pi ftt*} \rangle = \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T e^{j2\pi fkt} e^{-j2\pi ftt} dt \quad (\text{III.4})$$

En posant la période de chacune des exponentielles complexes comme un multiple entier d'une fréquence fondamentale de période T_{sym} (ex : $fk = k/T_{\text{sym}}$, $fi = i/T_{\text{sym}}$), l'orthogonalité (ou produit scalaire égal à 0) entre deux exponentielles est respectée lorsque l'entier k est différent de l'entier i :

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi fkt} e^{-j2\pi it} dt &= \left(\frac{1}{T_{sym}}\right) \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi\left(\frac{k}{T_{sym}}\right)t} e^{-j2\pi\left(\frac{i}{T_{sym}}\right)t} dt \\ &= \left(\frac{1}{T_{sym}}\right) \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi\left(k-\frac{i}{T_{sym}}\right)t} dt = \begin{cases} 1, & \text{si } k = i \\ 0, & \text{autres} \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

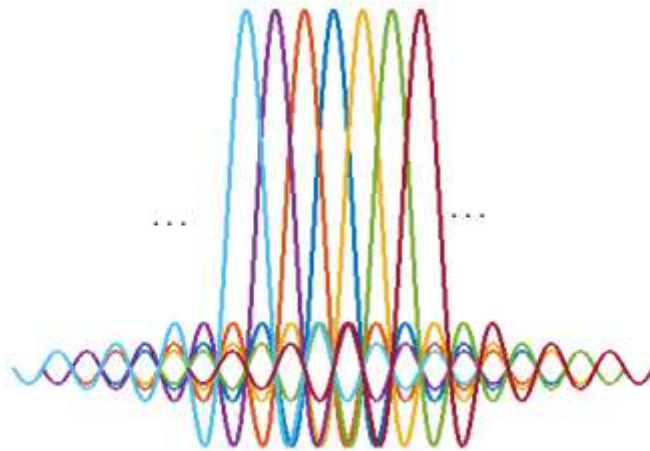


Figure III.4 : Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM.

III.2.4 - Intervalle de garde :

Les symboles subissent des échos et un symbole émis parvient au récepteur sous forme de plusieurs symboles atténués et retardés. Un symbole émis lors d'une période iTS peut se superposer à un écho provenant du symbole émis à la période $(i-1)TS$, il se produit alors des interférences.

Pour éviter ces interférences, on ajoute un intervalle de garde d'une durée T_g . Chaque symbole est précédé par une extension périodique du signal lui-même, la durée du symbole totale transmis est alors $T = T_s + T_g$. Pour que les interférences soient éliminées.

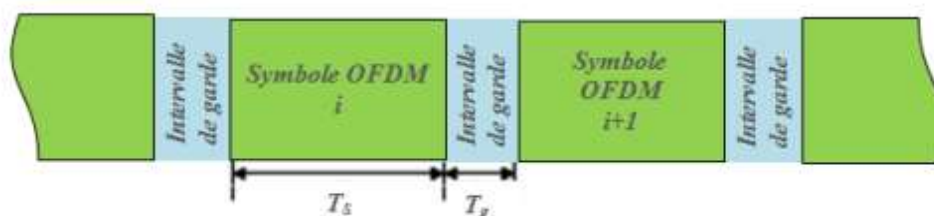


Figure III.5 : Intervalle de garde.

Il existe trois types d'intervalle de garde :

- **CP** : est une technique qui consiste à insérer une copie d'un bloc d'information à transmettre en amont de la trame. Plus clairement, il s'agit de récupérer une partie des informations à transmettre et d'insérer ces informations en début de trame appelé cyclic-prefix* (CP-OFDM) (**Figure III.6-(a)**) [40]
- **ZP** : Insérer des zéros au lieu d'intervalle de garde et aucun signal est transmise pendant l'intervalle de garde, appelé zero-padding (ZP-OFDM) (**Figure III.6-(b)**) [8]
- **KSP** : Où l'intervalle de garde est constitué de symboles pilotes, cette technique d'intervalle de garde peut être utile pour résoudre l'ambiguïté de synchronisation temporelle qui se produit avec d'autres techniques d'intervalle de garde. (**Figure III.6-(c)**) [41]

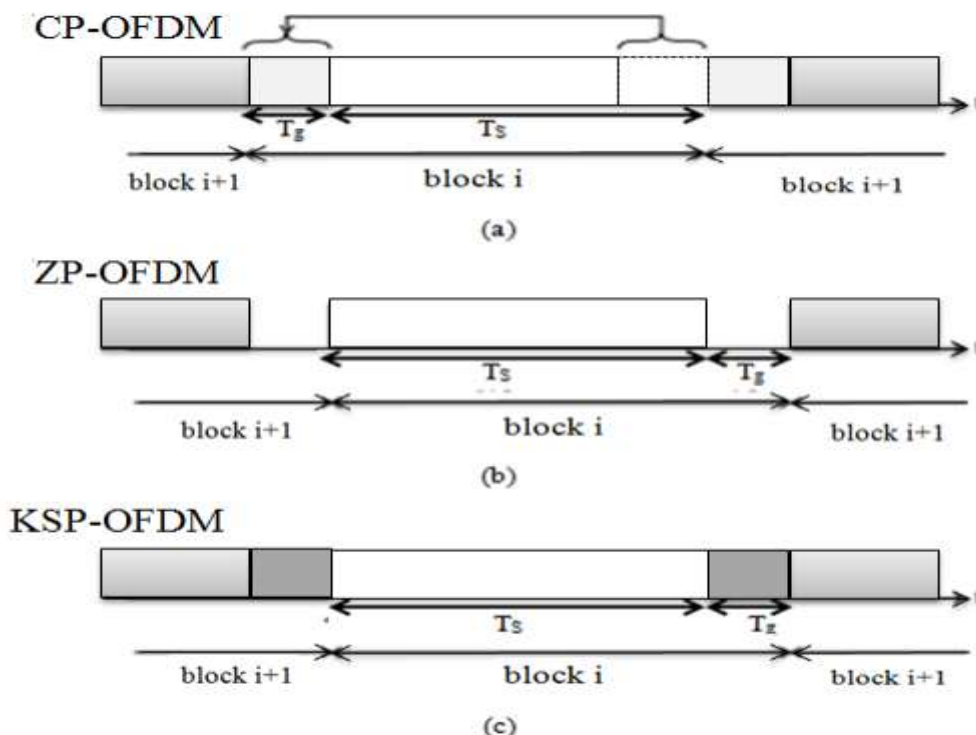


Figure III.6 : Différents intervalles de garde.

- Les deux types d'intervalles de garde couramment utilisés sont : **ZP, CP**.

***Préfix cyclique :**

Le préfixe cyclique fonctionne en copiant les derniers échantillons d'un symbole et en les plaçant au début de celui-ci. En utilisant cette technique, on garde une continuité dans le symbole. Le préfixe cyclique est une bonne méthode pour combattre les interférences entre symboles (IES) et entre porteuses (IEP). En raison de cette extension, la période du symbole est plus longue. Précisons que bien que la période soit plus longue, Cela n'a aucun incident sur le spectre fréquentiel du signal. Aussi longtemps que le bon nombre d'échantillons est pris en réception n'importe où dans le symbole rallongé. L'orthogonalité est maintenue et des interférences éliminées.[42]

$$T_M = T_B + T_{CP} \quad (3.5)$$

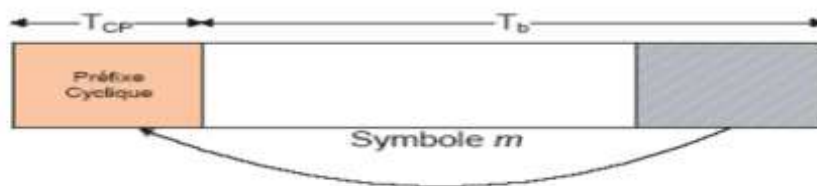


Figure III.7 : Insertion de préfixe cyclique (PC)

III.2.5 - Avantages et inconvénients du système OFDM :

III.2.5.1 - Les avantages :

- Utilisation optimale de la bande de fréquence allouée par orthogonalisation des porteuses.
- Permet de s'affranchir des multi-trajets en liant les éléments statistiquement indépendants.
- La multiplicité de la modulation est basée sur un algorithme bien connu et peu complexe : la FFT.

- La diminution des taux de transmission et l'ajout de préfixes cycliques permettent d'éliminer ou de limiter l'interférence inter symboles et de simplifier l'égalisation au récepteur.
- Les effets des parcours multiples dû aux évanouissements sélectifs en fréquence sont réduits en divisant le spectre en N sous porteuses ayant des évanouissements plats.
- Récupérer l'information transmise même si plusieurs échos ont affecté la transmission radioélectrique.[43]

III.2.5.2 - Les inconvénients :

- L'OFDM est sensible au décalage fréquentiel qui peut causer une perte d'orthogonalité entre les sous-porteuses. [43]
- L'OFDM est très sensible aux erreurs de synchronisation fréquentielle et temporelle. La source d'erreur de synchronisation fréquentielle est, d'une part, la différence entre les fréquences des oscillateurs locaux dans l'émetteur et le récepteur. D'autre part, l'étalement Doppler à cause de la mobilité de l'émetteur et du récepteur. Pour optimiser les performances d'une liaison OFDM, une synchronisation minutieuse doit être maintenue au niveau symbole, fréquences porteuses et fréquence d'échantillonnage.[44] [45]
- L'OFDM est sensible aux non linéarités des amplificateurs. Le signal peut présenter un PAPR* (Peak to Average Power Ratio) très élevé, engendrant la saturation des blocs analogiques. [43]

***Le PAPR** (Peak to Average Power Ratio), est proportionnel au nombre des sous porteuses utilisées dans un système OFDM. Un PAPR important rend complexe l'implémentation des convertisseurs Analogique/Numérique (DAC et DCA). De même, la conception des amplificateurs RF devient difficile si le PAPR augmente. Pour réduire le PAPR, les techniques de fenêtrage et les techniques d'annulation de crête peuvent être utilisées. [46]

III.3 - Le système OFDMA :

Pour l'accès multiple, l'OFDM peut être combinée avec TDMA, FDMA et CDMA. La combinaison avec FDMA mène au système OFDMA. Le système OFDMA est une version multi utilisateur du système OFDM, et tout ce qui a été mentionné précédemment à propos du système OFDM est également valable pour le système OFDMA. Dans un système OFDMA, on donne à chaque utilisateur certaines sous-porteuses pendant un certain temps pour communiquer. Un des problèmes majeurs de système OFDMA est la synchronisation dans la voie montante, parce que chaque utilisateur doit transmettre sa trame et évite d'interférer avec les autres utilisateurs. Le système OFDMA pour les communications mobiles a été proposé dans Les **Figures III.8 et III.9** représentent successivement les schémas synoptiques du système OFDMA en émission puis en réception. [47-48]

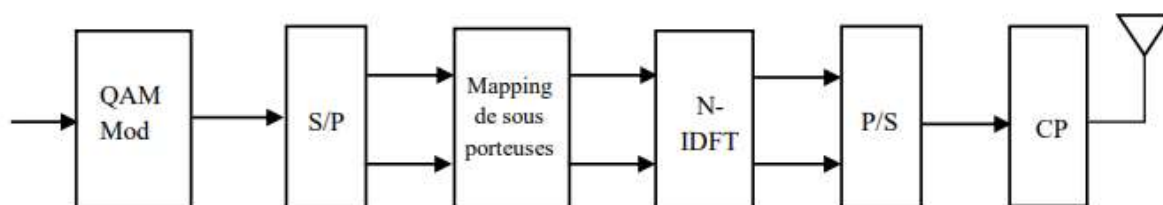


Figure III.8 : Schéma bloc d'émission OFDMA.

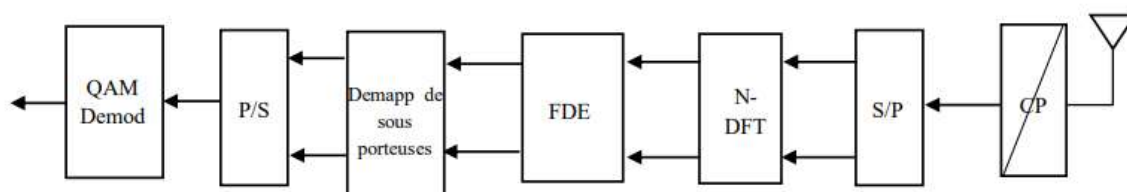


Figure III.9 : Schéma bloc du récepteur OFDMA.

III.3.1 - De l'OFDMA à NOMA :

Malgré tous les avantages que l'OFDMA apporte à un système, elle ne permet pas la réutilisation des fréquences au sein d'une cellule, car une sous-porteuse dans une cellule OFDMA est allouée à un seul utilisateur, ce qui limite le débit cellulaire. Contrairement à la technique d'accès NOMA qui permet à plusieurs utilisateurs de partager la sous-porteuse en même temps au sein d'une cellule, ce qui offre un débit et une équité plus élevés.[49]

NOMA consiste à exploiter un nouveau domaine de multiplexage utilisateur, le domaine de la puissance, en avantage de la différence de gain de canal entre les utilisateurs appariés sur la même sous-porteuse [50]. Cependant, la conception d'un ordonnanceur appliquant un multiplexage non orthogonal doit être soigneusement adressé pour permettre une exploitation complète des potentiels NOMA [51].

III.4 - Orthogonal Multiple Access (OMA) :

Les systèmes conventionnels d'accès multiple orthogonal OMA (Orthogonal Multiple Access), par exemple TDMA (Time Division Multiple Access), CDMA (Code Division Multiple Access) et OFDMA, ne peuvent pas supporter un grand nombre d'appareils mobiles pour les générations 5G et 6G, parce qu'il est prévu que d'ici 2030, le nombre d'appareils mobiles dans le monde atteindra plus de 125 milliards [52].

III.5 - Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) :

III.5.1 - Introduction :

Ces dernières années, les schémas d'accès multiple non orthogonal (NOMA) ont reçu une attention particulière pour les réseaux cellulaires de cinquième génération (5G). [53] [54]. La principale raison de l'adoption de NOMA dans la 5G est sa capacité à servir plusieurs utilisateurs en utilisant les mêmes ressources de temps et de fréquence.

Il existe deux techniques NOMA principales : **le domaine de puissance** et **le domaine de code**. Le NOMA de domaine de puissance atteint le multiplexage dans le domaine de puissance, tandis que le NOMA de domaine de code atteint le multiplexage dans le domaine de code.

NOMA exploite le codage de superposition au niveau de l'émetteur et l'annulation successive des interférences (SIC) au niveau du récepteur, multiplexant ainsi les utilisateurs dans le domaine de puissance. Comme le montre la Figure, la station de base (BS) envoie les signaux superposés à deux utilisateurs, où l'utilisateur 1 a un gain de canal plus élevé que l'utilisateur 2. Dans NOMA, l'utilisateur avec un gain de canal plus élevé et l'utilisateur avec un gain de canal plus faible sont généralement appelés respectivement utilisateur fort et utilisateur faible.

L'utilisateur fort soustrait d'abord le signal de l'utilisateur faible via SIC, puis décode son propre signal ; l'utilisateur faible considère le signal de l'utilisateur fort comme du bruit et détecte directement son propre signal. Avec un gain de canal plus faible et plus d'interférences, l'utilisateur faible se voit attribuer plus de puissance dans NOMA pour garantir l'équité.

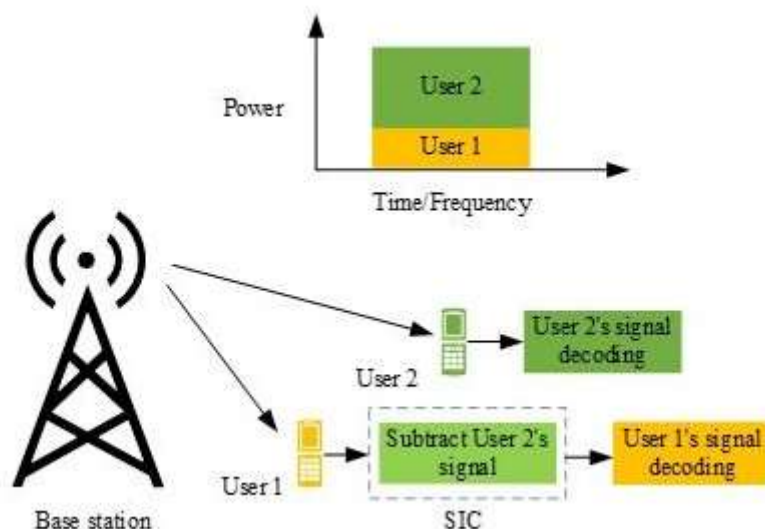


Figure III.10 : Liaison descendante NOMA dans une seule cellule avec une station de base et deux utilisateurs.

En liaison descendante, NOMA utilise un mécanisme d'allocation de puissance où des puissances de transmission élevées sont utilisées pour les utilisateurs avec de mauvaises conditions de canal et vice versa [55]. En effet, les utilisateurs peuvent être servis par la BS en même temps/code/fréquence, mais avec un niveau de puissance différent. Cependant, les signaux de message de forte puissance provoquent des signaux parasites forts. [56]

III.5.2 - Qu'est-ce-que l'accès multiple non orthogonal (NOMA) ?

Accès Multiple Non Orthogonal NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) Le système a été récemment proposé comme technique d'accès multiple candidate pour les systèmes 5G et au-delà 5G par 3GPP (3G Partnership Project) dans différentes applications en raison d'augmenter la capacité du système [57]. La stratégie d'accès multiple non orthogonal (NOMA) peut prendre en charge plusieurs utilisateurs dans le même bloc de ressources (temps / fréquence / code), en utilisant un codage de superposition dans le domaine de la puissance. Dans les récepteurs, plusieurs utilisateurs peuvent être distingués les uns des autres en exploitant l'annulation d'interférence successive (SIC) comme il est déjà mentionné.

Ce système a suscité un grand intérêt en tant que technique permettant d'augmenter le nombre d'utilisateurs pouvant être desservis simultanément en programmant plusieurs utilisateurs sur les mêmes ressources spectrales mais à des niveaux de puissance différents, ce qui fait de NOMA un système d'accès prometteur dans les systèmes 5G et au-delà. [58].

III.5.3 - Paramètres d'évaluation et état de la normalisation :

- Saito et al ont découvert pour la première fois le potentiel de NOMA pour les réseaux cellulaires 5G [59] et a démontré que NOMA surpasse OMA en termes de capacité et d'équité pour l'utilisateur. Depuis lors, des chercheurs du monde entier ont commencé à étudier comment le concept NOMA peut être transformé en technologies d'accès sans fil de prochaine génération. La plupart des travaux initiaux sur NOMA se sont concentrés sur l'entrée unique et la sortie unique (SISO), dans laquelle l'allocation de puissance et l'équité des utilisateurs sont les principales préoccupations. L'allocation de puissance dans NOMA ne vise pas uniquement à maximiser le débit total, mais considère le débit total et l'équité pour les utilisateurs dans leur ensemble. En effet, NOMA attribuera toute la puissance à l'utilisateur fort si l'objectif est de maximiser le débit total, et n'offre donc aucun gain par rapport à OMA. Les performances de NOMA peuvent être encore améliorées en l'associant à la technologie multi-entrées multi-sorties (MIMO). Dans MIMO-NOMA, les utilisateurs sont jumelés en clusters et NOMA est appliqué uniquement parmi les utilisateurs du même cluster. Il n'est pas trivial d'obtenir l'appariement optimal des utilisateurs, puisqu'une recherche exhaustive est nécessaire. Une fois les utilisateurs appariés en clusters, un vecteur de pré-codage commun est partagé par les utilisateurs du même cluster, ce qui transforme le canal MIMO en plusieurs canaux SISO parallèles. En conséquence, la supériorité de NOMA sur OMA tient toujours [60].

- Il existe une explosion d'activité liée à divers schémas d'accès multiples non orthogonaux pour la 5G cellulaire, ce qui enthousiasme les principaux acteurs de l'industrie du sans fil. NOMA est inclus dans divers livres blancs sur la 5G, y compris ceux de ZTE Corporation, SK Telecom et Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS) consortium.

Dans le cadre de la vision 5G, DOCOMO et MediaTek recherchent conjointement pour combiner les technologies NOMA de DOCOMO avec les technologies d'annulation des interférences multi-utilisateurs de MediaTek[61]. La méthode d'accès multiple non orthogonal a une activité de normalisation notable. NOMA est inclus dans l'enquête sur la transmission superposée multi-utilisateurs en liaison descendante LTE par la version 13 du projet de partenariat de 3e génération (3GPP).

NOMA a également été pris en compte dans l'étude initiale portant sur la nouvelle radio 5G (NR) de la version 14, qui reconnaissait que la 5G NR devrait envisager au moins des schémas d'accès multiples non orthogonaux en liaison montante, en particulier pour les communications massives de type machine. En outre, l'étude des schémas d'accès multiples non orthogonaux pour la 5G NR, y compris NOMA, se poursuivra dans la version 15 [62]. Ces enquêtes incluent des collaborations entre divers fournisseurs majeurs tels que DoCoMo, Huawei, Intel et Samsung.

III.5.4 - Domaines de puissance NOMA :

Dans cette méthode, tous les clients se voient attribuer différents niveaux de puissance en fonction de leur distance par rapport à la station de base telle que l'utilisateur proche (CSI Channel State Information) (CSI fort) est avec une faible puissance et un utilisateur éloigné (CSI médiocre) avec une puissance élevée [63].

Tous ces utilisateurs sont superposés et transmis à l'air. Les données des utilisateurs dans le signal superposé sont décodées au niveau du récepteur en fonction de leur niveau de puissance en atténuant le bruit appelé successivement technique d'annulation des interférences successives (SIC).

Par conséquent, le domaine de puissance NOMA nécessite un émetteur et un récepteur de grande complexité pour éviter complètement le bruit. Le domaine d'alimentation NOMA est plus utile pour plusieurs usagers car ils utilisent les mêmes ressources. à mesure que le nombre d'utilisateurs augmente, la conception devient plus complexe et les performances du domaine de puissance NOMA se détériorent. Par conséquent, un mécanisme d'allocation de puissance est essentiel pour appliquer le domaine de puissance NOMA. [64], ils ont proposé une méthode utilisant des méthodes d'optimisation de la puissance pour maximiser la capacité ergodique et ont prouvé une amélioration significative des performances avec NOMA par rapport aux techniques OMA [65]

et ont proposé une méthode de détection et de pré-codage des utilisateurs du domaine de puissance pour déterminer les problèmes soulevés par le système MIMO-NOMA (multiple-input, multiple-output).

Inspiré de la radio cognitive, NOMA permet aux utilisateurs sans licence d'utiliser les ressources des utilisateurs sous licence si elles sont gratuites. L'interférence entre eux est si faible en raison de leurs conditions de canal que l'efficacité spectrale et l'efficacité énergétique peuvent être améliorées [66].

III.5.5 - Domaines de code NOMA :

L'utilisation des codes gaussiens provient de Détection de compression CS (Compressive Sensing) théorie. Dans la théorie CS, un signal initial de dimension N est projeté dans un nouveau signal composé de très peu (k) composantes non nulles parmi N , appelé signal k -clairsemé (ou ayant un niveau de parcimonie k).

L'ensemble des indices de ces k composantes constitue le modèle de parcimonie. On reconstruit alors cette version du signal à partir de seulement m mesures obtenues par un $m \times N$ matrice de mesure avec $m < N$. Ce problème sous-déterminé peut être résolu grâce à un algorithme qui effectue une minimisation l_1 ou une approximation creuse.

La réduction dimensionnelle du signal observé (de N à m) donne la caractéristique de compression à cette technique de détection. Le but du récepteur est de détecter les nœuds actifs inconnus plutôt que de récupérer la valeur réelle du vecteur de signal [67]. Il introduit un cadre dédié à la détection-estimation simultanée. De même, chaque nœud n 'est associé qu'à un unique i.i.d. vecteur normalisé codage gaussien complexe C ou matrice normalisée en colonne, qui sert à encoder les données qui désigne un message codé.

Pour le cas général :

$$X_n = C_n S_n \quad (III.6)$$

Le signal reçu est alors :

$$Y = \sqrt{\rho_0} \sum_{n=1}^{N_q} h_n (C_n S_n)^T + Z \quad (III.7)$$

(Pour $d = 1$, l'équation III.7 se réduit à Cs et s peut être considéré comme un bit de notification d'activité.).

III.5.6 - Avantages du NOMA :

NOMA domine l'accès multiple orthogonal conventionnel (OMA) sous plusieurs aspects, tels que :

- 1) Il atteint une efficacité spectrale supérieure en desservant plusieurs utilisateurs en même temps et avec la même ressource de fréquence, et en atténuant les interférences via SIC.
- 2) Il augmente le nombre d'utilisateurs desservis simultanément et peut donc prendre en charge une connectivité massive.
- 3) En raison de la nature de la transmission simultanée, un utilisateur n'a pas besoin de passer par un créneau horaire programmé pour transmettre ses informations et, par conséquent, il subit une latence plus faible.
- 4) NOMA peut maintenir l'équité pour les utilisateurs et une qualité de service diversifiée grâce à un contrôle de puissance flexible entre les utilisateurs forts et faibles. En particulier, comme plus de puissance est allouée à un utilisateur faible, NOMA offre un débit plus élevé en périphérie de cellule et améliore ainsi l'expérience utilisateur en périphérie de cellule.
- 5) Efficacité spectrale et débit : en OMA, comme en OFDMA, chaque utilisateur se voit attribuer une ressource de fréquence spécifique même s'il connaît un état de canal bon ou mauvais. Par conséquent, le système global souffre d'une faible efficacité spectrale et d'un faible débit. Au contraire, dans NOMA, la même ressource de fréquence est attribuée à plusieurs utilisateurs mobiles avec de bonnes et de mauvaises conditions de canal en même temps. Par conséquent, la ressource affectée à l'utilisateur faible est également utilisée par l'utilisateur fort, et l'interférence peut être atténuée par des processus SIC dans les récepteurs des utilisateurs. Ainsi, la possibilité d'améliorer l'efficacité spectrale et le débit élevé sera considérablement augmentée.
- 6) Équité pour l'utilisateur, faible latence et connectivité massive : en OMA, par exemple en OFDMA avec planification, l'utilisateur avec un bon statut de canal à une priorité plus élevée à donner lorsque l'utilisateur est dans un mauvais statut de canal doit attendre l'accès, ce qui conduit à un problème d'équité et une latence élevée. Cette approche ne peut pas supporter une communication massive. Cependant, NOMA peut servir simultanément plusieurs utilisateurs avec différentes conditions de canal. Ainsi, il peut offrir une meilleure équité aux utilisateurs, moins de latence et une connectivité massive plus élevée.

NOMA est également compatible avec les systèmes de communication actuels et futurs car il ne nécessite pas de modifications importantes sur l'architecture existante. Par exemple, NOMA a été inclus dans le projet de partenariat de troisième génération à évolution à long terme avancé (3GPP LTE version 13).[68]

III.5.7 - Limites du NOMA :

Diverses limitations et problèmes de mise en œuvre doivent être résolus pour exploiter pleinement les avantages de NOMA, tels que :

1) Chaque utilisateur doit décoder les informations de tous les autres utilisateurs avec des gains de canal inférieurs (qui sont dans le même cluster) avant de décoder les siens informations [52], entraînant une complexité du récepteur et une consommation d'énergie supplémentaires par rapport à l'OMA ;

2) Lorsqu'une erreur se produit dans SIC chez un utilisateur, le décodage ultérieur de toutes les informations des autres utilisateurs sera probablement effectué de manière erronée. Cela implique de maintenir le nombre d'utilisateurs dans chaque cluster à un niveau raisonnablement bas pour réduire l'effet de la propagation des erreurs ;

3) Pour obtenir les avantages revendiqués du multiplexage dans le domaine de puissance, une différence considérable de gain de canal entre les utilisateurs forts et faibles est nécessaire. Cela limite intuitivement le nombre effectif de paires d'utilisateurs, ce qui réduit à son tour le gain de débit total de NOMA ;

4) Chaque utilisateur doit renvoyer ses informations de gain de canal à la BS, et NOMA est intrinsèquement sensible à l'incertitude dans la mesure de ce gain [54].

III.6 - Comparaison entre NOMA et OMA :

Dans OMA, chaque utilisateur peut exploiter des ressources de communication orthogonales dans un intervalle de temps, une bande de fréquences ou un code spécifique afin d'éviter des interférences d'accès multiples. Les générations précédentes de réseaux ont utilisé des schémas OMA, tels que l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA) de 1G, ou par répartition dans le temps (TDMA) de 2G, ou par répartition en code (CDMA) de la 3G et par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) de la 4G. Dans NOMA, plusieurs utilisateurs peuvent utiliser simultanément des ressources non orthogonales en fournissant une efficacité spectrale élevée tout en permettant un certain degré d'interférence d'accès multiple au niveau du récepteur.

En général, les schémas NOMA peuvent être divisés en deux types : le multiplexage de domaine de la puissance et le multiplexage de domaine du code. En outre, il existe d'autres schémas NOMA tels que l'accès multiple par division de motifs (PDMA) et le multiplexage par répartition binaire (BDM).

Le multiplexage de domaine de la puissance est facile à mettre en œuvre car des changements considérables ne sont pas nécessaires sur les réseaux existants. Il ne nécessite pas de bande passante supplémentaire pour améliorer l'efficacité spectrale. D'autre part, Le multiplexage dans le domaine du code a le potentiel d'améliorer l'efficacité spectrale. Et aussi il nécessite une bande passante de transmission élevée et n'est pas facilement applicable aux systèmes actuels. [68]

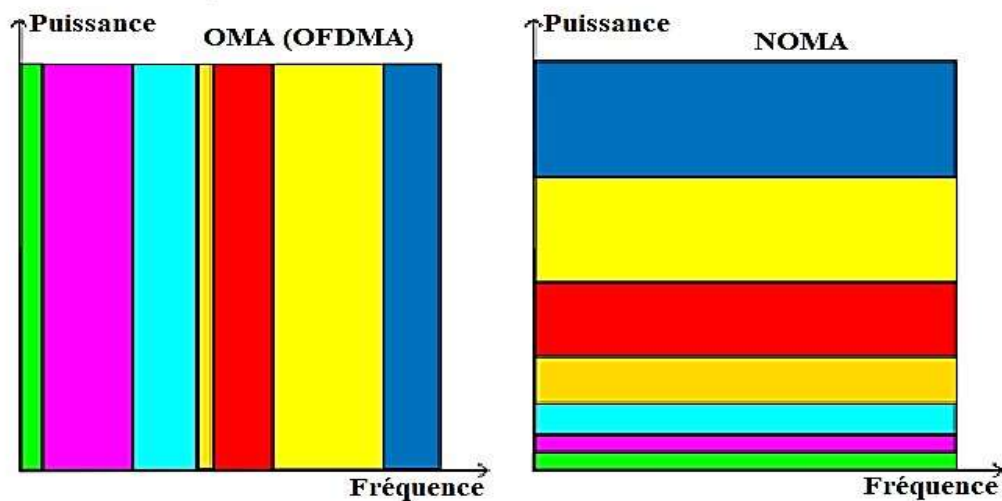


Figure III.11 : Une comparaison imagée de la OMA et NOMA[68].

III.7 – Interprétation des résultats :

III.7.1 – Introduction :

Dans cette deuxième partie du présent chapitre, on va présenter une synthèse de quelques résultats de simulation réalisés par D. Alkama Dina et S. Berkouk de l'Université Abderrahmane Mira de Béjaia [70]. Ces résultats seront discutés en termes de performances, de débit, d'efficacité spectrale, d'équité, de nombre d'utilisateurs, et d'algorithme utilisé.

III.7.2 - Algorithme PSO-PFS :

Pour une allocation optimale des ressources, la base la station collecte des informations de localisation mobile, si les utilisateurs d'une cellule sectorielle sont répartis en critiques les emplacements avec un faible SINR ne peuvent pas obtenir une bonne qualité de service.

L'idée dans cet article, nous proposer un nouveau programme d'allocation des ressources dans une cellule tri sectorielle basée sur la localisation des mobiles, canal conditions des utilisateurs et leurs demandes. Ce nouveau programme combine un algorithme évolutif et l'ordonnancement équitable proportionnel. Hybridation entre PSO et PSF permet un partage favorable des ressources pour les utilisateurs dans des endroits critiques.

Cependant, l'optimisation des essaims de particules (PSO) politique est adaptée pour améliorer les performances de l'équité proportionnelle qui intègre un ensemble de contraintes dans le problème d'optimisation.[69]

III.7.3- Paramètres de simulation :

Les paramètres du système utilisés par les chercheurs sont résumés dans le **Tableau III.1** :

| Paramètres | Valeurs |
|--|----------------------------|
| Bande de fréquence du système | 20 MHz |
| Largeur de la sous-porteuse | 3.6 GHz |
| Nombre de sous-porteuses | 1200 |
| Nombre de cellule | 1 cellule tri-sectorielle |
| Rayon de la cellule | 1Km |
| Type d'antennes | Antennes sectorielles |
| Nombre de secteurs | 3 secteurs |
| Nombre d'utilisateurs dans la cellule | 20,40,60,80,100 |
| Vitesse de l'utilisateur | 36 km/h |
| Type de modulation utilisé | 64QAM |
| Puissance de transmission de la BS | 43 dBm |
| Nombre de Time slot | 100 |
| Largeur de la fenêtre Tc | 20 |
| Déviations standard du shadowing | 8.9 |
| Exposant du path loss | 3.5 (environnement urbain) |

Tableau III.1 : Paramètres de simulation. [70]

Les paramètres utilisés par les chercheurs pour la simulation de l'algorithme évolutionnaire PSO sont donnés dans le tableau ci-dessous :

| Paramètres | Valeurs |
|---|---------|
| Taille de l'essaim (Nombre de particules) | 50 |
| Nombre d'itérations | 100 |
| Coefficients d'accélération c1, c2 | 1 |
| Facteur de construction Z | 0.7 |

Tableau III.2 : Paramètres de l'algorithme PSO [70]

III.7.4 – Synthèse de comparaison :

Dans l'étude de cas, nous avons présentés trois types de services voix, vidéo et données. Des simulations ont été effectuées par les chercheurs pour évaluer les performances de l'algorithme PSO-PFS en termes d'équité de délai et de débit, ainsi que d'efficacité spectrale et énergétique dans les systèmes NOMA et OFDMA sur les liaisons descendantes.

Les acronymes suivants sont utilisés pour indiquer les principales méthodes d'étude :

- **PSO-PFS noma** : L'algorithme hybride PSO-PFS combiné avec le système NOMA,
- **PSO-PFS ofdma** : L'algorithme hybride PSO-PFS combiné avec le système OFDMA,
- **PFS noma** : L'algorithme PFS combiné avec le système NOMA,
- **PFS ofdma** : L'algorithme PFS combiné avec le système OFDMA.

Notre étude sera basée sur l'analyse et la comparaison des performances entre ces quatre schémas.

III.7.4.1 - Débit :

La **Figure III.12** montre le débit de performance de l'allocation des ressources en fonction du nombre d'utilisateurs dans la cellule tri-sectorielle pour 1200 sous-porteuses.

Plus le nombre d'utilisateurs dans une cellule est élevé, plus le débit du système est élevé en raison de la diversité multi-utilisateur.

En revanche, NOMA offre un débit supérieur à OFDMA qui atteint les **32 Gbps**, et ce avec le schéma PSO-PFSnoma.

En effet, NOMA dessert plus d'utilisateurs que l'OFDMA. Cela permettra d'avoir suffisamment de sous-porteuses pour l'allocation. De plus, la superposition et le nouveau domaine de puissance du système NOMA permettent des débits de données plus élevés.

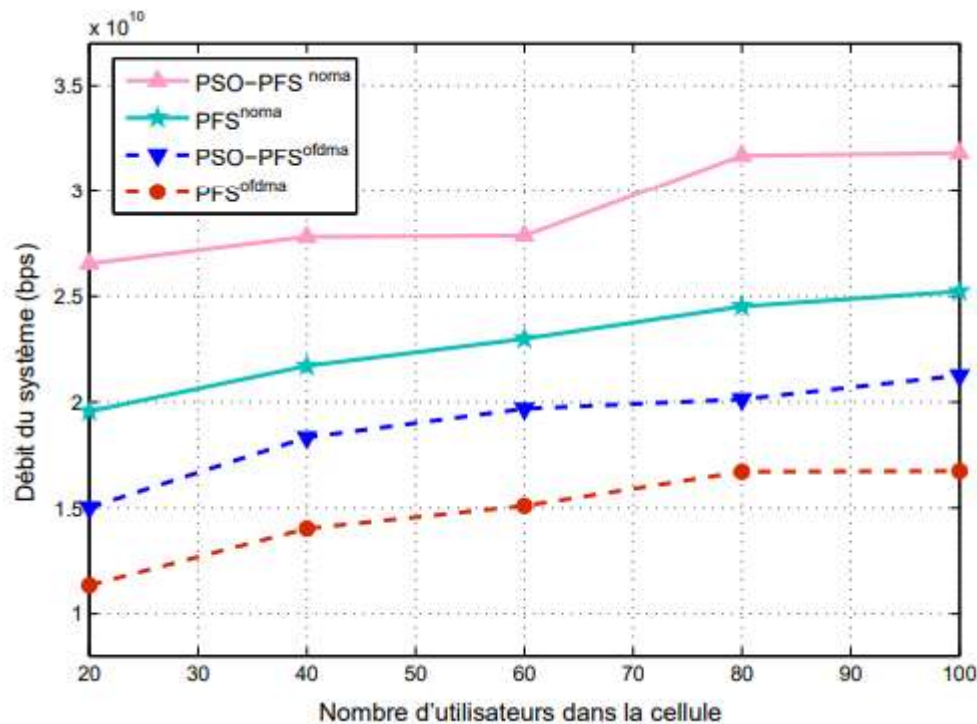


Figure III.12 : Performances en termes de débit. [70]

Un autre résultat important à noter est que l'hybridation PSO-PFS est supérieure aux schémas de d'ordonnancement PF pour les deux systèmes Noma et OFDMA. En effet, les métriques de l'algorithme PSO-PFS tentent de distribuer de manière optimale les ressources à tous les utilisateurs, même ceux confrontés à de mauvaises conditions de canal. Il est toujours à la recherche de la meilleure solution dans l'espace de recherche.

III.7.4.2 - Équité :

L'équité est une mesure importante de la performance du processus d'allocation. En optimisant l'équité, vous pouvez empêcher tout utilisateur de rencontrer des débits de transmission de données nuls à n'importe quelle échelle de temps.

En termes d'équité pour l'utilisateur, la **Figure III.13** montre une convergence rapide vers un niveau d'équité plus élevé (indice 1), et assure une meilleure équité des mobiles avec différentes qualités de canaux radio pour les quatre schémas.

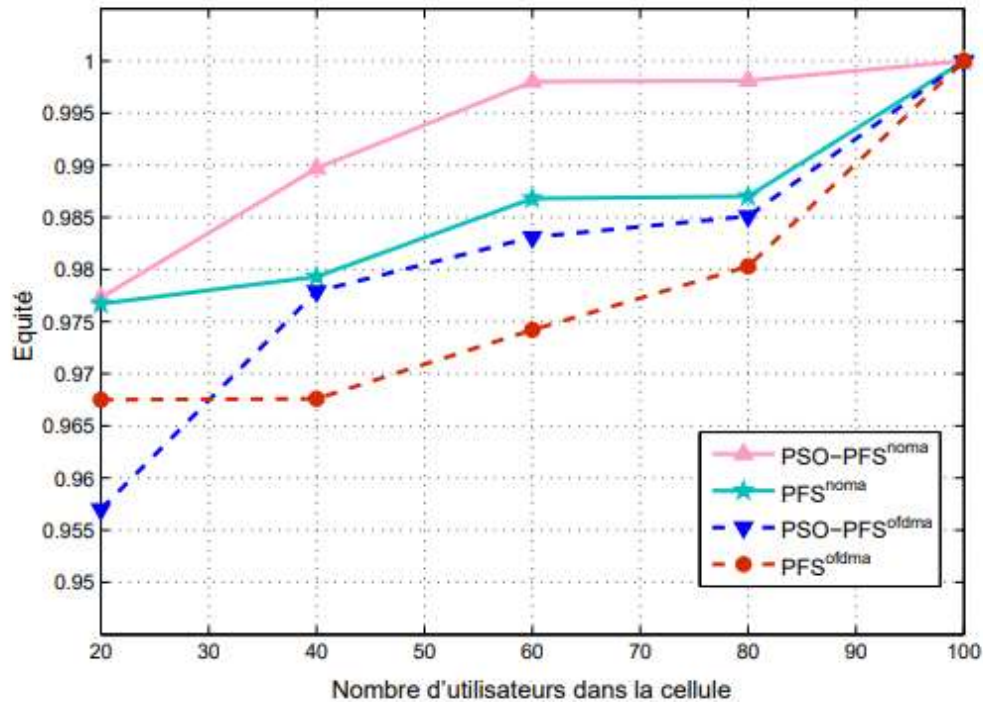


Figure III.13 : Performances en termes d'équité. [70]

III.7.4.3 - Contrainte du délai :

Différentes applications ont des exigences de délai différentes et doivent être garanties par le système.

Dans le cas d'étude, trois types de services voix, vidéo et données sont présentés tel que, 10 % des utilisateurs envoient de la vidéo avec un débit de 15 Mbps, 40 % transmettent de l'audio avec un débit de 9 Mbps et les 50 % restant vont transmettre des données à un débit distribué de manière exponentielle avec une moyenne de 40 Mbps.

Pour calculer la probabilité de retard, l'auteur a comparé le débit attribué à chaque utilisateur au débit minimum requis pour envoyer chaque application en fonction de ses besoins.

La **Figure III.14** montre les performances obtenues par rapport au délai de 100 utilisateurs, montrant la probabilité d'absence de retard.

Il est clair que le système NOMA atteint une probabilité de délai nulle plus rapidement que l'OFDMA dans les deux schémas d'allocation de ressources (PSO-PFS^{noma} et PFS^{noma}) avec une avance de **6 ms** pour PSO-PFS^{noma} en raison de sa convergence vers la solution optimale.

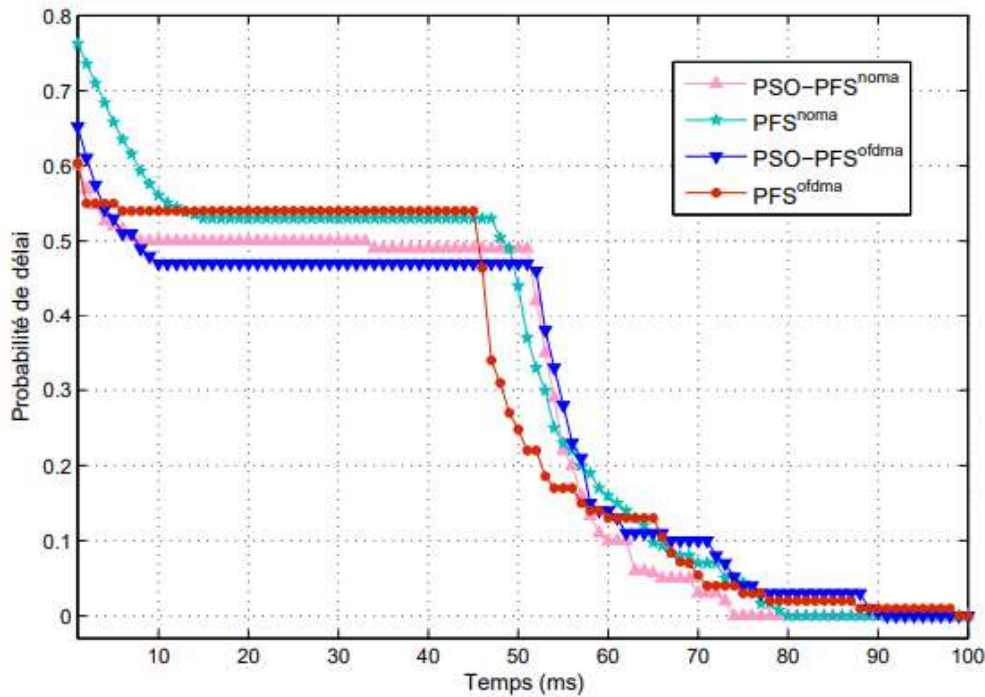


Figure III.14 : Probabilité de retard par rapport au temps. [70]

En effet, pour 74 ms le schéma PSO-PFS^{noma} atteint une probabilité nulle comparé à 91ms pour PSO-PFS^{ofdma}.

Cela lui permet de transférer plus de ressources que PSO-PFS^{ofdma}, d'améliorer la qualité de service et d'augmenter le pourcentage d'utilisateurs.

Quant au schéma PFS^{ofdma}, il est très lent et atteint une probabilité nulle pour un temps de 99ms. Ce schéma n'est donc pas très adapté aux services multimédias.

III.7.4.4 - Efficacité spectrale et énergétique :

Dans cette section, l'auteur analyse les performances de l'efficacité spectrale SE et énergétique EE dans les systèmes **NOMA** et **OFDMA**.

• Efficacité énergétique :

Dans la **Figure III.15**, les schémas PSO-PFS^{noma} et PFS^{noma} sont de l'ordre de **1,75 Gbps/w** et **1,3 Gbps/w**, respectivement, et présentent une efficacité énergétique nettement supérieure à celle des autres schémas.

Pour le schéma OFDMA, l'efficacité augmente faiblement, atteignant une efficacité maximale de **0,5 Gbps/w**.

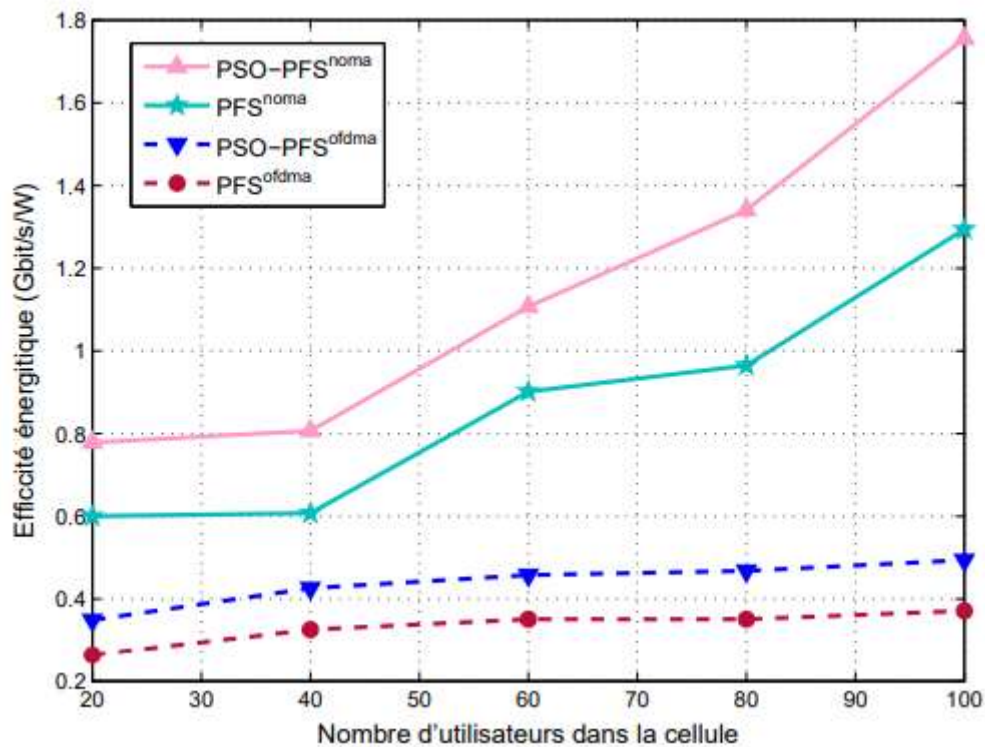


Figure III.15 : Efficacité énergétique en fonction des utilisateurs. [70]

• **Efficacité spectrale :**

Dans la **Figure III.16**, les schémas PSO-PFS^{noma} et PFS^{noma} montrent une efficacité supérieure par rapport aux deux autres schémas OFDMA. En effet, dans un système OFDMA, à mesure que le nombre d'utilisateurs augmente, il devient plus difficile de satisfaire les utilisateurs en raison du manque de spectre.

En d'autres termes, NOMA fournit un service rapide à plusieurs utilisateurs avec différentes conditions de canal et les mêmes ressources, offrant un accès à toutes les sous-porteuses. Le principe de superposition permet également la transmission de messages à large bande diffusés sur la même fréquence, améliorant considérablement l'efficacité spectrale des systèmes NOMA.

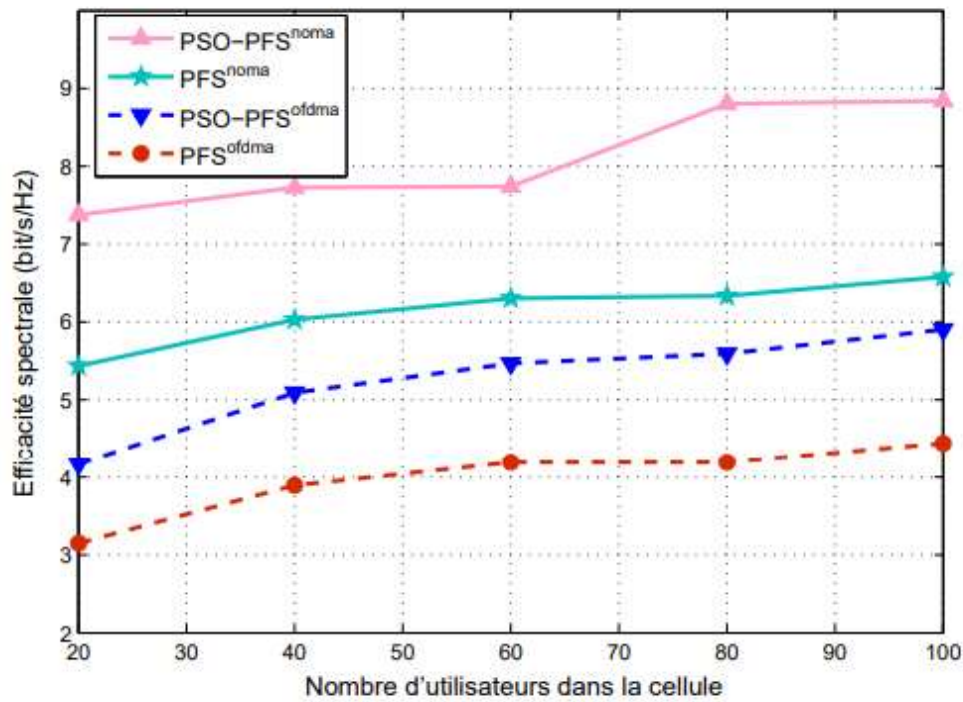


Figure III.16 : Efficacité spectrale en fonction des utilisateurs. [70]

Enfin, les performances de l'algorithme PSO-PFS sont supérieures à celles de PFS dans les deux Figures (III.15 et III.16). La raison en est que l'algorithme PSO renvoie une meilleure position optimale globale et utilise de manière optimale le spectre dans la cellule.

III.8 - Récapitulatif des comparaisons :

L'algorithme (PSO-PFS) peut fournir la meilleure solution pour l'allocation des ressources dans les systèmes NOMA. Dans un système NOMA, les utilisateurs n'ont pas à passer par un créneau horaire programmé pour envoyer des informations, mais dans OFDMA, chaque utilisateur doit envoyer une demande de planification de canal à la station de base qui dessert, ce qui entraîne une augmentation du délai.

L'allocation des ressources effectuée conduit à un compromis entre le débit et l'équité par rapport à l'ordonnanceur, offrant un débit élevé avec une latence réduite et une amélioration significative du spectre et de l'efficacité énergétique. Le résultat est une amélioration des performances, de la qualité de service et des utilisateurs satisfaits.

• **Tableau comparatif entre NOMA et OFDMA :**

| Caractéristiques | NOMA | OFDMA |
|---|---|---|
| Formulaire complet | Accès multiple non orthogonal | Accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence |
| Efficacité spectrale | Elevé | Faible |
| Capacité (Nombre d'utilisateurs/cellule) | Faible | Elevé |
| Avantages | Augmente le nombre d'utilisateurs desservis simultanément, donc assure une connectivité massive. | Utilisation optimale de la bande de fréquence allouée par orthogonalisation des porteuses. |
| | Maintient l'équité pour les utilisateurs et une qualité de service diversifiée. | OFDMA permet de s'affranchir des multi-trajets en liant les éléments statistiquement indépendants. |
| Inconvénients | Chaque utilisateur doit renvoyer ses informations de gain de canal à la BS, et NOMA est intrinsèquement sensible à l'incertitude dans la mesure de ce gain. | L'OFDM est sensible au décalage fréquentiel qui peut causer une perte d'orthogonalité entre les sous-porteuses. |
| | Limite intuitivement le nombre effectif de paires d'utilisateurs, ce qui réduit à son tour le gain de débit total de NOMA | L'OFDM est très sensible aux erreurs de synchronisation fréquentielle et temporelle. |

Tableau III.3 : Comparaison entre NOMA et OFDMA

III.9 - Conclusion :

Un des majeurs problèmes que rencontre la transmission à débit élevé est le problème de trajets multiple. L'OFDM apparaît comme une bonne solution pour les trajets multiples, et ceci en divisant la bande de transmission en N sous-canaux orthogonaux. Un préfixe cyclique (Intervalle de Garde) est ensuite ajouté au début du symbole et ce préfixe est identique au segment de même longueur à la fin du symbole. La longueur de cet intervalle est choisie de façon à être supérieure à la valeur maximale de délai dû à l'effet de trajet multiple.

Pareillement pour NOMA qui a fait l'objet d'enquêtes sous divers angles, notamment l'allocation des ressources et l'équité. Le potentiel de NOMA ne se limite pas aux seuls systèmes SISO ; sa capacité peut être encore augmentée en appliquant NOMA dans les systèmes MIMO. L'application de NOMA est également pénétrable dans d'autres systèmes de communication, y compris les systèmes à ondes millimétriques et à lumière visible. Pour rendre NOMA plus pratique, ses limitations telles que la propagation des erreurs et l'ICI dans les réseaux multicellulaires doivent être surmontées.

- NOMA est basé sur le partage des ressources entre les utilisateurs.
- Le partage permet une somme de débit de données plus élevée.
- Peut aider à augmenter le nombre d'utilisateurs et un débit de données plus élevé.
- Adopté comme candidat pour la 5G.
- Des recherches considérables sont en cours pour le mettre en pratique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale :

Les réseaux des communications sans fil sont l'objectif sur lequel les études des chercheurs se sont concentrées à l'heure actuelle, afin d'atteindre une haute qualité dans le transfert d'informations et de communication, avec une grande vitesse et un grand débit par rapport aux réseaux filaires, en particulier dans les zones urbaines.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, l'évolution des réseaux mobiles de 1G à 5G ainsi que les généralités sur la 5G ont été présentées afin de se familiariser avec le concept de base de cette notion. Nous avons ensuite présenté les standards de la 5G et ses différents cas d'utilisation.

Et par la suite dans le deuxième chapitre, nous avons parlé de quelques généralités sur le réseau 5G, ses technologies et services, et nous avons élaboré son architecture radio C-RAN ainsi que les types d'interférences existantes dans les réseaux cellulaires et le cœur réseaux CN.

La synthèse des résultats de simulation obtenus par d'autres auteurs [70] nous ont montré que la nouvelle approche proposée (PSO-PFS) peut fournir la meilleure solution pour l'allocation des ressources dans les systèmes NOMA. Dans un système NOMA, les utilisateurs n'ont pas à passer par un créneau horaire programmé pour envoyer des informations, mais dans OFDMA, chaque utilisateur doit envoyer une demande de planification de canal à la station de base qui dessert, ce qui entraîne une augmentation du délai. L'allocation des ressources effectuée conduit à un compromis entre le débit et l'équité par rapport à l'ordonnanceur, offrant un débit élevé avec une latence réduite et une amélioration significative du spectre et de l'efficacité énergétique. Le résultat est une amélioration des performances, de la qualité de service.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie :

[1] Techtarget. Définition 5G [en ligne]. (Modifier en janvier 2020). Disponible sur :<
<https://whatis.techtarget.com/fr/definition/5G> >

[2] Guy-Pujolle-Les-réseaux_-9e-Édition-L_ère-des-réseaux-cloud-et-de-la-5G, 2020.

[3] Évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G - Volet 1 :
présentation générale de la 5G, ANFR, juillet 2019

[4] RANDROID. Réseau 5G : déploiement, fonctionnement, usages et smartphones compatibles.
[en ligne].(modifier le 31 mai 2020). Disponible sur
:<https://www.frandroid.com/telecom/488716_reseau-5g-tout-ce-quiva-changer-quels-usages-et-pourquoi-la-technologie-est-importante>

[5] Techtarget. Définition 5G [en ligne]. (Modifier en octobre 2018) 3GPP (3rd Generation
Partnership Project). Disponible sur :
<<https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/3rd-Generation-Partnership-Project-3GPP>>

[6] Internet Society. A propos de l'IETF [en ligne]. (Modifier le 28 aout 2018). Disponible sur
:< <https://www.internetsociety.org/fr/about-the-ietf/> >

[7] UIT Engagée à connecter le monde. A propos de l'Union internationale des
télécommunications (UIT) [en ligne]. (Mis à jour en janvier 2020). Disponible sur
:<<https://www.itu.int/fr/about/Pages/default.aspx>>

[8] UIT Engagée à connecter le monde. Que fait l'UIT ? [en ligne]. (Mis à jour en janvier 2020).
Disponible sur :<<https://www.itu.int/fr/about/Pages/whatwedo.aspx>>

[9] CNET Franc [en ligne]. (Modifier en 21/02/2022) 5G : définition, fonctionnement du réseau,
usages et couverture en France, tout ce qu'il faut savoir. Disponible sur
:<<https://www.cnetfrance.fr/news/5g-definition-fonctionnement-du-reseau-usages-et-couverture-en-france-tout-ce-qu-il-faut-savoir-39904675.htm>>

[10] Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC) [en ligne]. (Publié en 28 mai 2018) 5G-NR. Disponible sur :< <https://medium.com/5g-nr/ultra-reliable-low-latency-communication-urllc-9b2505e81579> >

[11] Arm [en ligne]. xR, AR, VR, MR : quelle est la différence dans la réalité ? (Publié en 01 Avril 2022). Disponible sur :<<https://www.arm.com/blogs/blueprint/xr-ar-vr-mr-difference>>

[12] INT SPOTLIGHT. Massive Machine Type Communication in 5G and beyond network. Disponible sur : < <https://itnspotlight.com/massive-machine-type-communication-in-5g-and-beyond-network> >

[13] 3GPP [en ligne] Evolution across three major Releases – 2020. Disponible sur :<https://www.3gpp.org/ftp/Information/presentations/presentations_2020/Poster_2020_MWC_v6_OPTIMIZED.pdf>

[14] Les enjeux de la 5G - mars 2017.

[15] Massive MIMO, Mustafa Khaleel, Advanced Wireless Telecommunications – Master Program, Politehnica University of Bucharest.

[16] Réseau 5G : déploiement, fonctionnement, usages et smartphones compatibles en France [en ligne]. (Publié en 30 mars 2022). Disponible sur : <https://www.frandroid.com/telecom/488716_reseau-5g-tout-ce-qui-va-changer-quels-usages-et-pourquoi-la-technologie-est-importante#:~:text=Le%20MIMO%20massif%20permet%20d,le%20signal%20aux%20appareils%20connectés.>

[17] Cigref- 5. Anticipation et opportunités 2020 janvier influence de la 5G sur les architectures. France. Janvier 2020.

[18] Club Iot by siapartners. Tour d’horizon des innovations technologiques à l’origine de la révolution 5G et ses impacts sur l’IoT [en ligne]. Disponible sur :< <https://www.club-iot.siapartners.com/article-5g>>.

[19] NTT DOCOMO, “5G Radio Access: Requirements, Concept and Technologies,” Jul-2019.

[en ligne]. Disponible sur:

<https://www.docomo.ne.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_White_Paper.pdf>

[20] Olfa Chabbouh. Gestion Des Ressources Des Réseaux Cloud RAN Dans un Contexte 5G. Thèse de doctorat. Université de Carthage École Supérieure des Communications de Tunis École Doctorale en Technologies de l’Information et de la Communication. 13 Octobre 2017

[21] Futura-sciences. 5G DÉFINITION Classé sous : INFORMATIQUE, RÉSEAU, INTERNET DES OBJETS [en ligne] Disponible sur : <<https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/informatique-5g-17101/>>.

[22] Ericsson. 5G radio access, capabilities and technologies, Apr-2016. [en ligne] (Modifier le: 16-Mar-2019). Disponible sur:<<https://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp-5g.pdf>>

[23]ARCEP, Parlons 5G : toutes vos questions sur la 5G. [en ligne] (Mise à jour le 25 mai 2021). Disponible sur : <<https://www.arcep.fr/nos-sujets/parlons-5g-toutes-vos-questions-sur-la-5g.html>>

[24] Qu’est-ce que l’architecture de réseau 5G ?, Harald Remmert [en ligne]. (Publié en 19 mars 2021). Disponible sur : <<https://fr.digi.com/blog/post/5g-network-architecture#:~:text=Le%20cœur%20de%20la%205G,comme%20le%20montre%20le%20schéma>>

[25] Home of RF and Wireless vendors and resources « Difference between 4G and 5G». Disponible sur : <<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/4G-vs-5G-difference-between-4G-and-5G.html>>

[26] AMDOCS, NETWORK EXPOSURE FUNCTION [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.amdocs.com/sites/default/files/2021-07/Openet-NEF-Data-Sheet.pdf>>

[27] Oracle® Communications Network Repository Function (NRF) Cloud Native Installation and Upgrade Guide [en ligne]. Disponible sur : <https://docs.oracle.com/cd/F22976_01/docs.10/NRF%20Installation%20Guide/GUID-4ED5A539-B9BD-4B69-9F96-FEB1FE3976DD.htm>

[28] IPLOOK, end to end Mobile Network Solution, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.iplook.com/products/5gc-pcf>>

[29] IPLOOK, end to end Mobile Network Solution, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.iplook.com/products/5gc-udm-ausf>>

[30] Techplayon, 5G Reference Network Architecture [en ligne]. (Publié en 03 mai 2017). Disponible sur : <https://www.techplayon.com/5g-reference-network-architecture/>

[31] HUAWEI, L'architecture du réseau 5G [en ligne]. (Publié en 06/01/2020). Disponible sur : <https://forum.huawei.com/enterprise/fr/1-architecture-du-r%C3%A9seau-5g/thread/593762-100363>

[32] Home of RF and Wireless vendors and resources « 5G NR network interfaces- Xn,NG,E1,F1,F2 interface types in 5G ». Disponible sur : <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/5G-NR-network-interfaces.html>

[33] ERICSSON, Frédéric Vergnaud, Le cœur de réseau évolue vers la 5G, Septembre 2021 [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ericsson.com/fr/blog/3/2021/9/le-coeur-de-reseau-evolue-vers-5g>

[34] BENYAHIA Hafsa Imane et CHERIFI Wafaa, Étude des techniques MIMO a base de FBMC pour la 5G, Faculté de technologie, Université Abou Bekr Belkaid – Juin 2017.

[35] HO Anh Tai. Application des techniques multiporteuses de type OFDM pour les futurs systèmes de télécommunications par satellite. THÈSE En vue de l'obtention du DOCTORAT .L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE.2009.

[36] Pierre GRUYER, Simon PAILLARD, Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM, décembre 2005.

[37] R. W. CHANG: Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission. Bell System Technical Journal, volume 46, pages 1775–1796, Dec. 1966.

[38] Virginie Dégardin. Analyse de la faisabilité d'une transmission de données haut Débit sur le réseau électrique basse tension. Thèse de doctorat en électronique Université des sciences et technologies de Lille Décembre 2002.

[39] NOUAOURIA ASMA. MODELISATION D'UN MODULATEUR ET DEMODULATEUR OFDM SUR FPGA. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA - 2016.

[40] Toon van Waterschoot, Vincent Le Nir, Jonathan Duplicy "Analytical Expressions for the Power Spectral Density of CP-OFDM and ZP-OFDM Signals", Member, IEEE, and Marc Moonen, Fellow, IEEE

[41] Dieter Van Welden and Heidi Steendam DIGCOM research group "Iterative EM Based Channel Estimation for KSP-OFDM", TELIN Dept., Ghent University Sint Pieters nieuwstraat 41, 9000 Gent, Belgium

[42] Yong Soo Cho: Chung-Ang University, Republic of Korea. Jaekwon Kim: Yonsei University, Republic of Korea. Won Young Yang: Chung-Ang University, Republic of Korea. Chung G. Kang : Korea University, Republic of Korea, « MIMO-OFDM WIRELESS COMMUNICATIONS WITH MATLAB », IEEE PRESS, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2 Clementi Loop, # 02-01, Singapore 129809, 2010.

[43] HOCINI Ilyes et DERGAOUI Mohamed, Réalisation d'un modulateur et démodulateur OFDM sur FPGA ZYNQ, Juillet 2019.

[44] E. U. T. R. Access, "and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN)," Overall description, vol. 126, 2008.

[45] C. Gessner, A. Roessler, and M. Kottkamp, "Umts long term evolution (lte) technology introduction," Rohde and Schwarz Tech. Report. Disponivel em: http://karriere.rohdeschwarz.de/fileadmin/customer/downloads/PDF/UMTS_Eng.pdf, pp. 1-32, 2008.

[46] Necib Abdelbadie Et Debbeche Hocine, Comparaison des performances entre NOMA et OFDM pour le réseau 5G Master Académique, faculté de Technologie, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2021.

- [47] R. Nogueroles, M. Bossert, A. Donder and V. Zyablov, "Improved Performance of a Random OFDMA Mobile Communication System," Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Communications, vol. 3, pp. 2502-2506, 1998.
- [48] H. Sari and G. Karam, "Orthogonal Frequency-Division Multiple Access and its Application to CATV Networks," European Transactions on Telecommunications (ETT), vol. 9, no. 6, pp. 507-516, 1998.
- [49] M. R. Hojeij, "Resource allocation techniques for non-orthogonal multiple access systems", Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique Bretagne Pays de la Loire, Mai 2018.
- [50] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li et K. Higuchi, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access", IEEE 77th vehicular technology conference (VTC Spring), pages 1–5, 2013.
- [51] J. Farah, E. Sfeir, C. A. Nour et C. Douillard, "New resource allocation techniques for base station power reduction in orthogonal and non-orthogonal multiplexing systems", IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), pages 618–624, 2017.
- [52] L. Zhu, Z. Xiao, X. Xia and D. Oliver Wu, "Millimeter-Wave Communications With NonOrthogonal Multiple Access for B5G/6G," in IEEE Access, vol. 7, pp. 116123-116132, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935169, 2019.
- [53] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, and K. S. Kwak, "Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: potentials and challenges," *IEEE Commun.. Surveys Tuts.*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, Oct. 2016.
- [54] 3GPP, R1-163111, "Initial views and evaluation results on non-orthogonal multiple access for NR uplink," Apr. 2016.
- [55] Z. Wei, J. Yuan, D. W. K. Ng, M. ElKashlan, and Z. Ding, "A survey of downlink non-orthogonal multiple access for 5G wireless communication networks," *ZTE Commun.*, vol. 14, no. 4, pp. 17-25, Oct. 2016.

- [56] O. A. Saraereh, A. Alsaraira, I. Khan et P. Uthansakul, "An Efficient Resource Allocation Algorithm for OFDM-Based NOMA in 5G Systems", *Electronics*, volume 8, page 1399, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019.
- [57] J. Choi, "Minimum power multicast beamforming with superposition coding for multiresolution broadcast and application to NOMA systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 3, pp. 791–800, 2015.
- [58] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan, and V. K. Bhargava, "A survey on non-orthogonal multiple access for 5g networks: Research challenges and future trends," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2181–2195, 2017.
- [59] Y. Saito et al., "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access," *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2013, Dresden, Germany, pp. 1-5.
- [60] M. Zeng, A. Yadav, O. A. Dobre, G. I. Tsiropoulos, and H. V. Poor, "Capacity comparison between MIMO-NOMA and MIMO-OMA with multiple users in a cluster," accepted with minor revisions in *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Apr. 2017.
- [61] "5G radio access: Requirements, concepts and technologies," NTT DOCOMO, Inc., Tokyo, Japan, 5G Whitepaper, Jul. 2014
- [62] 3GPP, RP-170829, "New study item proposal: study on non-orthogonal multiple access for NR," Mar. 2017.
- [63] Timotheou, S., & Krikidis, I. (2015). Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems. *IEEE Signal Processing Letters*, 22(10), 1647–1651
- [64] Sun, Q., Han, S., Chin Lin, I., & Pan, Z. (2015). On the ergodic capacity of MIMO NOMA systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 4(4), 405–408.
- [65] Ding, Z., Adachi, F., & Poor, H. V. (2016). The application of MIMO to nonorthogonal multiple access. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(1), 537–552.

[66] Ding, Z., Peng, M., & Poor, H. V. (2015). Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems. *IEEE Communications Letters*, 19(8), 1462–1465.

[67] A. K. Fletcher, S. Rangan, and V. K. Goyal, “On-off random access channels: A compressed sensing framework,” *CoRR*, vol. abs/0903.1022, 2009. [Online]. Disponible sur :<<https://ieeexplore.ieee.org/document/7558184/>>

[68] M. Aldababsa, and All, "A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, p. 9713450, 2018/06/28, 2018.

[69] Zenadji Sylia, Cédric Gueguen, Brikh Lamine, Talbi Larbi, Khireddine Abdelkrim. New strategy for resource allocation using PSO-PFS hybrid. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, Inderscience, 2020. fahal-03124029

[70] ALKAMA Dina Et BERKOUK Saida, Nouvelle approche pour l’optimisation de l’allocation des ressources dans les réseaux cellulaires, Faculté de Technologie, Université Abderrahmane Mira de Béjaia, Septembre 2020.