

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de la Technologie



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

## Projet de Fin d'Etudes

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

*Filière : Télécommunications.*

*Spécialité : Réseaux et télécommunications.*

### Thème

*Étude des interférences inter-numérolgies  
dans les réseaux 5G.*

**Préparé par :**

- Harzallah chahinez.
- Seklab Sabrina.

**Dirigé par:**

Mr M.Tounsi.  
Mr Y. Ouazziz.

**Examiné par:**

Mr. Mekhmoukh.  
Mr. Khireddine.

**Année universitaire : 2023/2024**

# *Remerciement*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier ALLAH le tout puissant pour nous avoir donné la foi et la force de mener à bien notre projet de fin d'étude, d'avoir éclairé notre route et de nous guider dans le meilleur et bon chemin. Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers nos encadrants, Monsieur **M.Tounsi** et Monsieur **Y. Ouazziz** pour leurs encadrements complémentaires, leur patience et leur confiance tout au long de notre travail. Leurs conseils précieux, et leur soutien constant ont été essentiels à la réussite de ce projet. Nos remerciements vont également à l'ensemble des professeurs du département **ATE** et tous ceux de la **faculté technologie de l'Université Abderrahmane Mira Bejaia**, pour leur enseignement de qualité et les connaissances qu'ils nous ont transmises durant nos années d'études. Leur passion et leur dévouement pour la recherche nous ont inspirées et motivées à développer nos apprentissages et questionnements scientifiques. Nos remerciements et reconnaissances les plus distingués aux membres du jury **Mr.Mekhmoukh**, et **Mr. Khiredine**, d'avoir accepté d'évaluer notre travail. Leurs remarques et suggestions ont été précieuses et nous ont permises d'en améliorer la qualité. Enfin, Nous tenons à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*

*Que ce soit à travers des discussions enrichissantes, des conseils ou simplement par leur présence, leur contribution a été précieuse. Ce mémoire est le fruit d'un travail collectif autant que personnel, et nous sommes profondément reconnaissantes envers tous ceux et celles qui nous ont accompagnées.*

# Dédicace

*Je dédie ce travail à **ma mère** mon exemple dans la vie, la personne qui a toujours su trouver les mots pour me rassurer et a su se montrer forte malgré toutes les épreuves. Ma mère cette personne qui a dû être 2 en 1 et prendre le relais après le départ de mon défunt père. J'aurai beau t'écrire et te dédier toutes mes réussites mais cela ne sera nul suffisant pour te rendre tout le bien et le bonheur que tu nous procure chaque jour. A **mon père** qui aurait tout donné pour me voir arriver à ce jour mais le destin en a décidé autrement, a cette personne en qui je suis le plus fière au monde*

*« **PAPA ta fille a tenu sa parole et a fini son master comme tu l'as toujours voulu tu n'es pas là pour me serer dans tes bras mais j'espère que tu veilles sur moi de là où tu es** »*

*A mon frère **ANIS** mon complice, seul homme à qui je donnerai mon âme pour le voir heureux merci pour ton soutien et pour tout l'aide que tu m'as apporté durant les périodes difficiles.*

*A mes sœurs **Feriel** et **Sara** qui non seulement étaient des sœurs mais aussi des meilleures amies à qui je confiais tous mes secrets, merci d'être compréhensives quand il le fallait.*

*A mes amis, qui sont vite devenu la famille **Sara(Brh)**, **Nadjette**, **Sarra**, **Rabah**, **Samy** sans oublier **MINA** je vous aime et vous remercie pour tous les bons moments.*

*Meilleur pour la fin, je dédie ce travail à la personne qui a su aider de loin comme de près a la réalisation de ce travail **Imad** merci d'avoir consacré du temps et beaucoup d'énergie pour me voir réussir.*

**H.Chahinez**

*Du fond de mon cœur, je dédie ce mémoire à tous ceux qui me sont chers*

*À ma chère mère, Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien-être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance, et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices. Avec vous, je sens le parfait amour. Vous m'encouragez à donner le meilleur de moi-même. Je vous aime de tout mon cœur.*

*À vous mes grands-parents, je dis merci d'avoir fait de moi celle que je suis aujourd'hui. Aucune dédicace ne pourra exprimer mes respects. Merci d'être une incroyable source d'amour, de conseils et d'inspiration dans ma vie. Puisse ce travail vous témoigner mon affection et mon profond amour.*

*À mon cher père, Chaque moment partagé à tes côtés est un trésor gravé dans le livre de mes souvenirs. Merci infiniment pour tout ce que tu fais et tout ce que tu es. Papa Je t'aime du plus profond de mon cœur*

*Mes chères copines Nani, Diana, Zina : Je voulais vous dire combien je vous aime et je suis reconnaissante de vous avoir dans ma vie. Votre soutien, votre amour inconditionnel et votre présence sont des trésors que je chéris chaque jour. Merci d'être mes amies, mes sœurs et mes confidentes.*

***S.Sabrina.***

## *Table des matières*

<b><i>Introduction générale</i></b> .....	1
<b><i>Chapitre I : L'évolution des différentes générations mobiles</i></b> .....	3
<b>I.1</b> Introduction .....	4
<b>I.2</b> Définition et généralité sur les réseaux mobiles .....	4
<b>I.2.1</b> La première génération .....	5
<b>I.2.2</b> La deuxième génération .....	5
<b>I.2.3</b> La troisième génération .....	5
<b>I.2.4</b> La quatrième génération .....	5
<b>I.3</b> L'invention de la 5G.....	6
<b>I.3.1</b> Défit et objectif de la 5G.....	6
<b>I.3.2</b> Catégories d'usage de service.....	7
<b>I.4</b> Architecture du réseau 5G.....	8
<b>I.4.1</b> Réseau d'accès .....	9
<b>I.4.2</b> Réseau cœur : NG-CN ou 5GC.....	9
<b>I.4.3</b> l'architecture du réseau stand-alone (SA) et non stand-alone (NSA).....	10
<b>I.5</b> Nouveaux standards radio .....	10
<b>I.5.1</b> bandes de fréquences.....	10
<b>I.5.2</b> mode de duplexage déployé.....	11
<b>I.5.3</b> structures de la trame 5G NR.....	12
<b>I.5.4</b> Découpage réseau.....	13
<b>I.6</b> Différentes techniques d'accès utilisées.....	13
<b>I.6.1</b> Massive MIMO .....	14
<b>I.6.2</b> Beamforming .....	15
<b>I.7</b> Conclusion .....	15
 <b><i>Chapitre II : Les interférences sur les réseaux mobiles</i></b> .....	 16
<b>II.1</b> Introduction .....	17
<b>II.2</b> Différentes formes d'interférences .....	17
<b>II.2.1</b> Interférences intercellulaires .....	17
<b>II.2.1.1</b> Les interférences co-tier et cross-tier .....	18

<b>II.2.1.2</b> Les interférences du canal adjacent .....	18
<b>II.2.1.3</b> Les interférences entre les canaux .....	19
<b>II.2.2</b> Interférences intra cellulaires .....	19
<b>II.2.2.1</b> Interférences entre les faisceaux.....	20
<b>II.3</b> L'impact des interférences .....	21
<b>II.4</b> Interférences inter-numérologie .....	21
<b>II.4.1</b> Préfixe cyclique (CP).....	23
<b>II.4.2</b> Le modèle de système MN-OFDM .....	24
<b>II.5 Conclusion</b> .....	26
<b><i>Chapitre III : Résultats des simulations et discussions</i></b> .....	27
<b>III.1</b> Introduction .....	28
<b>III.2</b> Environnement et Scénario de simulation .....	28
<b>III.3</b> Rappels sur la chaîne de transmission OFDM .....	29
<b>III.4</b> Métriques de mesure de performance : BER vs SNR .....	33
<b>III.5</b> Résultats de simulation .....	34
<b>III.6</b> Conclusion .....	35
<b><i>Conclusion générale</i></b> .....	37

## *Liste des figures :*

<b>Figure I.1</b> : L'évolution des communications mobiles .....	4
<b>Figure I.2</b> : Différents domaines d'utilisation de la 5G. ....	7
<b>Figure I.3</b> : Aperçu de l'architecture d'un réseau 5G. ....	8
<b>Figure I.4</b> : L'architecture de la 5G NR conformément à la norme 3GPP TS 38.300 .....	8
<b>Figure I.5</b> : L'architecture du réseau 5G point à point .....	9
<b>Figure I.6</b> : Déploiement de la 5G Modes NSA et SA .....	10
<b>Figure I.7</b> : Illustration du duplexage fréquentiel ou temporel.....	11
<b>Figure I.8</b> : Structure de la trame 5G NR .....	12
<b>Figure I.9</b> : Découpage de réseau 5G mises en œuvre sur la même infrastructure .....	13
<b>Figure I.10</b> : Réseau D2D.....	14
<b>Figure II.11</b> : Principe du beamforming. ....	15
<b>Figure II.1</b> : Interférences co-tier et cross-tier dans le réseau à petites cellules .....	18
<b>Figure II.2</b> : Interférence du canal adjacent.....	19
<b>Figure II.3</b> : Interférence entre les canaux .....	19
<b>Figure II.4</b> : Interférence entre faisceaux.....	20
<b>Figure II.5</b> : Préfixe cyclique .....	23
<b>Figure II.6</b> : Illustration de la relation entre la fréquence et le temps avec deux numéologies pour le cas $v = 2$ .....	24
<b>Figure II.7</b> : Un modèle de signal avec deux numéologies.....	26
<b>Figure III.1</b> : Représentation temporelle/Fréquentielle de l'OFDM .....	29
<b>Figure III.2</b> : Modèle de système OFDM.....	30
<b>Figure III.3</b> : Modulateur OFDM .....	31
<b>Figure III.4</b> : Démodulateur OFDM .....	31
<b>Figure III.5</b> : principe de l'insertion du préfixe cyclique .....	32
<b>Figure III.6</b> : Catégorisation des cellules à l'aide d'AMC.....	34
<b>Figure III.7</b> : Taux d'erreur BER en fonction du SNR pour les modulations 64-QAM et 16-QAM...34	
<b>Figure III.8</b> : Taux d'erreur BER en fonction du SNR pour la modulation QPSK .....	35

## *Liste des tableaux :*

<b>Tableau I.1</b> : L'évolution et caractéristique des réseaux mobiles .....	4
<b>Tableau I.2</b> : Aperçu des gammes de fréquences et des bandes de la 5G .....	11
<b>Tableau II.1</b> : Structures de numérolgie pour les canaux de données en 5G .....	22



## *Liste des abréviations :*

1G : First Generation  
2G : Second Generation  
3G : Third Generation  
3GPP : 3rd Generation Partnership Project  
4G : Fourth Generation  
5G : Fifth Generation  
5GC : Fifth Generation Core  
5G NR : Fifth Generation New Radio  
ACI : Adjacent Channel Interference  
AF : Application Function  
AMF : Access and Mobility Management Function  
AMPS : Advanced Mobile Phone System  
AUSF : AUthentication Server Function  
BER : Bit Error Rate  
BS : Base Station  
CCI : Co-channel interference  
CDMA : Code Division Multiple Access  
CUPS : Control and User Plane Separation.  
Cp : Cyclic Prefix  
CP : Control Plan  
D2D : Device to Device  
DN : Dial Number  
eMBB : enhanced Mobile Broad Band  
EPC : Evolved Packet Core  
FDD : Frequency Division Duplex  
FFT : Fast Fourier Transform  
FN : Function Node  
FR1 : Frequency Range 1  
FR2 : Frequency Range 2  
FTT : Fast Fourier Transform  
GSM : Global System for Mobile Communications  
HD : High Definition

IBI : Inter Beam Interference  
ICI : Inter/Intra Cell Interference  
IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers  
IFFT : Inverse Fast Fourier Transform  
IMT : International Mobile Telecommunications  
INI : Inter Numerology Interference  
IOT : Internet Of Things  
IP : Internet Protocol  
ISI : Inter Symbol Interference  
LTE : Long Term Evolution  
LTE : Long Term Evolution-Advanced  
MTS : Message telecommunication service  
MIMO : Multiple Input Multiple Output  
MMS : Multimedia Messaging Service  
MME : Mobility Management Entity  
mMIMO : Massive MIMO  
mMTC : massive Machine Time Communication  
MN-OFDM : Mixed Numerology OFDM  
MUI : Multi User Interference  
NOMA : non-orthogonal multiple access  
NEF : Network Exposure Function  
NR : New Radio  
NRF : Network Repository Function  
NG : Next Generation  
NG-RAN : Next Generation Radio Access Network  
NSA : Non-Stand-Alone  
NSSF : Network Slice-Selection Selection  
OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing  
PCF : Policy Charging Function  
PTT : Push to Talk  
PSK : Quadrature Phase Shift Keying  
QAM : Quadrature Amplitude Modulation  
QoS : Quality of Service  
QPSK : Quadrature Phase Shift Keying

RAN : Radio Access Network  
RAT : Radio Access Technology  
RE : Radio Element  
RF : Radio Frequency  
SA : StandAlone  
SBA :Service-Based Architecture  
SCS :Sub Carrier Spacing  
SDMA : Spatial Division Multiple Access  
SI : Self Interference.  
SMF : Session Management Function  
SN-OFDM : Single Numerology  
SNR : Signal to Noise Ratio  
TDD : Time Division Duplex  
TDMA : Time Division Multiple Access  
UE : Up Equipment  
UIT : Union International Telecommunication  
UP : Use Plan  
UPF : User Plane Function  
uRLLC : ultra Reliable Low Latency Communication  
VN : Variable Node  
WSN : Variable Sub-carrier Numerology  
WCMA : Wideband Code Division Multiple Access  
WLAN : wireless local-area network  
WWW : World Wide Wireless Web  
WISDOM : Wireless System for Dynamic Operating Mega Communication.

***Introduction***  
***générale***

## Introduction générale

Au cours de la dernière décennie, les services de données sans fil ont eu un impact incroyable sur la vie des gens, d'une manière que nous n'aurions jamais pu imaginer, la technologie mobile a considérablement transformé et façonné notre vie quotidienne. Le nombre d'appareils mobiles a augmenté de façon exponentielle et le trafic de données a presque doublé chaque année. Il ne fait aucun doute que le taux de croissance va continuer à être rapide avec l'augmentation explosive des exigences en matière de débit de données, de latence et de qualité de service.

Afin de gérer ce niveau de croissance et de répondre à ces exigences, le réseau de communications mobiles de cinquième génération (5G) est envisagé comme un progrès révolutionnaire combinant diverses nouvelles technologies, notamment l'utilisation de bandes d'ondes millimétriques (mmwave), d'antennes multifaisceaux à entrées multiples et sorties massives (mMIMO), la densification du réseau, le duplexage dynamique par répartition dans le temps (TDD). La 5G, qui est en passe de devenir le réseau mobile le plus rapidement déployé de tous les temps, a déjà représenté 660 millions d'utilisateurs à la fin de 2021 et devrait couvrir environ 75 % de la population mondiale en 2027 [1]. La 5G offre des performances exceptionnelles mais aussi des défis importants, cependant, malgré les avantages inévitables de toutes ces technologies clés, la structure hétérogène et ultra flexible du réseau 5G cause une non-orthogonalité dans le système et génère des interférences significatives qui doivent être gérées avec soin.

Celles-ci sont devenues inévitables dans les réseaux mobiles et sont causées par divers facteurs tels que la congestion du spectre, les obstacles physiques et les interférences entre différentes technologies ou fréquences. Elles compromettent la fiabilité des communications et peuvent réduire la qualité de l'expérience utilisateur.

Ces interférences nécessitent des solutions innovantes pour les réduire et les contourner afin de garantir des communications fiables. Cela implique une planification minutieuse des fréquences, l'utilisation de technologies avancées de traitement du signal et une gestion efficace du spectre par les régulateurs et les opérateurs. En intégrant ces stratégies, il est possible de minimiser les interférences et d'optimiser la qualité des services mobiles. Ces problèmes font l'objet de recherches mondiales intensives dans la communauté scientifique pour garantir la satisfaction des utilisateurs.

Notre étude est divisée en trois chapitres :

La première partie de cette étude explore l'évolution des générations de réseaux mobiles, depuis les premiers systèmes analogiques jusqu'à la 5G.

Pour ensuite vient la deuxième partie pour examiner en détail les différents types d'interférences rencontrées dans les réseaux mobiles, en mettant particulièrement l'accent sur les interférences inter-numérologies.

Le troisième chapitre et le dernier est consacré aux simulations et résultats. Il commence par une présentation du logiciel utilisé et les performances choisies pour les différentes simulations. Ensuite, plusieurs simulations et observations de modulations sont faites sur deux signaux de numéologies distinctes. Cette étude est réalisée en analysant le taux d'erreur binaire BER en fonction du rapport signal sur bruit SNR.

Enfin nous terminons par une conclusion générale qui synthétise les principaux résultats obtenus ainsi que les références bibliographiques utilisées.

# *Chapitre 1*

## I.1 Introduction :

L'évolution des communications mobiles depuis l'avènement de la 1G jusqu'à la 5G a eu un impact sur la vie quotidienne. Les communications mobiles sont devenues essentielles pour des millions de personnes à travers le monde, et cette importance devrait croître dans le futur. Initialement, les réseaux de communication mobile de la 1G utilisaient des transmissions analogiques pour les services vocaux, avec des limitations telles que l'absence de fonctionnement d'un pays à l'autre. La 2G a introduit les signaux numériques, permettant l'itinérance internationale et le support des services de données à faible débit. La 3G a étendu ces capacités en incluant la téléphonie vocale sans fil à grande échelle, les appels vidéo et les données sans fil à large bande. La 4G, débutée en 2010, a introduit des réseaux de commutation de paquets tout IP, offrant un accès mobile à bande ultra-large et une transmission multi-porteuses. Enfin, la 5G, avec une vitesse allant jusqu'à 20 Gbps, permet des téléchargements rapides et la possibilité de regarder des vidéos en ultra-haute définition en temps réel. Cette dernière génération de réseau facilite également l'émergence de l'Internet des objets (IoT), ouvrant la voie à de nouveaux types d'objets communicants [2].

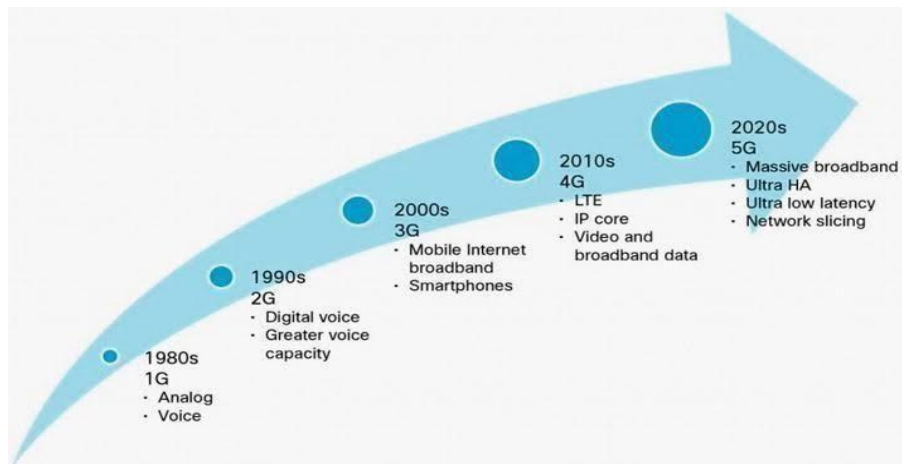


Figure I.1 : l'évolution des communications mobiles [2].

## I.2 Définition et généralités sur les réseaux mobiles

Le tableau 1 résume l'évolution des réseaux de communication radio mobile.

Generation	Time-period	Throughput/Speed	Technology	Internet services	Bandwidth/Carrier Frequency	Services introduced
1G	1980–1990	14.4 Kbps (max)	AMPS	No Internet	Analog /30Khz	Only voice call
2G	1990–2000 (2G), 2001–2004 (2.5G)	9.5–65 kbps	CDMA, GSM	Narrow band	25 MHz/200Khz	Voice call, SMS, international roaming
3G	2004–2005 (3G), 2006–2010 (3.5G)	3.1 Mbps(peak) 500–700 Kbps	IMT2000, WCDMA	Broad band	25 MHz/5Mhz	Voice data, non-voice data transmission
4G	2009–Present	100–300 Mbps (Peak) 3–5 Mbps 100 Mbps (Wi-Fi)	LTE, LTE-A, WiMAX	Ultra Broad band	100 MHz/15Mhz	The fast data rate, High-quality HD visual phone, All-IP → M-VoIP → VoLTE service
5G	2019–Present	20 Gbps (peak), 100 times faster than 4G	Massive MIMO, mm Waves, NR	Ultra Broad band	30–300 GHz/ 3–30Ghz	Ultra-reliable and low latency communications, Internet of Things, HD multimedia streaming

Tableau I.1 : L'évolution et caractéristiques des réseaux mobiles [3]



Chaque génération a apporté des opportunités et des avancées technologiques significatives à la communication :

### **I.2.1 Premières générations (1G) :**

Autrement dit 1G, apparue dans les années 1980 avec les premiers téléphones mobiles et a remplacé la technologie 0G, qui comprenait les radiotéléphones mobiles et des technologies telles que le système téléphonique mobile (MTS), le système téléphonique mobile avancé (AMTS), le service téléphonique mobile amélioré (IMTS) et le système Push-to-Talk (PTT) [4].

### **I.2.2 Deuxièmes générations (2G)**

La 2G, ce réseau est également appelé GSM. Ce dernier a été lancé commercialement sur la base de la norme GSM en Finlande par Radio linja en 1991, la 2G permet la communication de données et contrairement à la génération précédente de communication cellulaire, nous pouvions envoyer un texte de 160 caractères via notre téléphone mobile. Cette norme numérique utilise TDMA et CDMA comme technologie pour diviser les canaux et son débit moyen est de 9.6 Kbits/s et des vitesses allant jusqu'à 64kbps. L'évolution et l'histoire des réseaux cellulaires se sont poursuivies et la 3G a vu le jour [5].

### **I.2.3 Troisièmes générations (3G)**

La technologie 3G permet une transmission efficace des données par commutation de paquets, tout en gérant les appels vocaux via la commutation de circuits. Elle utilise une bande passante plus large et de meilleure qualité, avec des vitesses de transmission allant de 125 kbps à 2 Mbps. À partir de 2005, la technologie 3G a amélioré considérablement les performances des réseaux informatiques tels que WCDMA, WLAN et Bluetooth, ainsi que des appareils mobiles comme les téléphones cellulaires et GPS. Elle offre un accès à l'itinérance mondiale et assure une clarté des appels vocaux [5].

### **I.2.4 Quatrièmes générations (4G)**

La 4G elle, offre les mêmes fonctionnalités que la 3G et des services supplémentaires tels que les journaux multimédias, afin de téléviser avec plus de clarté et envoyer des données jusqu'à 10 fois plus vite que les générations précédentes, avec l'opportunité d'accéder à l'Internet très haut débit et une vitesse de téléchargement de 100 Mbps [6]. Le LTE est considéré comme une technologie 4G. Cette dernière, est développée pour répondre aux exigences du QoS en matière de débit fixées par les futures applications telles que l'accès sans fil à large bande, Service de messagerie multimédia (MMS), le chat vidéo, la télévision mobile etc... [7]

## **I.3 Technologie mobile 5G**

Cette technologie mobile a changé les moyens d'utiliser les téléphones portables à très haut débit comme l'utilisateur n'a jamais fait l'expérience d'une technologie d'une telle valeur depuis son déploiement en 2020. Les réseaux mobiles 5G comprennent tous les types de fonctionnalités avancées, ce qui rend cette norme la plus puissante et la plus demandée [4]. La 5G représente la dernière génération de technologie sans fil, offrant des vitesses de transmission élevées grâce à une fréquence élevée et une large bande passante. Ce réseau combine les meilleures caractéristiques de la 4G avec le système WISDOM, visant à créer un World-Wide Wireless Web (WWW). Bien qu'en opérant sur des distances courtes, la 5G supporte des débits supérieurs à 1 Gbps et s'est vu attribuer le spectre de 30GHz à 300GHz dans cette gamme de fréquences, en répondant ainsi aux exigences croissantes des applications modernes [8].

### **I.3.1 Défi et objectif de la 5G**

Les systèmes de communication mobile de 5G émergent rapidement pour relever les nombreux défis posés par les besoins croissants des utilisateurs actuels et futurs en matière de communications sans fil. Au-delà de l'augmentation du volume de trafic, la 5G doit s'attaquer au défi de connecter des milliards d'appareils aux besoins de service hétérogènes[9].

La gestion des énormes volumes de données générées par les utilisateurs, les applications et les environnements comme les maisons intelligentes et les soins de santé pose des défis majeurs.

Le traitement de ces données à différents niveaux (périphérie, brouillard, nuage) peut provoquer un trafic important et consommer beaucoup de ressources, affectant ainsi la capacité des réseaux cellulaires traditionnels.

Cependant pour répondre à ces défis, il est essentiel de concevoir, de développer et de mettre en œuvre des modèles architecturaux pour produire des systèmes de traitement à la demande et en périphérie, dans le brouillard et dans le nuage, afin de traiter en permanence les données volumineuses [10].

### **Objectifs de la 5G :**

Les principaux industriels et opérateurs du secteur des communications sans fil élaborent actuellement les objectifs et standards de la cinquième génération de réseau mobile (la 5G).

L'étape de standardisation démarrée au sein de différents consortiums d'opérateurs et industriels (3GPP, NGMN...) permettra de mettre en place une réglementation à l'horizon 2020. Le premier objectif

à atteindre concerne le débit montant et descendant alloué à chaque utilisateur afin d'assurer un accès internet haut débit depuis un smart phone ou tablette.

Dans un contexte d'utilisation en mobilité faible ou nulle, le débit visé en bord de cellule par utilisateur est supérieur à 100 Mbit/s et le débit maximum par utilisateur devra dépasser les 10 Gbit/s. Dans un cas d'utilisation en forte mobilité (par exemple, dans le cas de communications entre (véhicules), l'amélioration de l'architecture du réseau devra notamment permettre de réduire la latence de la communication.

L'objectif est d'obtenir un délai de transmission inférieur à 10 ms. Pour d'autres applications de l'IoT (télémédecine, sécurité...), un haut niveau de fiabilité sera également requis. Des modifications majeures dans l'architecture du réseau et l'apport de nouvelles technologies sans fil seront requises dans les réseaux 2G/3G/4G actuels pour atteindre ces objectifs.

Le coût et la consommation énergétique des éléments constituant ce nouveau réseau et le terminaux mobiles associés seront des points décisifs pour parvenir à une solution viable du point de vue économique. [9]

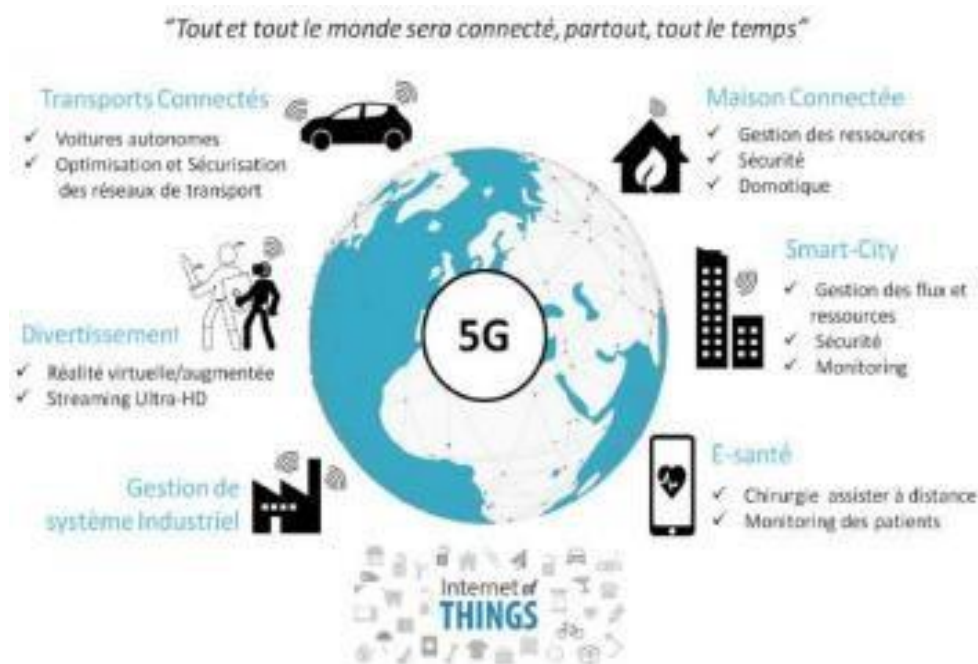


Figure I.1.1 : objectifs de la 5G [9].

### I.3.2 Catégories d'usage de service

La 5G marque une évolution significative dans les technologies de téléphonie mobile, étant la première à être spécifiquement conçue pour des applications au-delà de la voix et des données traditionnelles.

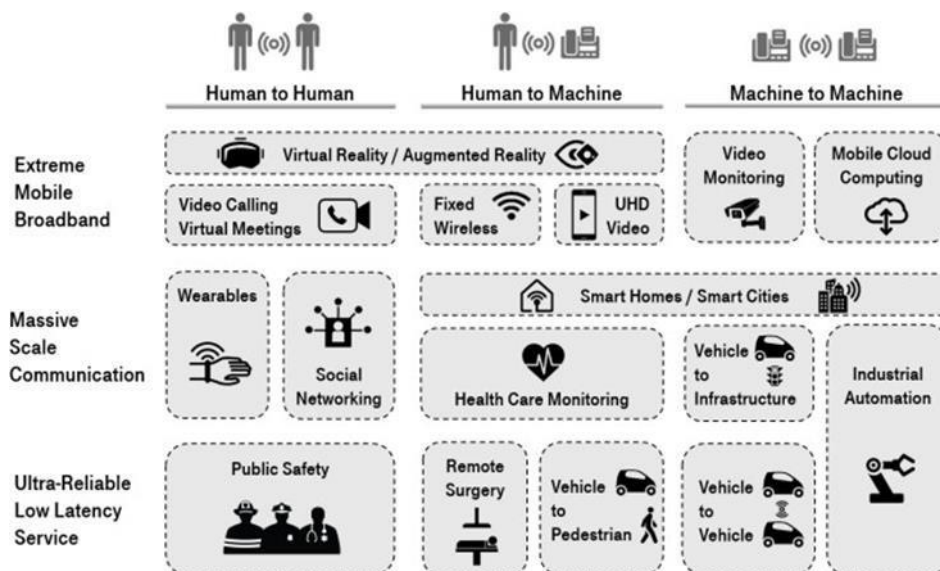


Figure I.2 : Différents domaines d'utilisation de la 5G [11].

Les usages de la 5G peuvent se regrouper en trois principales catégories :

1. **eMBB (enhanced Mobile Broad Band)** : Ce volet vise à offrir des communications mobiles à très haut débit, permettant de répondre à la demande croissante en données mobiles. Il supporte des flux vidéo de qualité supérieure, ainsi que des applications de réalité virtuelle, avec garantie de transferts des données rapides et efficaces.
2. **mMTC (massive Machine Type Communications)** : Cette catégorie concerne les communications entre objets, notamment dans le cadre de l'internet des objets (IoT). Elle vise à gérer un très grand nombre de connexions simultanées (jusqu'à un million par km<sup>2</sup>), avec des exigences de transfert de données limitées mais une capacité de connexion élevée.
3. **uRLLC (ultra Reliable Low latency Communication)** : Ce type de communication est important pour les applications où la fiabilité et la faible latence sont essentielles, comme les véhicules autonomes ou les services de sécurité et d'urgence. Il assure des communications sans faille et une transmission rapide pour garantir des réponses instantanées sans interruption [12].

## I.4 Architecture du réseau 5G

Dans l'ensemble, le système 5G utilise les mêmes éléments de réseau que les générations de services cellulaires précédentes, à savoir un équipement utilisateur (UE), un module d'identification d'abonné (SIM), le réseau d'accès radio (NG-RAN) et le réseau central (5GC), ainsi que représenté dans la figure suivante [13].



Figure I.3 : Aperçu de l'architecture d'un réseau 5G [13].

L'architecture complète de la 5G NR est présentée à la figure ci-dessus. Elle est conforme à la spécification technique du programme de partenariat pour la troisième génération (3GPP TS) 38.300, qui définit les exigences de la technologie. Comme le montre le diagramme, le nœud gNodeB fournit des terminaisons de protocole du plan utilisateur NR et du plan de contrôle à l'équipement utilisateur (UE), tel que les terminaux 5G par exemple, smartphone, tablette ou ordinateur portable. Il est connecté au cœur 5G (5GC) via l'interface NG [14].

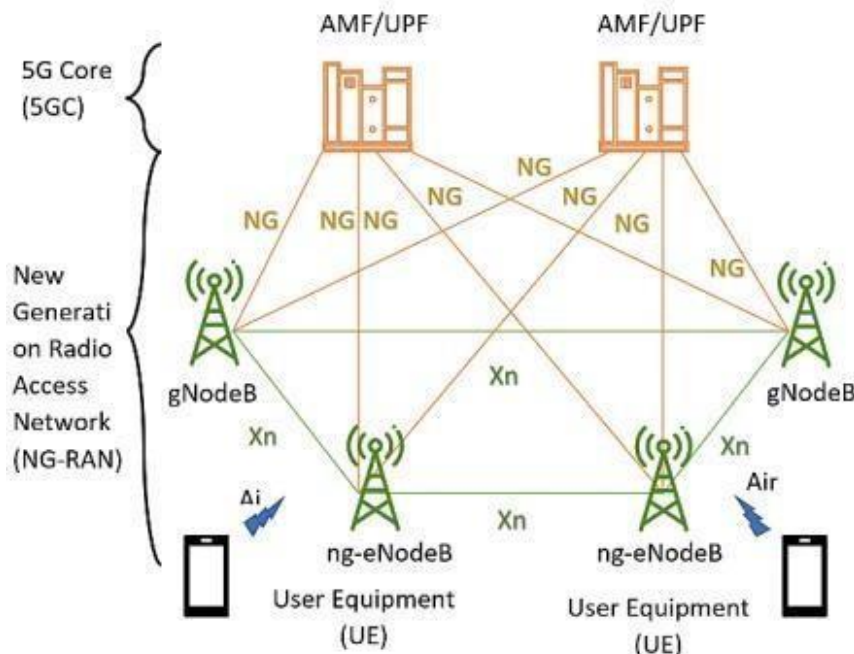


Figure I.4 : L'architecture de la 5G NR conformément à la norme 3GPP TS 38.300 [14].

#### I.4.2 Réseau d'accès :

Le réseau d'accès 5G comprend des stations de base de nouvelle génération qui jouent le rôle du point de connexion entre les appareils mobiles et le cœur de réseau 5G (5GC). Les appareils UE peuvent établir une communication avec ces stations de base via un lien radio 5G ou un lien radio 4G. Lorsque la communication s'effectue en 5G, la station de base est appelée gNB, tandis qu'en 4G, elle est désignée sous le nom d'eNB évoluée pour s'interconnecter avec le cœur réseau 5G, nommée ng-eNB [15].

#### I.4.3 Réseau cœur : NG-CN ou 5GC

Le cœur réseau 5G est conçu pour la virtualisation et repose sur la séparation du plan de contrôle (Control Plane) et du plan utilisateur (User Plane), comme défini dans l'architecture CUPS. En comparaison avec la 4G, dans le cadre de CUPS [15].

Voici comment cela fonctionne :

- Les équipements utilisateurs (UE), tels que les smartphones 5G ou les appareils cellulaires 5G, se connectent via le nouveau réseau d'accès radio 5G au cœur du réseau 5G, puis aux réseaux de données (DN), comme l'internet.
- 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.
- En fonction du service demandé par l'UE, l'AMF sélectionne la fonction de gestion de session (SMF) respective pour gérer la session utilisateur.
- La fonction de plan d'utilisateur (UPF) transporte le trafic de données IP (plan d'utilisateur) entre l'équipement utilisateur (UE) et les réseaux externes.
- La fonction de serveur d'authentification (AUSF) permet à l'AMF d'authentifier l'UE et d'accéder aux services du noyau 5G.
- D'autres fonctions telles que la fonction de gestion de session (SMF), la fonction de contrôle de politique (PCF), la fonction d'application (AF) et la fonction de gestion unifiée des données (UDM) fournissent le cadre de contrôle de politique, en appliquant les décisions de politique et en accédant aux informations d'abonnement, pour régir le comportement du réseau.

Comme vous pouvez le constater, l'architecture du réseau 5G est plus complexe en coulisses, mais cette complexité est nécessaire pour fournir un meilleur service qui peut être adapté au large éventail de cas d'utilisation de la 5G [16].

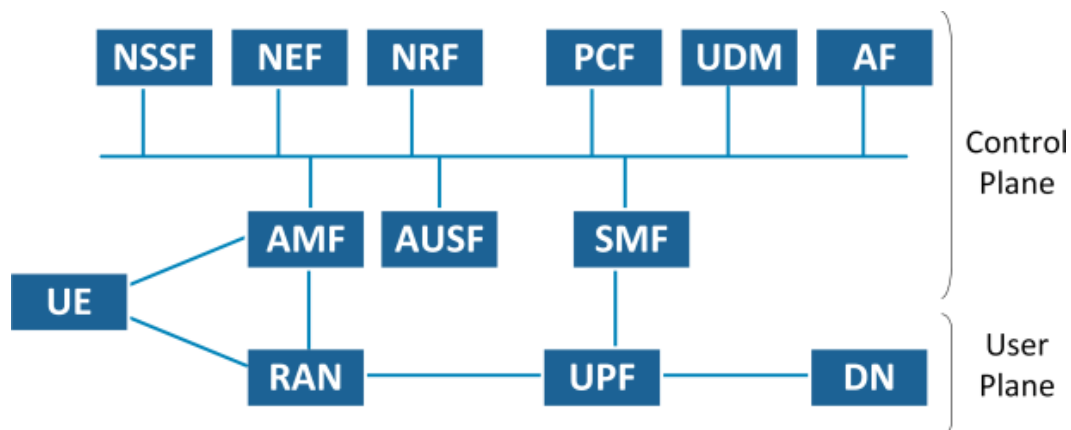


Figure I.5 : L'architecture du réseau 5G point à point [13].

#### I.4.4 l'architecture du réseau standalone(SA) et non-standalone(NSA)

L'architecture des réseaux 5G peut être comprise en faisant la distinction entre les modes standalone (SA) et non- standalone (NSA) [17].

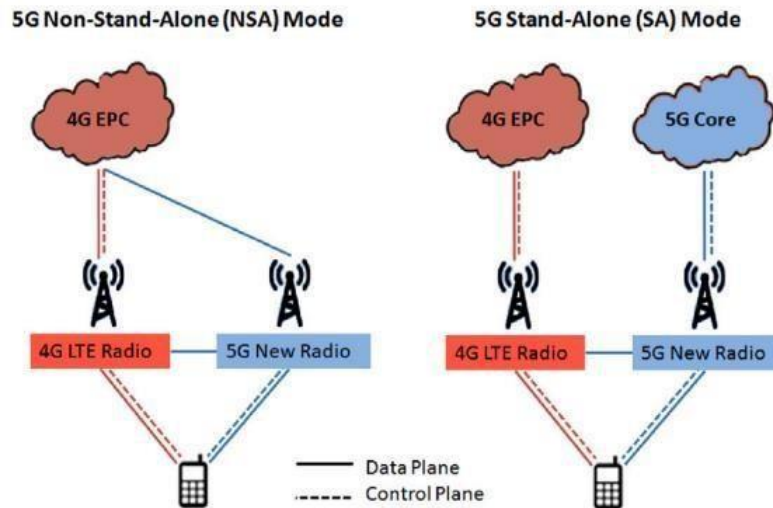


Figure I.6 : Déploiement de la 5G Modes NSA et SA [1].

#### Architecture du réseau non-standalone (NSA)

Le mode "Non-Stand Alone" (NSA) de la 5G permet d'intégrer la technologie New Radio (NR) 5G au réseau LTE existant sans le remplacer entièrement. Dans ce mode, seuls les services 4G sont disponibles, mais ils bénéficient des capacités améliorées de la 5G, telles qu'une réduction de la latence. C'est une approche intermédiaire visant à offrir des débits de données plus élevés en intégrant de nouveaux composants du réseau d'accès radio (RAN) 5G dans les infrastructures LTE existantes[17].

#### Architecture du réseau standalone (SA) :

L'architecture réseau autonome (SA) de la 5G fonctionne indépendamment sans nécessiter de soutien externe pour ses fonctions de base. Elle transforme les réseaux 4G en permettant des applications mobiles avancées, améliorant l'efficacité et le débit tout en facilitant de nouveaux usages comme les communications ultra-fiables à faible latence (URLLC) [18].

### I.5 Nouveaux standards radio

#### I.5.1 Bandes de fréquences

Selon le 3GPP, les technologies 5G utilisent différentes parties du spectre de fréquences. Par exemple, les fréquences mmWave sont dédiées aux communications à courte portée dans la 5G mobile, avec une bande passante considérablement plus large, des débits de données plus élevés, et une capacité de compenser les pertes de signal grâce à l'agrégation de porteuses. En revanche, les bandes de fréquences de la 5G sans fil sont regroupées en deux catégories, FR1 et FR2 [19]. La bande FR1 est une des plages de fréquences dans lesquelles la technologie 5G



fonctionne avec une couverture initiale des fréquences inférieures à 6 GHz, mais avec des attributions de spectre supplémentaires, elle s'étend désormais jusqu'à 7,125GHz. Les fréquences de cette bande vont de 410 MHz à 7,125 GHz et sont principalement utilisées pour gérer la majorité du trafic des réseaux mobiles cellulaires traditionnels [20].

Tandis que la bande de fréquences FR2 (24,25 GHz à 52,6 GHz) est axée sur les capacités de débit de données à courte portée et à haut débit [19].

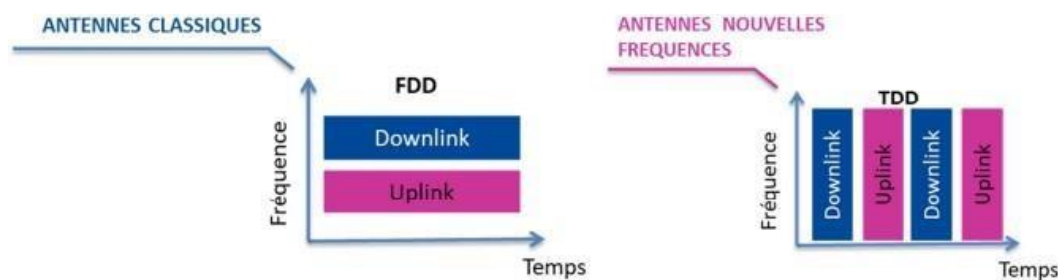
Ces gammes ne sont pas statiques et peuvent être étendues ou complétées par de nouvelles gammes dans les futures versions du 3GPP. Le tableau 1 donne un aperçu des désignations de fréquences et une division détaillée des bandes de fréquences en bandes basses, moyennes et hautes selon Ericsson [21].

Frequency Range Designation	Frequency Band	Existing/New	Frequency Range [MHz]
FR1	Low Bands	Existing/New	410–960
	Mid Bands I	Existing	1000–2600
	Mid Bands II	New	3300–7125
FR2	High Bands	New	24,250–52,600

**Tableau II.2** : Aperçu des gammes de fréquences et des bandes de la 5G [21].

### I.5.2 mode de duplexage déployé

Le duplexage est le processus de transmission des données dans les deux directions : du point d'accès (antenne relais) vers l'utilisateur (sens descendant :downlink), et de l'utilisateur vers le point d'accès (sens montant : uplink) [12].



**Figure I.7** : Illustration du duplexage fréquentiel ou temporel [12].

Dans le domaine des communications 5G, deux modes importants de duplexage sont utilisés pour optimiser l'utilisation du spectre et répondre à diverses exigences de service : le duplexage par répartition dans le temps (TDD) et le duplexage par répartition en fréquence (FDD). Le TDD offre une flexibilité et une utilisation efficace du spectre, permettant une planification indépendante des liaisons montantes/descendantes au sein de chaque cellule [22]. Mais entraîne des interférences entre antennes et entre terminaux qui nécessitent de mettre en place des techniques spécifiques pour y remédier.



Pour cela trois solutions techniques sont proposées pour permettre la coexistence de plusieurs utilisateurs exploitant des réseaux TDD dans des bandes de fréquences adjacentes :

- La synchronisation des réseaux, qui requiert l'utilisation d'un format d'émission commun par tous les opérateurs ;
- L'utilisation de bandes de garde et de filtres spécifiques par opérateur ;
- La séparation spatiale des émetteurs (séparation géographique).

Le duplexage temporel TDD signifie que pendant les périodes de « Uplink », les antennes cessent d'émettre, ce qui réduit l'exposition aux ondes émises par le réseau à zéro durant ces intervalles. Tandis qu'un duplexage fréquentiel, dit FDD, s'agit d'un mode de circulation à double sens, chaque voie à sa bande de fréquences réservée. Des blocs de fréquences sont ainsi réservés pour les transmissions downlink et d'autres pour les transmissions uplink. Dans les bandes de fréquences déjà allouées à la téléphonie mobile, la 5G continuera d'utiliser ce duplexage FDD, fondé sur une séparation en fréquences [12].

### I.5.3 Structures de la trame 5G NR :

Il est souhaitable de pouvoir adapter et optimiser efficacement les ressources radio pour chaque utilisateur en fonction de ses exigences de service. Cela nécessite, entre autres, une structure de trame très flexible. En termes de fréquence, la trame 5G utilise des bandes de fréquence plus larges et une modulation avancée comme la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), permettant une meilleure efficacité spectrale en répartissant les données sur plusieurs sous-porteuses orthogonales [23].

La longueur de la trame dans la 5G NR est fixée à 10 ms, et il y a dix sous-trames dans chaque trame. Chaque sous-trame comprend  $N_{slot}^{subframe,\mu} = 2^\mu$  slots (  $\mu$  représente la configuration de l'espacement des sous-porteuses), et chaque slot comprend deux types différents de CP : normal CP (14 OFDM symboles) and CP étendu (12 OFDM symboles). Dans le domaine des fréquences, un bloc de ressources est défini comme 12 sous-porteuses consécutives. L'espacement des sous-porteuses  $\Delta f$  est flexible et dépend de  $\mu$ , c'est-à-dire :  $\Delta f = 15 \times 2^\mu \text{KHz}$  [24].

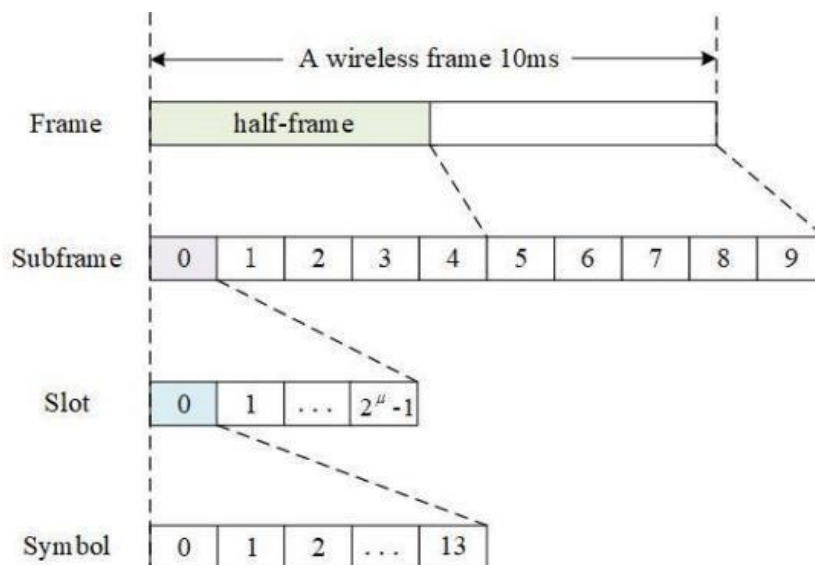
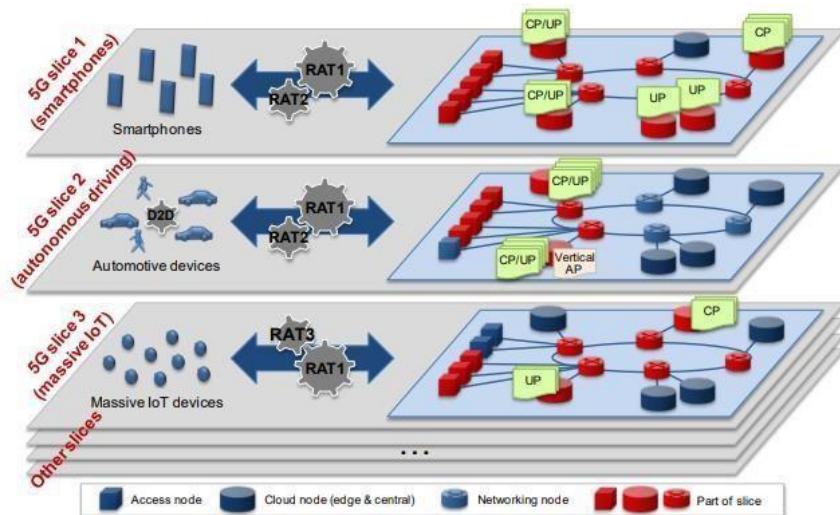


Figure I.8 : Structure de la trame 5G NR [24].

## I.5.4 Découpage réseau

Le découpage de réseau ou « network slicing », vise à configurer des tranches du réseau adapté à chaque type de communication plutôt que de réserver statiquement toutes les ressources du réseau pour tous les cas d'utilisation. Chaque tranche du réseau, regroupe des fonctions réseau 5G et des paramètres RAT spécifiques pour répondre aux besoins d'un cas d'utilisation donné ou d'un modèle commercial. Cette approche permet à l'opérateur de configurer dynamiquement ces tranches de réseau pour répondre de manière efficace aux besoins variés et spécifiques du marché ce qui favorise la flexibilité et la personnalisation des services [25].



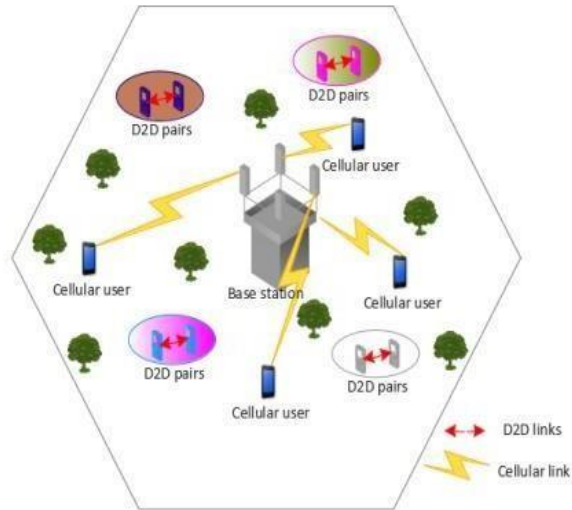
**Figure I.9 :** Découpage de réseau 5G [25].

La **figure I.9** illustre le principe du Network Slicing du réseau 5G. Dans cet exemple, trois tranches sont définies dont la tranche 1 pour les communications eMBB, la tranche 2 pour les applications de conduite automatisée pour des communications machine à machine (D2D) et la tranche 3 pour les communications massives d'objets (mIoT). Pour chaque tranche, une configuration spécifique du réseau d'accès (RAT, Radio Access Technology) est utilisée.

Les fonctions réseau du plan utilisateur (UP, User Plan) et du plan de contrôle (CP, Control Plan) au niveau du coeur sont sollicitées différemment selon la tranche considérée [26].

## I.6 Différentes techniques d'accès utilisées :

L'un des principaux besoins de toute mise en œuvre du réseau de la 5G est de pouvoir gérer l'augmentation mondiale du nombre d'utilisateurs équipés d'appareils compatibles avec la dernière génération, avec un débit de données amélioré. La 5G a été conçue pour atteindre une efficacité spectrale supérieure à celle obtenue avec la 4G. Plusieurs technologies émergentes ont été proposées pour améliorer l'efficacité spectrale dans la 5G, à savoir la communication d'appareil à appareil (D2D), la communication par lumière visible (VLC) et les réseaux ultra-denses (UDN) ... etc. [27]

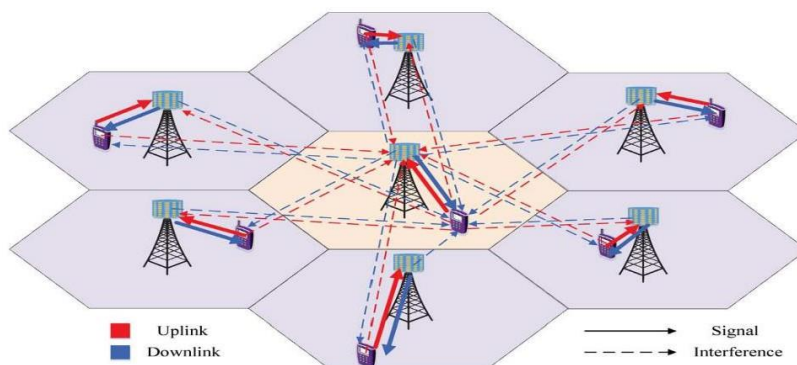


**Figure I.10** : Réseau D2D [25].

La communication réseau D2D implique une communication directe entre deux utilisateurs mobiles en contournant la station de base. Cette communication directe contribue à réduire les délais, à obtenir des débits binaires relativement plus élevés et à réduire la consommation d'énergie en raison de la proximité de la communication. La **Figure I.10** montre un réseau D2D typique avec des paires de liaisons D2D et des liaisons d'utilisateurs cellulaires. Un réseau D2D typique comprend des paires D2D, des utilisateurs cellulaires et une station de base. Dans un tel système, un D2D peut communiquer avec ses paires en contournant la station de base, comme le schéma. Le réseau cellulaire traditionnel implique une communication entre un appareil cellulaire et la station de base [27].

### I.6.1 Massive MIMO

Pour activer pleinement la 5G, une combinaison de capacités multi-bandes passantes et de massive MIMO est impérative. Ceci est possible avec un système d'antenne qui prend en charge toutes les bandes. L'antenne est donc au cœur de l'architecture 5G [12]. Les systèmes MIMO utilisent un grand nombre d'antennes au niveau de la station de base pour desservir plusieurs utilisateurs simultanément, ce qui permet d'obtenir un gain de réseau significatif et d'améliorer l'efficacité spectrale [28].

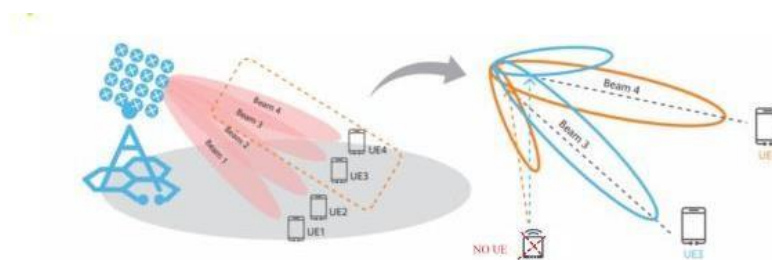


Pendant les technologies de communication mobile continuent d'évoluer, la capacité des réseaux sans fil et la qualité des communications sont devenues de plus en plus critiques. Les systèmes de communication sans fil traditionnels se limitent à répondre aux exigences de l'industrie moderne en matière de communication à grande vitesse, de grande capacité et de haute qualité. La technologie massive MIMO est apparue comme une solution prometteuse pour relever ces défis. Cette dernière est une extension de la technologie MIMO conventionnelle. Contrairement à la configuration typique de dix antennes dans les systèmes MIMO traditionnels pour la transmission et la réception des signaux, la technologie MIMO massive déploie beaucoup plus d'antennes, par exemple des centaines, voire des milliers d'antennes [28].

Massive MIMO et Beamforming sont des jargons couramment utilisés dans le secteur des télécommunications lorsqu'on parle de la 5G et des dernières avancées LTE. Autrement dit, le Beamforming est utilisé dans mMIMO ou est un sous-ensemble de mMIMO [13].

## I.6.2 Beamforming :

Beamforming est une procédure qui dirige la majorité des signaux générés par un ensemble d'antennes d'émission vers une direction angulaire souhaitée. Plus précisément, le beamforming envoie le même symbole sur chaque antenne d'émission avec un facteur d'échelle pondéré. À la réception, tous les signaux reçus sont combinés de manière cohérente en utilisant un facteur d'échelle différent pour maximiser le rapport signal sur bruit (SNR) reçu [29].



**Figure II.11** : Principe du beamforming [13].

Le Beamforming est une technologie de base des réseaux 5G déployés dans le monde entier pour les smartphones et autres applications de réseaux étendus. Étant donné que les fréquences 5G fonctionnent sur la longueur d'onde millimétrique (mmWave), elles sont plus sensibles aux interférences provenant d'éléments tels que les murs et autres obstacles. Le Beamforming 5G peut également exploiter les avantages de la diversité et du multiplexage de la transmission basée sur MIMO pour offrir un débit plus rapide et une réception du signal plus fiable au niveau du récepteur, ce qui se traduira par une meilleure expérience utilisateur globale [13]. Le Beamforming au sein de la 5G est une fonctionnalité plus dynamique qui fonctionne avec MIMO. La direction du faisceau peut changer et réagir à la demande et/ou suivre un utilisateur ayant une forte demande [13].

## I.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons exploré les généralités des réseaux mobiles et l'évolution vers la 5G, ainsi que les défis et objectifs qui y sont associés. Nous pouvons constater que cette transition représente bien plus qu'une simple mise à jour technologique. La 5G ouvre la voie à de nouvelles possibilités et à des catégories d'usage diversifiées, allant des communications ultra-fiables à faible latence à l'internet des objets massif. Pour ensuite détailler l'architecture en tous ses aspects et avec ses exigences en termes de performances pour répondre aux exigences croissantes de la connectivité du futur. Et nous finissons avec les nouveaux standards et les différentes technologies utilisées pour bien mener le fonctionnement de la 5G.

# *Chapitre 2*

## **II.1 Introduction**

Dans le développement constant des systèmes de communication, l'évolution des réseaux 5G a marqué une étape significative, promettant une connectivité ultra-rapide et une multitude de services innovants. Au cœur de cette technologie réside le concept de multi-numérologie, une approche novatrice permettant d'optimiser les performances en adaptant les paramètres de transmission aux exigences spécifiques de chaque service.

Cependant, malgré les avancées impressionnantes, les systèmes de communication restent confrontés à de nombreux défis, parmi lesquels les interférences occupent une place prépondérante. Ces interférences, qu'elles soient d'origine externe ou interne au réseau, peuvent perturber la transmission des données.

Il est donc essentiel de concevoir des systèmes efficaces de gestion des interférences graves et parfois imprévisibles, afin de les atténuer dans les réseaux mobiles.

## **II.2 Différentes formes d'interférences**

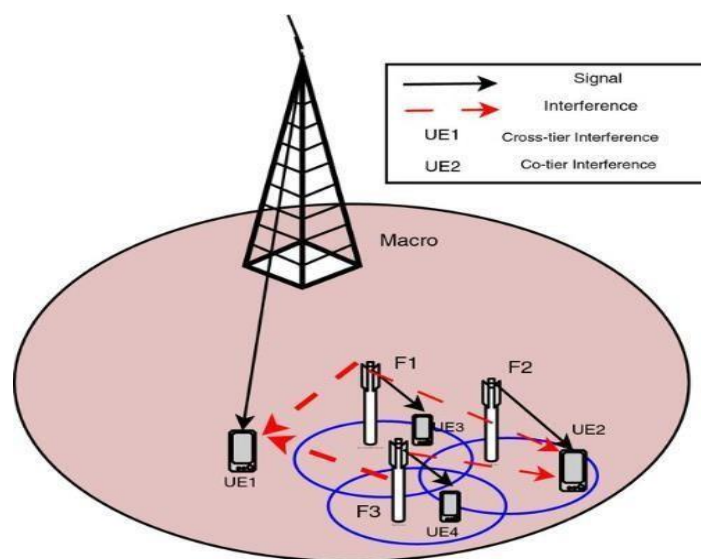
Le terme « interférence » est couramment utilisé pour décrire l'ajout de signaux non intentionnels à un signal souhaitable. Il peut être causé, par exemple, par la réutilisation des ressources temps-fréquence de différentes stations de base ou dispositifs d'utilisateurs, ou par la fuite involontaire d'un signal d'émission. Le brouillage est l'un des facteurs les plus importants qui, s'il n'est pas correctement atténué, peut entraîner une détérioration considérable des performances. Malgré les avantages inévitables de toutes les technologies clés de la 5G présentées précédemment, la variabilité et la flexibilité de la 5G pourraient introduire une non-orthogonalité dans le réseau et générer des interférences conséquentes. [1]

### **II.2.1 Interférences intercellulaires**

L'interférence intercellulaire (ICI) est un problème classique pour les réseaux cellulaires mobiles. En raison de la rareté des ressources spectrales, les fréquences doivent être réutilisées entre les différentes cellules, ce qui rend l'interférence intercellulaire indispensable. Le niveau d'interférence intercellulaire dans les réseaux cellulaires dépend de divers facteurs, tels que la topologie des cellules, le schéma de réutilisation des fréquences, la puissance de transmission et les technologies d'accès multiple. Au fur et à mesure que les réseaux cellulaires mobiles évoluent de la deuxième génération (2G) à la cinquième génération (5G), l'ICI devient de plus en plus grave, ce qui exige de rechercher sans relâche une plus grande efficacité du spectre et des cellules plus densément déployées. Par exemple, les largeurs de bande des systèmes 2G, 3G et 4G typiques tels que le système mondial de communications mobiles (GSM), l'accès multiple par répartition en code à large bande (WCDMA) et l'évolution à long terme (LTE) sont respectivement de 200 kHz, 5 MHz et 20 MHz [30].

### II.2.1.1 Les interférences co-tier et cross-tier

En général, deux types d'interférences intercellulaires peuvent dégrader les performances des réseaux hétérogènes : les interférences entre les entités d'un même niveau ou les interférences entre les entités de différents niveaux du réseau : interférences inter-niveau « **cross-tier** » et interférences intra-niveau « **co-tier** ». Cette dernière se produit entre les éléments du même niveau dans un réseau. Elle résulte des émissions montantes des équipements utilisateur des femtocells vers les stations de base et des émissions descendantes des stations de base vers les femtocells et pour la réduire, une allocation efficace des sous-canaux est nécessaire. En revanche, l'interférence « cross-tier » se produit entre les éléments de niveaux différents, comme les femtocells et les macrocells. Elle engendre des émissions montantes et descendantes entre ces éléments [31].



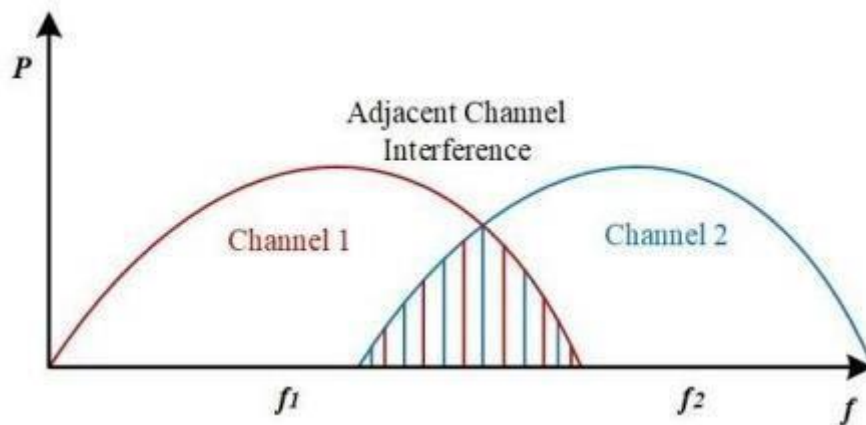
**Figure II.1** : Interférences co-tier et cross-tier dans le réseau à petites cellules [32].

Par exemple, dans la figure ci-dessus, l'UE2 est desservi par la station de base Femto (F2) mais il reçoit des interférences des stations de base Femto voisines (F1 et F3). Tandis que l'UE1 est desservi par la station de base macro, mais il reçoit des interférences des petites cellules (c'est-à-dire les cellules femto F1, F3) [32].

### II.2.1.2 Les interférences du canal adjacent (ACI) :

Souvent, les interférences intercellulaires sont dues soit au fonctionnement sur le même canal, ce qui est appelé interférence entre canaux (CCI), soit au chevauchement entre canaux adjacents, ce qui est appelé interférence entre canaux adjacents (ACI). L'interférence entre canaux adjacents est principalement due à l'imperfection des filtres des récepteurs, qui permet aux fréquences adjacentes d'entrer dans la bande passante, et à la non-linéarité des amplificateurs. L'un des problèmes critiques des réseaux OFDM est l'importance des émissions hors bande qui entraînent d'importantes interférences. Le problème de la coexistence des canaux adjacents étant relativement courant dans les réseaux mobiles, les régulateurs ont déjà établi des règles strictes concernant les fuites dans les canaux adjacents et les émissions indésirables dans la bande de fonctionnement afin de limiter l'ACI [17].

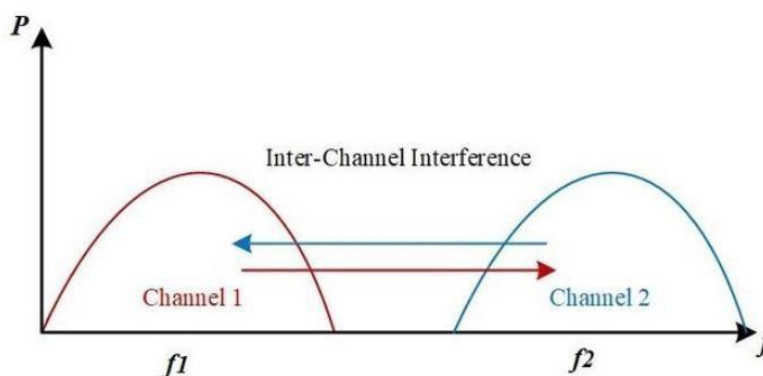




**Figure II.2** : Interférence du canal adjacent [33].

### II.2.1.3 Les interférences entre les canaux (CCI) :

L'interférence entre les canaux, se produit lorsque deux bandes de fréquences distinctes provoquent des interférences l'une avec l'autre, comme le montre la figure. En raison de la proximité physique, l'émetteur d'un signal puissant interfère avec le récepteur d'un signal faible. Dans un réseau en direct, les interférences entre canaux sont parfois inévitables, même lorsque les canaux des appareils mobiles sont de plusieurs milliers de mégahertz (MHz). Un exemple pratique serait un dispositif sans fil tel que le GPS, le Wi-Fi et le Bluetooth fonctionnant sur différents canaux BW ; cependant, la large gamme de puissances d'émission et de réception de ces dispositifs crée divers problèmes d'interférence tels que l'interférence inter-canal [33].



**Figure II.3** : Interférence entre les canaux [33].

### II.2.2 Interférences intra cellulaires :

Dans les réseaux 5G et au-delà, le multiplexage de plusieurs numéologies, l'utilisation de la même ressource temps/fréquence pour desservir deux ou plusieurs utilisateurs dans la même cellule via NOMA, SDMA et d'autres schémas d'accès multiple, et le déploiement d'émetteurs-récepteurs In-Band-Full-Duplex, peuvent provoquer de fortes interférences

intracellulaires, en plus des interférences intercellulaires très bien connues. Les interférences intracellulaires peuvent être classées en trois catégories : Auto-interférence (ou self interférence SI) - également appelée interférence intra-système : qui peut être défini comme un brouillage directement généré par l'émetteur sur l'antenne du récepteur dans le même dispositif et peut entraîner la dégradation la plus importante des performances du récepteur, par rapport à d'autres signaux de brouillage. Par conséquent, l'auto-brouillage doit être réduit au minimum, au plus en dessous du niveau de puissance de bruit du récepteur, inter-Numérologie Interférence (INI) qui se matérialise sous la forme d'interférences entre les porteuses et entre les symboles et due à la multi numérogie, Multi-User Interference (MUI) [1].

### II.2.2.1 Interférences entre les faisceaux IBI :

Ce genre d'interférence peut se produire entre deux faisceaux différents (interférence entre faisceaux) ou entre différents utilisateurs couverts par le même faisceau (intra interférence entre faisceaux) [1].

La formation de faisceaux (Beamforming) est une nouvelle technologie utilisée dans les communications cellulaires modernes. Il s'agit d'une technique qui identifie le meilleur itinéraire et fournit un débit optimal à un utilisateur particulier dans une direction donnée. Cette approche est essentielle pour compenser les pertes d'atténuation lors de la transmission du signal de message, en particulier dans les communications à ondes millimétriques. La station de base génère de multiples faisceaux étroits d'énergie RF dans toutes les directions de la zone de couverture. Cependant, la division de l'espace de plusieurs faisceaux introduit des interférences entre faisceaux (IBI). Elle est causée par les faisceaux adjacents de la station de base de la même cellule ou de la cellule voisine, comme le montre la figure suivante [33].

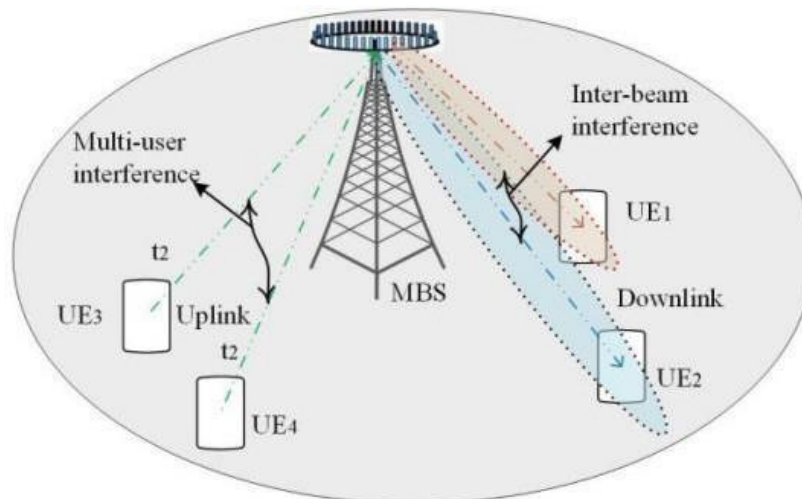


Figure II.4 : Interférence entre faisceaux [33].

### II.3 L'impact des interférences :

La conception d'une gestion appropriée des interférences a toujours été un facteur clé dans les réseaux cellulaires mobiles. Cela reste le cas dans les réseaux cellulaires 5G et au-delà, où la flexibilité a un coût. Les systèmes de gestion des interférences existants constituent un bon point de départ pour apporter des améliorations afin de s'adapter à un réseau aussi dense et dynamique. : Par exemple, les effets de l'ACI peuvent être réduits

- (i) en choisissant soigneusement le filtre passe-bande au niveau du récepteur,
- (ii) en utilisant des schémas de modulation et des techniques de traitement du signal avancés,
- (iii) en attribuant une bande de garde
- (iv) en attribuant des canaux adjacents aux cellules situées dans des régions géographiques différentes [1].

### II.4 Interférences inter-numérologie

La vision de la cinquième génération (5G) de la technologie sans fil va bien au-delà de simplement améliorer les services à large bande. Elle envisage un réseau beaucoup plus diversifié, offrant une couverture sans faille, des débits de données plus élevés, une gamme de services variée, une connectivité massive et une fiabilité bien supérieure à ce que proposent les générations précédentes de communication mobile. Par rapport à LTE, la 5G promet une augmentation significative du volume de données et du nombre d'appareils connectés par zone, une amélioration des débits de données des utilisateurs jusqu'à 100 fois plus rapides, une réduction de la consommation d'énergie jusqu'à un facteur de 10, et une diminution de la latence jusqu'à un cinquième de son niveau actuel [34]. Parmi les différentes classes de services définies pour la 5G, on trouve l'eMBB, le mMTC et l'URLLC. Chacun de ces scénarios a ses propres exigences spécifiques, ce qui signifie que la 5G doit répondre à une large gamme de besoins. Cela souligne l'importance d'une conception radio et réseau hautement flexible pour la 5G [35].

Afin de répondre à ces diverses exigences des services 5G, deux approches principales ont été proposées par les chercheurs. Premièrement, proposition de nouvelles formes d'onde pour la radio 5GNew (5G-NR) et deuxièmement, en utilisant différentes numérolgies de la même forme d'onde parente, le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM), où le terme numérolgie fait référence aux différentes configurations d'espacement des sous-p porteuses ( $\Delta f$ ) et de durée du préfixe cyclique (CP) d'un symbole OFDM [36]. La 5G-NR adopte l'approche d'utiliser plusieurs numérolgies OFDM pour répondre à divers besoins. Un total de cinq options de numérolgies évolutives sont fournies, avec la numérolgie LTE conventionnelle (avec  $\Delta f = 15$  kHz) choisie comme numérolgie fondamentale. Par "évolutif", nous entendons que toutes les  $\Delta f$  normalisées sont des multiples de  $2\mu$  de la numérolgie LTE fondamentale (pour  $\mu = [0,4]$ ). Une raison fondamentale de choisir cet ensemble de numérolgies avec un espacement de sous-porteuse évolutif est de faciliter l'alignement des symboles et la synchronisation des horloges dans le domaine temporel, simplifiant ainsi la mise en œuvre [37].

Nous pouvons intuitivement comprendre comment différentes numériques peuvent être utilisées pour répondre aux exigences de chaque classe de service de la 5G. Par exemple, des numériques plus basses (en termes de  $\Delta f$ ) sont plus adaptées pour le mMTC, car elles peuvent prendre en charge un plus grand nombre d'appareils connectés simultanément dans la même largeur de bande et nécessitent moins de puissance. Les numériques intermédiaires conviennent mieux à l'eMBB, qui nécessite à la fois un débit de données élevé et une bande passante significative, tandis que des numériques plus élevées sont plus adaptées aux applications sensibles à la latence liées au service URLLC en raison de leur durée de symbole plus courte. Il est important de noter que la sélection des numériques ne dépend pas uniquement du service à prendre en charge ; d'autres facteurs tels que la taille de la cellule, la variation temporelle du canal, la dispersion des retards, la bande de fréquence d'exploitation, etc., doivent également être pris en compte dans le choix d'une numérique [38].

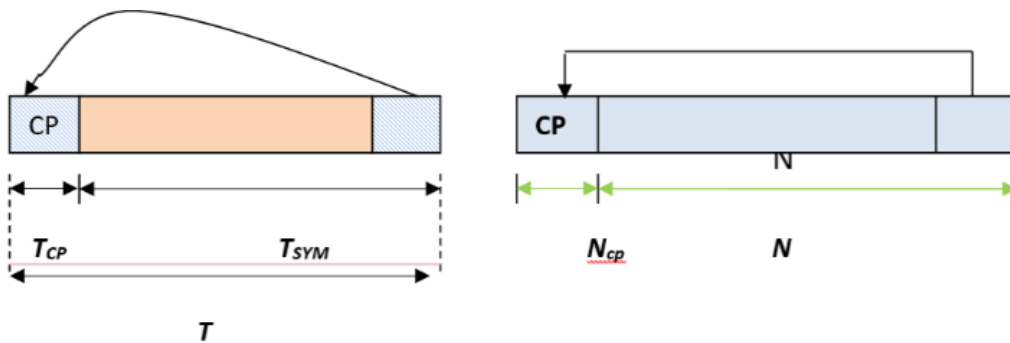
Paramètres	$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 4$
SCS (KHz)	15	30	60	120	240
Symboles OFDM( $\mu s$ )	66.67	33.33	16.67	8.33	4.17
CP( $\mu s$ )	4.69	2.34	1.17	0.58	0.29
durée d'un slot( $\mu s$ )	1	0.5	0.25	0.125	0.0625

**Tableau II.1** : Structures de numéologie pour les canaux de données en 5G [36].

L'utilisation de différentes numériques dans les systèmes multiplexés crée une interférence entre elles, connue sous le nom d'interférence inter-numéologie (INI). C'est un défi à résoudre pour assurer le bon fonctionnement du système. Dans les systèmes à numéologie unique comme le LTE, les interférences intracellulaires sont généralement définies par les interférences inter-porteuses et inter-symboles. Cependant, ces types d'interférences ne suffisent pas à expliquer toutes les perturbations dans les systèmes multi-numéologies comme la 5G. L'utilisation de plusieurs numériques, bien qu'offrant une flexibilité accrue pour les divers services, perturbe le principe d'orthogonalité des systèmes à numéologie unique, entraînant ainsi des interférences entre les différentes numériques, connues sous le nom d'interférences inter-numéologies. Pour exploiter pleinement le concept de multi-numéologie, il est essentiel d'analyser le modèle d'interférence et d'identifier les divers facteurs contribuant à l'interférence inter-numéologie (INI). Des études récentes ont montré que l'INI dépend de plusieurs paramètres tels que l'espacement des sous-porteuses, le nombre de sous-porteuses, la bande passante de chaque numérique, le décalage de puissance entre les numériques, l'étalement Doppler, etc [39].

### II.4.1 Préfixe cyclique (CP)

Le préfixe cyclique (CP) est une technique qui implique l'insertion d'une copie d'un bloc d'information à transmettre (un symbole OFDM) en amont de la trame, il fonctionne en créant une convolution circulaire entre le symbole OFDM transmis et la réponse impulsionnelle du canal. Cela signifie que le symbole OFDM reçu peut être exprimé comme une convolution linéaire du symbole OFDM d'origine et de la réponse impulsionnelle du canal, plus un peu de bruit additif, un égaliseur fréquentiel simple peut être utilisé dans le récepteur OFDM afin de récupérer les données transmises.



**Figure II.5 :** Préfixe cyclique [40].

La base du CP en NR est similaire à LTE. La conception du CP garantit l'alignement des symboles entre les différentes valeurs SCS et la numérogie de référence (15 kHz). Par exemple,  $\mu = 30\text{kHz}$  un seul créneau a environ 14 symboles réside dans 0,5 milli de seconde, y compris les CP pour chaque symbole et  $\mu = 60\text{Khz}$  un seul créneau a environ 28 symboles, y compris les CP pour chaque symbole dans le même 0,5 milliseconde. Donc, ici, la longueur de CP est adaptée en fonction de l'espacement des sous-porteuses.

Le préfixe cyclique d'un symbole OFDM, qui répète la fin du symbole au début, est utilisé dans les systèmes sans fil pour contrer les effets de la propagation par trajets multiples. Le récepteur est configuré pour rejeter les échantillons du CP, améliorant ainsi la robustesse du signal en réduisant les interférences et en facilitant la synchronisation. Un des paramètres les plus critiques et caractéristiques de l'OFDM est le CP qui permet de convertir la convolution linéaire du canal sans fil et du signal en une convolution circulaire. Lorsque la longueur du CP est déterminée aussi grande que le délai de propagation, une transmission sans ISI est garantie. Par conséquent, le taux de CP offre directement une robustesse contre l'effet de dispersion temporelle du milieu sans fil. De plus, il permet de compenser les erreurs de synchronisation tant que l'erreur est inférieure à la durée du CP [40].

## II.4 .2 Le modèle de système MN-OFDM

L'OFDM est un procédé de modulation qui consiste à répartir un train binaire à haut débit sur N sous-canaux orthogonaux à bas débit et L'adoption des techniques multi-porteuses à numérogie mixte (MN-MC) dans les systèmes de communication 5G et au-delà apporte une flexibilité accrue pour la prise en charge de services hétérogènes. Cependant, l'intégration de numérogies mixtes compromet l'orthogonalité des sous-porteuses, essentielle dans les systèmes SN-OFDM à numérogie unique, où les sous-porteuses se chevauchent de manière uniforme.

- **Notion d'orthogonalité :**

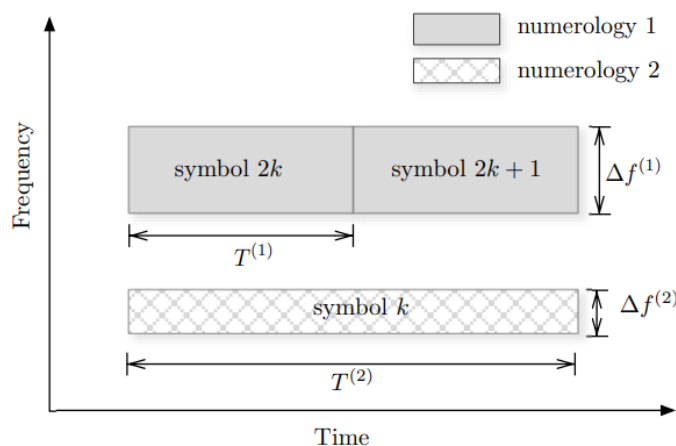
L'orthogonalité est la propriété fondamentale qui permet de transmettre des signaux d'informations multiples dans un même canal et de les détecter sans interférence. Pour la clarté et la simplicité des dérivations, sans perte de généralité, nous considérons un modèle de signal avec deux numérogies, à savoir la numérogie 1 et la numérogie 2<sup>(1)</sup>. L'espacement des sous-porteuses  $\Delta f^{(i)}$ , et le symbole de la durée  $T^{(i)}$  associé à la numérogie  $i$ ,  $i = \{1, 2\}$ , sont liés l'un à l'autre via un facteur d'échelle  $\nu$  :

$$\frac{\Delta f^{(1)}}{\Delta f^{(2)}} = \frac{T^{(2)}}{T^{(1)}} = \nu \quad (\text{II.1})$$

Sans perte de généralité, nous supposons :  $f^{(1)} < f^{(2)}$

Ce qui conduit à un facteur d'échelle supérieur à 1, c'est-à-dire :  $2^u, u \in \{1, 2, \dots\}$

La figure ci-dessus illustre la relation temps fréquence avec deux numérogies pour le cas  $\nu = 2$  dont  $\Delta f^{(1)} = 2\Delta f^{(2)}$  et  $T^{(2)} = 2T^{(1)}$  et le symbole  $k$  associé avec la numérogie 2 chevauche deux symboles indexés à  $2k$  et  $2k + 1$  associés à la numérogie 1.





- **Modulateur et démodulateur OFDM :**

Tel que : le schéma (a) représente de la **Figure II.7** : Modulateur OFDM multi-numérologique. Le schéma (b) représente : Démodulateur OFDM multi-numérologique. Le signal transmis pour la numérogie i peut alors être exprimé comme suit :

$$x^{(i)} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k^{(i)}(t) ; \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Ou : } x_k^{(i)}(t) = \sum_{m=0}^{N^{(i)}-1} s_{k,m}^{(i)} \phi_m^{(i)}(t - kT^{(i)}) \quad (\text{II.3})$$

$x_k^{(i)}(t)$  : Est le signal transmis correspondant à l'instance k.

$N^{(i)} = B / \Delta f^{(i)}$  : est le nombre de sous-porteuses associées à la numérogie i, B représentant la largeur de bande globale du système.

$\phi_m^{(i)}(t)$  : est une impulsion rectangulaire normalisée et décalée en fréquence,

Définie comme suit :

$$\phi_m^{(i)}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T^{(i)}}} \exp(j2\pi \frac{m}{T^{(i)}} t) & 0 \leq t \leq T^{(i)} ; \\ 0 & \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Le signal transmis  $x(t)$  est alors obtenu en multiplexant les signaux d'unique numérogie tronqués ou concaténés, associés aux deux différentes numérogies. Le signal mixte prend des formes différentes pour la numérogie 1 et 2 en ce qui concerne leur propre durée de symbole respective. Plus précisément, le signal  $x(t)$  sur l'intervalle  $[kT^{(1)}, (k+1)T^{(1)}]$  peut être exprimé comme suit :

$$x_k(t) = x_K^{(1)}(t) + x_{\lfloor \frac{k}{v} \rfloor}^{(2)}(t) ; \quad (\text{II.5})$$

Où  $\lfloor . \rfloor$  : est la fonction floor.

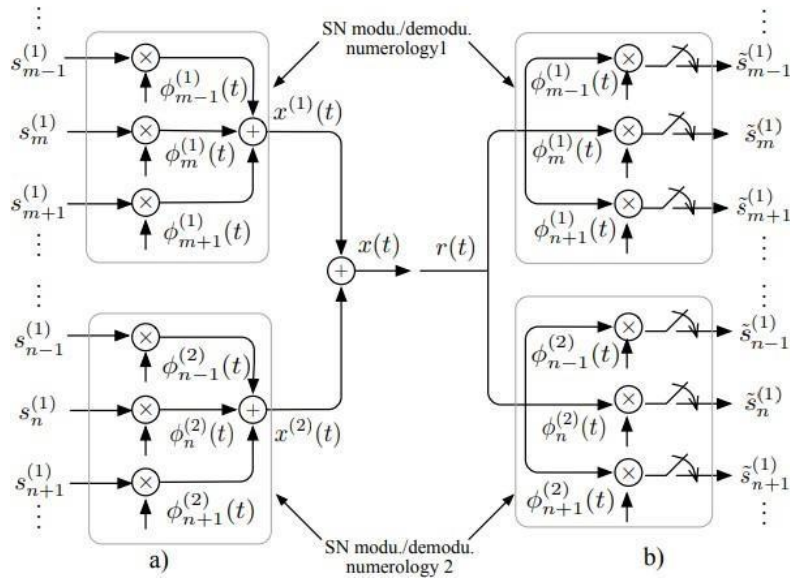
Le signal  $x(t)$  sur l'intervalle  $[kT^{(2)}, (k+1)T^{(2)}]$  peut-être exprimé comme suit :

$$x_k = \sum_{q=0}^{v-1} x_{vk+q}^{(1)} + x_k^{(2)}(t) ; \quad (\text{II.6})$$

Les équations (5) et (6) décrivent mathématiquement ce qu'illustre la figure c'est-à-dire comment des signaux de différentes durées de symboles se multiplexent dans le domaine temporel. En particulier, le k-ième symbole associé à la numérogie 1 chevauche une partie tronquée du  $\lfloor k/v \rfloor$ -ième symbole correspondant à la numérogie 2, tandis que le k-ième symbole de la numérogie 2 coïncide avec un bloc de symboles consécutifs à partir du k-ième symbole de la numérogie 1. Le signal reçu est ensuite traité par des démodulateurs SN-OFDM, qui séparent les signaux sur les différentes sous-



[41].



**Figure II.7** : Un modèle de signal avec deux numérolgies [41].

## II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré les scénarios et facteurs pouvant communication dont nous avons cité les plus courantes, en mettant un accent particulier sur les l'impact de la multi-numérolgie dans les réseaux 5G et les interférences inter-numérolgies ; Ces interférences résultent de plusieurs facteurs, notamment la coexistence de différentes technologies sans fil et la surcharge du spectre radio.

# *Chapitre 3*

### III.1 Introduction

Ce chapitre est réservé à nos investigations sur les interférences inter-numéologies dans les réseaux 5G. Pour cela, nous considérons une chaîne de communication OFDM à différentes numéologies et à différentes modulations. Nous présenterons en détail l'algorithme de simulation de l'effet des interférences inter-numéologies sur les performances de notre système OFDM avec une description de chaque étape : depuis la génération des données utilisateur jusqu'à la réception des données après démodulation, en passant par la modulation des symboles, l'application de l'IFFT, la formation des symboles OFDM, et l'insertion des préfixes cycliques. Nous discuterons des métriques de performance clés telles que la latence et le taux d'erreur binaire (BER) par rapport au rapport signal sur bruit (SNR) et nous présenterons les résultats de simulation qui illustrent l'efficacité de l'OFDM dans les environnements simulés de réseaux 5G.

### III.2 Environnement et Scénario de simulation

La présente étude vise à évaluer les performances d'un système de communication OFDM en utilisant deux configurations de numéologies différentes et trois types de modulation (64-QAM, 16QAM, QPSK). Cette évaluation a pour but de déterminer l'impact de ces paramètres sur le taux d'erreur binaire (BER) dans des conditions de rapport signal-sur-bruit (SNR) variées.

Pour mener cette étude, nous avons développé un script MATLAB pour simuler le processus complet de transmission OFDM avec les deux numéologies en question qui ont été déclarées sous les paramètres suivants : numéologie 1 (Numerology1) avec un espacement de sous-porteuses de 15 kHz et numéologies 2 (Numerology2) avec 30 kHz. Le script est illustré ci-dessous :

---

**Algorithm 1** Calcul du BER pour différentes numéologies utilisant 64-QAM

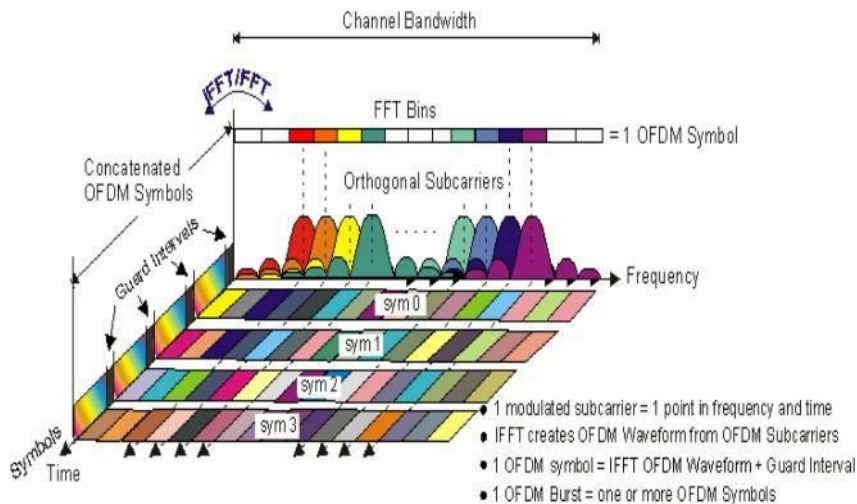
---

```
1: Initialisation des paramètres
2: Initialiser SCS, taille FFT, longueur du préfixe cyclique pour chaque
   numéologie
3: Initialiser le nombre de symboles OFDM, le nombre de sous-porteuses, et
   les données aléatoires
4: Modulation des données
5: Moduler les données
6: Boucle sur les valeurs de SNR
7: for chaque valeur de SNR do
8:   Initialiser les compteurs d'erreurs
9:   for chaque symbole OFDM do
10:    Mappage sur les sous-porteuses
11:    Application de la FFT inverse et ajout du préfixe cyclique
12:    Transmission et réception des signaux séparés
13:    Suppression du préfixe cyclique et application de la FFT
14:    Démodulation des données reçues et calcul des erreurs pour les trans-
   missions séparées
15:    Échantillonnage et combinaison des signaux
16:    Transmission et réception du signal combiné
17:    Démodulation et calcul des erreurs pour les transmissions combinées
18:   end for
19:   Calcul du BER pour chaque valeur de SNR
20: end for
21: Affichage des résultats
22: Tracer le BER en fonction du SNR pour les différentes numéologies
```

### III.3 Rappels sur la chaîne de transmission OFDM

- **Principe de l'OFDM**

L'OFDM est un système de modulation numérique qui utilise plusieurs sous-porteuses orthogonales dans un même canal pour transmettre des données. Chaque sous-porteuse est modulée avec un schéma de modulation numérique (comme QPSK, QAM, etc.) à faible taux de symbole. Cette méthode permet d'obtenir des débits de données similaires à ceux des systèmes à modulation à porteuse unique, mais dans des bandes passantes équivalentes grâce à l'utilisation efficace des sous-porteuses [42]. Autrement dit cette technologie permet un accès multiple en attribuant des sous-porteuses ou blocs de sous-porteuses à des équipements d'utilisateur (UE) à différents moments. Les ressources du système sont organisées dans une grille temps-fréquence, avec les sous-porteuses déterminant la granularité en fréquence et les symboles OFDM en temps [43].



**Figure III.1** : Représentation temporelle/Fréquentielle de l'OFDM [42].

Cette figure présente les principaux concepts d'un signal OFDM et les relations entre les domaines fréquentiel et temporel. Dans le domaine fréquentiel, plusieurs sous-porteuses adjacentes sont modulées indépendamment avec des données complexes. Pour passer du domaine fréquentiel au domaine temporel, une transformation FFT inverse est appliquée aux sous-porteuses pour générer les symboles OFDM. Dans ce domaine, des intervalles de garde sont insérés entre ces symboles pour éviter les interférences causées par les retards multiples dans le canal radio. Les symboles OFDM peuvent être concaténés pour former le signal OFDM complet. À la réception, une FFT directe est utilisée pour récupérer les données binaires d'origine à partir des symboles OFDM [42].

Pour répartir les données à transmettre sur N porteuses, nous organisons les symboles  $C_k$  en groupes de N. Ces symboles  $C_k$ , qui sont des nombres complexes, sont déterminés à partir de bits et formés selon une constellation (mapping), souvent QAM (Modulation d'Amplitude en Quadrature) ou PSK (Modulation par Décalage de Phase), en fonction des exigences de transmission. La séquence de N symboles  $C_0 \dots C_{N-1}$  forme un symbole OFDM. Chaque flux K de symboles sur les N sous-porteuses module un signal à une fréquence. Le train de signaux modulés K s'écrit sous forme complexe [44] :

$$m_k(t) = C_k e^{j2\pi f_k t} \quad (\text{III.1})$$

Le signal total S (t) correspondant à l'ensemble des N symboles réassemblé en un symbole OFDM :

$$s(t) = \sum_{K=0}^{N-1} m_k(t) = \sum_{K=0}^{N-1} C_K e^{j2\pi f_K t} \quad (\text{III.2})$$

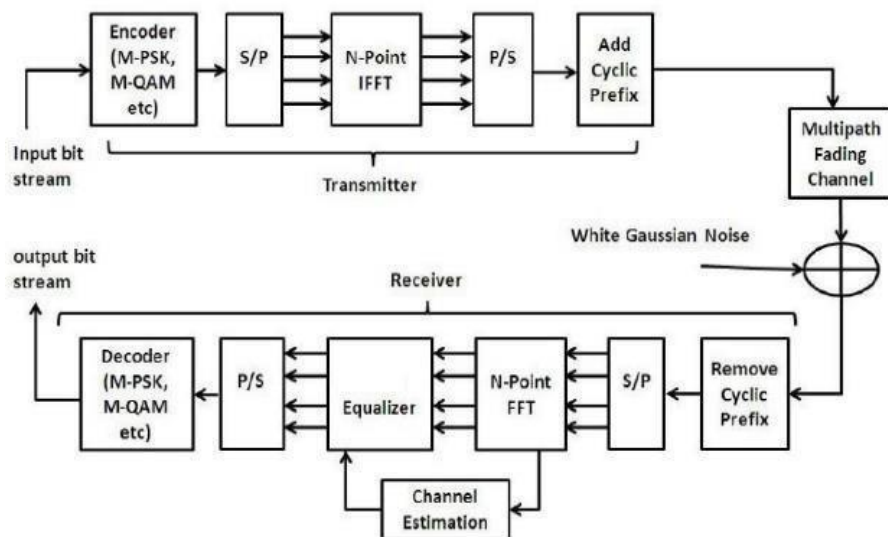
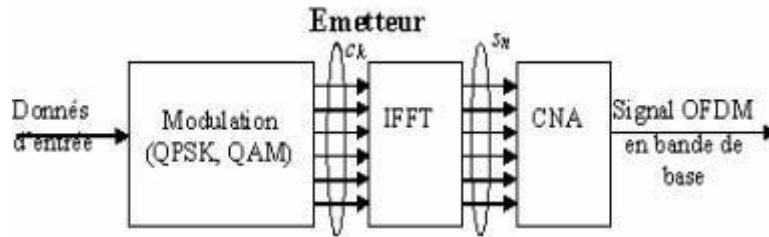


Figure III.2 : Modèle de système OFDM [44].

- **Modulateur OFDM**

Les données en série entrantes sont les informations qui doivent être transmises par le canal à l'aide du système OFDM, et sont converties en N flux de données parallèles à l'aide d'un convertisseur série-parallèle. Ces symboles peuvent être modulés à l'aide de différentes techniques de modulation et transmis au bloc IFFT en tant qu'entrées. Ce bloc contribue à passer du domaine fréquentiel au temporel et fournit le signal numérique du domaine temporel pour l'entrée donnée [45].



**Figure III.3 :** Modulateur OFDM [46].

L'analyse algébrique indique que le signal de sortie  $S(x)$  est sous la forme :

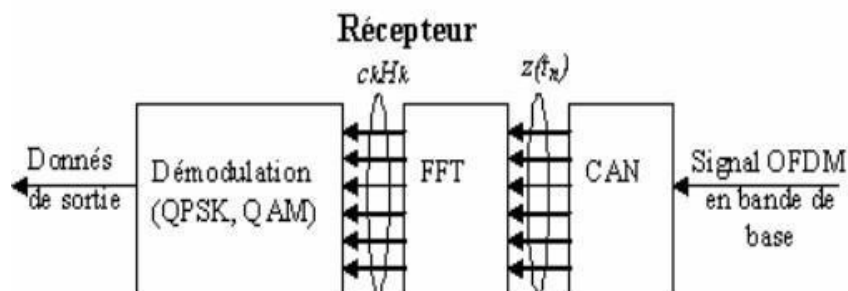
$$S(t) = e^{2j\pi f_0 t} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kt}{T_s}} \quad (\text{III.3})$$

En discrétisant ce signal et en le ramenant en bande de base pour l'étude numérique on obtient une sortie  $S(n)$  sous la forme :

$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (\text{III.4})$$

- **Démodulateur OFDM**

La Transformée de Fourier Rapide (FFT) est utilisée du côté récepteur pour diviser le canal sélectif en fréquence en sous-canaux plats et indépendants, chacun correspondant à une sous-porteuse distincte. Cette division vise à éviter l'interférence entre symboles (ISI) et La chaîne de réception est composée de blocs réalisant le processus inverse à celui des blocs de la chaîne d'émission. Elle se compose des blocs de démodulation OFDM, d'un démodulateur, d'un bloc de décodage, et finalement d'un bloc qui calcule le taux d'erreur [47].



**Figure III.4 :** Démodulateur OFDM [46].

L'analyse théorique déni le signal discrétisé reçu au niveau du démodulateur sous la forme :

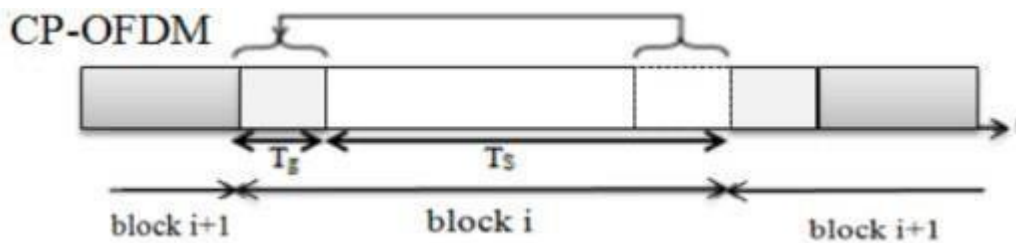
$$Z(t_n) = z\left(\frac{nT_s}{N}\right) = Z_n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (\text{III.5})$$

La  $Z(t_n)$  est la Transformée de Fourier discrète inverse de  $C_k H_k$ . La démodulation consiste donc à effectuer une Transformée de Fourier rapide [46].

Dans les réseaux de télécommunication, l'Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) a évolué significativement entre les générations 4G et 5G pour répondre aux nouvelles exigences technologiques. En comparaison avec la 4G qui opère principalement dans des fréquences inférieures à 6 GHz avec une gestion spectrale relativement simple, la 5G pousse les limites en exploitant des bandes de fréquences plus élevées, incluant les fréquences millimétriques (mmWave) jusqu'à 100 GHz. Cette expansion spectrale permet des débits plus élevés et une capacité accrue, mais elle introduit également de nouveaux défis tels que la gestion de l'interférence inter-numérologies. Contrairement à la 4G qui utilise une seule numérologie, la 5G introduit la flexibilité d'utiliser plusieurs numérolgies OFDM pour s'adapter aux conditions de canal variables et aux exigences diversifiées des applications, améliorant ainsi l'efficacité spectrale et la robustesse du système. Ces avancées sont soutenues par l'adoption de techniques avancées de modulation comme 256-QAM, visant à maximiser les débits tout en minimisant les erreurs de transmission. En résumé, l'évolution de l'OFDM dans les réseaux 5G représente une transition vers des technologies plus flexibles, et capables de répondre aux demandes croissantes de performances en matière de communication sans fil [48].

- **Insertion de préfixes cycliques(CP)**

Le préfixe cyclique est ensuite introduit entre deux symboles OFDM, pour annuler l'effet des interférences inter-symboles ISI dues à la dispersion du canal. Ce signal numérique est ensuite converti en forme d'onde en temps réel à l'aide d'un convertisseur numérique-analogique [45].



**Figure III.5** : Principe de l'insertion du préfixe cyclique [49].

L'insertion du CP permet de gérer l'ISI en fournissant une marge de garde temporelle entre les symboles OFDM successifs autrement dit Avant la transmission de chaque symbole OFDM, un préfixe cyclique est ajouté et est généralement une copie des derniers échantillons du symbole OFDM, répétés à l'avant du symbole. Il augmente la durée totale du symbole OFDM, mais permet une meilleure résistance aux effets de canal. Cela aide le récepteur à isoler correctement chaque symbole et à minimiser les interférences inter-symboles qui pourraient être provoquées par le canal de transmission [49].

À la réception, le récepteur reçoit le signal OFDM avec le CP. Les premiers échantillons du signal reçu, correspondant au CP, sont ignorés, tandis que les échantillons principaux du symbole OFDM sont extraits et traités.



### III.4 Métriques de mesure de performance

- **Taux d'Erreur Binaire BER :**

Dans les techniques de modulation numérique, les bits reçus sont altérés en raison du bruit, des interférences et de la distorsion. Le taux d'erreur sur les bits est donc défini comme le nombre de bits erronés divisé par le nombre total de bits transférés.

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}} = \frac{N_{err}}{N} \quad (\text{III.1})$$

Le BER est le paramètre de mesure de la qualité d'une transmission numérique. Les performances de la modulation sont calculées en mesurant le BER en supposant que le système fonctionne avec un bruit blanc gaussien additif [50].

- **Le rapport signal/bruit (SNR)**

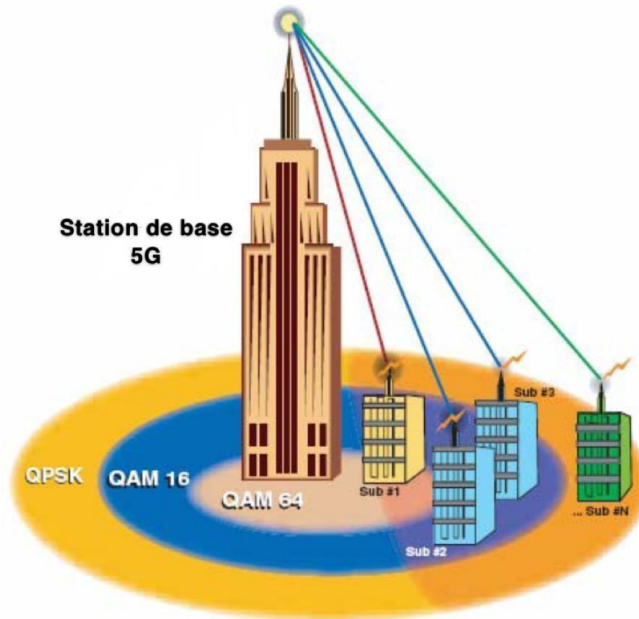
Le rapport signal/bruit est défini de manière générale comme le rapport entre la puissance du signal désiré et la puissance du bruit. L'estimation du rapport signal/bruit indique la fiabilité de la liaison entre l'émetteur et le récepteur. Dans la conception de systèmes adaptatifs, l'estimation du rapport signal/bruit est couramment utilisée pour mesurer la qualité du canal. Les paramètres du système sont ensuite modifiés de manière adaptative sur la base de cette mesure. Par exemple, si la qualité du canal mesurée est faible, l'émetteur ajoute une certaine redondance ou complexité aux bits d'information, ou réduit le niveau de modulation (meilleure distance euclidienne), ou augmente le taux d'étalement pour une transmission à plus faible débit de données. Ce rapport peut être défini comme suit [51,52] :

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{bruit}} \quad (\text{III.3})$$

Le résultat est souvent exprimé en dB ce qui donne la formule :

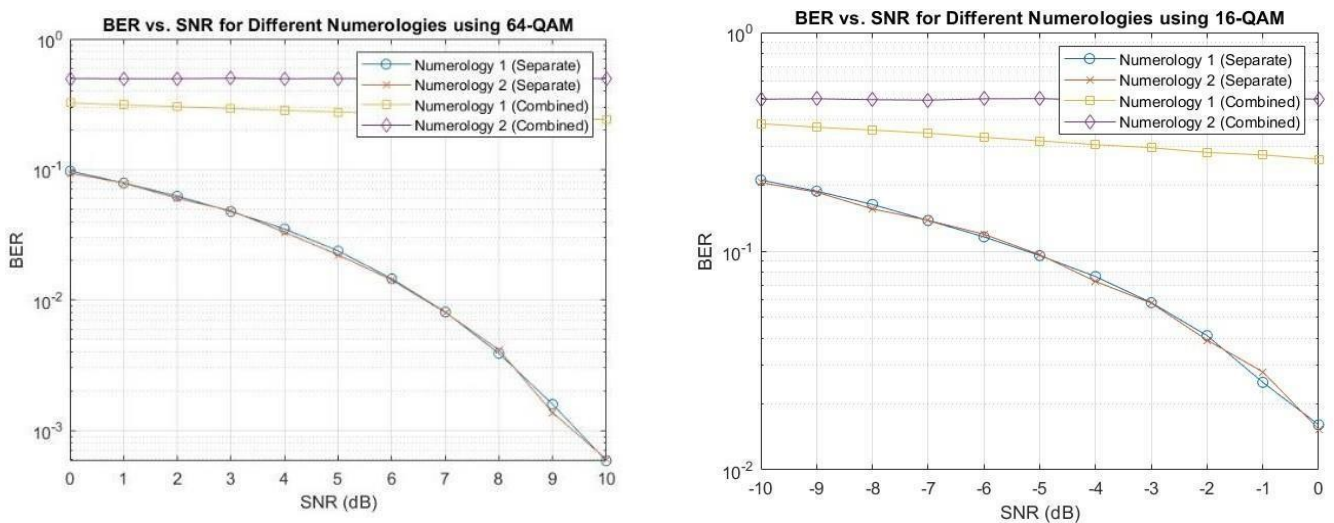
$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{bruit}} \right) \quad (\text{III.3})$$

### III.5 Résultats de simulation

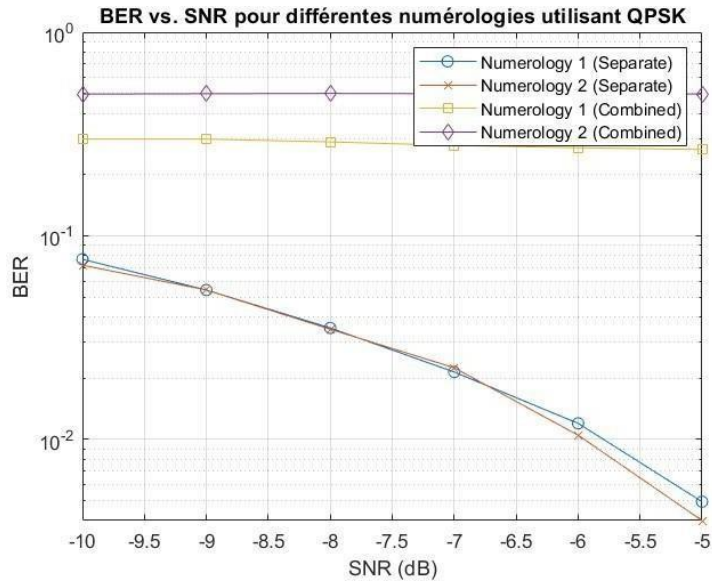


**Figure III.6 :** Catégorisation des cellules à l'aide d'AMC.

Trois types de modulation sont majoritairement déployés en 5G (comme illustré sur la figure ci-dessus). En effet, Plus nous nous éloignons de la station de base, plus la puissance du signal reçu par l'UE sera faible, le rendant plus sensible au bruit. Par conséquent, l'utilisateur le plus proche verra ses données modulées en 64-QAM qui offre des débits plus élevés mais est plus exigeante en termes de SNR, étant facilement affectée par les interférences. La 16QAM sera pour sa part utilisée pour les utilisateurs situés à une distance approximativement comprise entre 200 et 350m de la station de base. Les données des utilisateurs les plus éloignés seront modulées en QPSK, cette technique offre une bien meilleure résistance au bruit mais un débit plus restreint.



**Figure III.7 :** Taux d'erreur BER en fonction du SNR pour les modulations 64-QAM et 16-QAM.



**Figure III.8 :** Taux d'erreur BER en fonction du SNR pour la modulation QPSK.

Les résultats sont présentés dans les figures précédentes III.7 et III.8. Nous observons que le BER des signaux envoyés individuellement est significativement plus satisfaisant que celui des signaux envoyés de concert (ensemble). Cette constatation met en évidence une nette amélioration de la qualité de transmission lorsque les signaux sont envoyés de manière séparée plutôt que de les combiner. Cela est dû aux interférences inter-numérolgies. Celles-ci peuvent entraîner une dégradation de la qualité du signal, augmentant ainsi le BER lorsque plusieurs signaux sont envoyés en même temps.

Pour chacune de ces modulations nous avons utilisé des ranges de SNR allant de [0 a 10] dB pour la 16-QAM, [-10 a 0] dB pour la 64-QAM et [-10 a -5] dB, nous nous sommes limité à ces valeurs là pour cause de manque d'appareils puissants pour transmettre un embrassé plus élevé de symboles pour mener à bien notre étude mais en pratique le SNR peut aller jusqu'à 40dB.

### III.6 Conclusion

La simulation et l'analyse des performances du BER/SNR peuvent être utilisées de manière perspicace pour améliorer le gain de diversité et les performances multi-utilisateurs. L'idée fondamentale de la modulation adaptative est d'adapter des modulations d'ordres différents qui permettent d'envoyer plus de bits par symbole et donc d'atteindre des débits ou des efficacités spectrales plus élevés tel que chaque modulation offre un débit élevé et une faible résistance au bruit ou le contraire. L'une des principales mesures de performance d'un système de communication sans fil est le BER. Les courbes obtenues pour différents schémas de modulation et de codage AMC ont été utilisées pour comparer les performances de deux signaux de numérolgies envoyés séparés et combinés.

*Conclusion*  
*générale*

## **Conclusion générale**

Notre exploration des interférences inter-numérologies dans les réseaux mobiles 5G met en lumière des défis critiques et des opportunités significatives pour l'avenir des communications sans fil. À travers notre travail, nous avons examiné l'évolution des générations de réseaux mobiles jusqu'à la 5G, identifiant comment chaque étape a contribué à l'essor de la connectivité mondiale et des applications innovantes.

Notre étude sur la gestion des interférences inter-numérologies dans les réseaux 5G à travers la simulation du calcul du BER a permis d'obtenir plusieurs résultats significatifs. Nous avons observé que chaque modulation étudiée, présente des avantages distincts en termes de résistance face au bruit et de capacité à fournir des débits de qualité aux utilisateurs. Ces résultats sont importants pour les opérateurs et les concepteurs du réseau 5G, car ils fournissent des informations précieuses sur les choix des schémas de modulations les plus adaptés en fonction des conditions spécifiques du réseau et des exigences des applications.

La gestion des interférences est essentielle pour garantir la fiabilité des communications et la qualité des signaux, surtout dans les technologies sans fil. Réduire les interférences améliore la sécurité des systèmes, optimise l'utilisation des ressources en bande passante et maintient la performance des réseaux. C'est crucial pour assurer la transmission efficace des données et éviter les perturbations qui pourraient compromettre les transmissions.

Enfin, cette recherche ouvre la voie à de futures études visant à affiner les modèles de simulation, à explorer davantage de stratégies de gestion des interférences inter-numérologies, et à intégrer ces résultats dans le développement pratique des réseaux 5G.

# *Bibliographie*

## **Bibliographie :**

- [1] : N. Trabelsi et al. ; « **Interference management in 5G and beyond networks: A comprehensive survey** ». Computer Networks 239 (2024) 110159. Available online 27 December 2023 1389-1286/© 2023 Elsevier B.V. All rights reserved.
- [2] : Ibrahim Salah et al. « **Comparative Study of Efficiency Enhancement Technologies in 5G Networks - A Survey** » ; 17th International Learning & Technology Conference 2020
- [3] :Hye Yeon Kwon , Seongcheol Kim « **Effects of the development of competition framework and legal environment for media contents on the generational transition of mobile networks** » ; Telematics and Informatics 63 (2021) 101667
- [4] :Meenal G. Kachhavay et al, « **5G Technology-Evolution and Revolution** » International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol.3 Issue.3, March- 2014, pg. 1080-1087.
- [5] : Ms. Neha Dumbre et al. « **5G WIRELESS TECHNOLOGIES-Still 4G auction not over, but time to start talking 5G** » ; (IJSETR) Volume 2, Issue 2, February 2013
- [6] : Sidhartha Sankar Sahoo et al. « **5G Network a New Look into the Future: Beyond all Generation Networks** » ; American Journal of Systems and Software, 2014, Vol. 2, No. 4, 108-112
- [7] : Meenal G. Kachhavay , Ajay P.Thakare « **5G Technology-Evolution and Revolution** » ; International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol.3 Issue.3,2014, pg. 1080-1087.
- [8] :Azar Abid Salih et al. « **Evolution of Mobile Wireless Communication to 5G Revolution** » ; ISSN: 04532198 Volume 62, Issue 05, June, 2020
- [9] : Bisognin, Aimeric. Évaluation de technologies organiques faibles pertes et d'impression plastique 3D afin de contribuer au développement de solutions antennaires innovantes dans la bande 60 GHz–140GHz. Université Nice Sophia Antipolis, 2015
- [10] : Ali Sufyan et al. « **From 5G to beyond 5G: A Comprehensive Survey of Wireless Network Evolution, Challenges, and Promising Technologies** » ; Electronics 2023, 12, 2200. <https://doi.org/10.3390/electronics12102200>
- [11] : Carl Rydholm , William Pommer « **Hybrid Positioning Solution Using 5G and GNSS** » ; Master of Science Thesis in Electrical Engineering Department of Electrical Engineering, Linköping University, 2021
- [12] : ANFR. « **Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G** », vol1, juillet 2019.
- [13] : site Huawei
- [14] : Muhammad Imam Nashiruddin et al. «**Techno-Economic Assessment of 5G NSA Deployment for Metropolitan Area: A Greenfield Operator Scenario** » ; Journal of Communications vol. 17, no. 12, (2022)

- [15] : université de Poitiers Frédéric Launay Les réseaux de mobiles 4G et 5G ; « **Le réseau 5G – 5GS** » 2018
- [16] : Livre « **Planning of your journey 5G** ».
- [17] : Benjamin Sliwa et al. « **Machine Learning-Enabled Data Rate Prediction for 5G NSA Vehicle-to-Cloud Communications** » ; arXiv:2109.04117v1 [cs.NI] 9 Sep 2021.
- [18] : Srinivasan Sridharan « **Machine Learning (ML) In a 5G Standalone (SA) Self Organizing Network (SON)** » ; International Journal of Computer Trends and Technology ; Volume 68 Issue 11, 43-48, November 2020
- [19] Ravilla Dilli « **Analysis of 5G Wireless Systems in FR1 and FR2 Frequency Bands** » ; In Proceedings of the 2020 ; 2nd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications.
- [20] Ioannis D. Bougas et al. « **Dual-Band Rectifier Circuit Design for IoT Communication in 5G Systems** » ; MDPI , Technologies 2023, 11, 34.
- [21] Raphael Kiesel et al. « **Techno-Economic Evaluation of 5G-NSA-NPN for Networked Control Systems** » ; MDPI, Electronics 2022, 11, 1736.
- [22] :Yue Zhu et al. « **Network-Assisted Full-Duplex Enabled Ultrareliable and Low-Latency Communications** » ; Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2022, Article ID 2233503, 12 pages.
- [23] : Pedersen, Klaus I. et al. « **A Flexible 5G Frame Structure Design for Frequency-Division Duplex Cases** » ; Published in: IEEE Communications Magazine ; 2016
- [24] : Dan Wang et al. « **A Novel PSS Timing Synchronization Algorithm for Cell Search in 5G NR System** » ; IEEE Access 2017.
- [25] : Yanjun Shi et al. « **Potential applications of 5G communication technologies in collaborative intelligent manufacturing** » ; IET Collaborative Intelligent Manufacturing 2019.
- [26] : El Bouhani Abdel basset ; « **Etude des scénarios de clustering des réseaux 4G de TT pour la migration vers une architecture 5G Cloud-RAN** » ; Mémoire de Projet de Fin d'Etudes (2020/2021) Encadré par :Mr Kais Ameer(Tunisie Télécom),Mme Soumaya Hamouda (FSB).
- [27] : Anthony Ejeh Itodo , Theo G. Swart « **CAPACITY ENHANCEMENT IN D2D 5G EMERGING NETWORKS: A SURVEY** » ; Journal of Applied Engineering and Technological Science Vol 4(2) 2023: 1022-1037.
- [28] : Haonan Wang and Ang Li ; Chapter « **Spatial Multiplexing for MIMO/Massive MIMO** » ; Core Collection (BKCI) 2023.
- [29] : F. Molisch et al.« **Hybrid beamforming for massive MIMO-A survey** » ; pp. 1-14, 2016.



- [30] : Y. Zhou et al. « **An overview on intercell interference management in mobile cellular networks: From 2G to 5G** », in: IEEE International Conference on Communication Systems, January 2015, pp. 217–221.
- [31] : N. Saquib, E. Hossain, L.B. Le, D.I. Kim, « **Interference management in OFDMA femtocell networks: Issues and approach** » ; IEEE Wireless Communications (2012) .
- [32] : Vanlin Sathya et al . « **Small Cell Planning: Resource Management and Interference Mitigation Mechanisms in LTE HetNets** » Wireless Personal Communications (2020) .
- [33] : Maraj Uddin Ahmed Siddiqui et al. ; « **Interference Management in 5G and Beyond Network : Requirements, Challenges and Future Directions** » IEEE Access (2020)
- [34] : 5G Vision The 5G Infrastructure Public Private Partnership : The Next Generation of Communication Networks and Services, 5G Infrastruct. PPP Assoc., Eur. Commission, Brussels, Belgium, Feb. 2015.
- [35] : E.Dahlman, S. Parkvall, and J.Skold « **4G,LTE-advanced Proand the road to 5G** » Academic Press,2016
- [36] : 3rd Generation Partnership Project (3GPP) ; « **NR; Physical channels and modulation (Release 15)** » Technical specification 38.211, ver 15.1.0, Apr.2018
- [37] : J. Vihriälä et al. « **Numerology and frame structure for 5G radio access** » ; IEEE Annu. Int. Symp. Pers., Indoor, Mobile Radio Commun.(PIMRC), 2016.
- [38] : J. Sachs, G. Wikstrom, T. Dudda, R. Baldemair, and K. Kittichokechai, « **5G radio network design for ultra-reliable low-latency communication** » ; IEEE Netw., vol. 32,no.2, pp. 24–31, 2018
- [39] : AA Zaidi, R. Baldemair, H. Tullberg, H. BJORKEGREN, L. Sundstrom, J. Medbo, C. Kilinc, I. Da Silva, « **Forme d'onde et numérologie pour prendre en charge les services et exigences 5G** » ; IEEE Commun. Mag. 54 (11) (2016) 90-98.
- [40] : Z. E. Ankarali and H. Arslan, « **Cyclic feature suppression for physical layer security** » Phys. Commun., to be published
- [41] : Mao, Juquan Zhang, Lei McWade, Stephen Chen, Hongzhi Xiao, Pei. « **Characterizing Inter-Numerology Interference in Mixed-Numerology OFDM Systems** » 2020.
- [42] : Jawaaz Ahmad , Lakshmisha S K ; « **VLSI Implementation of OFDM Transmitter chain for 4G Communication** » IJIRT | Volume 4 Issue 12 | ISSN: 2349-6002 (2018)
- [43] : Evilasio Oliveira Lucena et al. « **Congestion Control Framework for Real-Time Services in OFDMA-based Systems** » ; Conférence : XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (2009).

[44] : Younes DJEMAMAR et al. « **Performance of MIMO 2\*2 and 4\*4 for OFDM-MIMO System Without using Convolution Code over Mobile Radio Channel** » ; Conference Paper · May 2016.

[45] : Isha Goel et al. « **Review: Analysis of PAPR Reduction Techniques of OFDM System** » ; Review Article Research & Development in Material Science (2018)

[46] : Helmi BEN HNIA et al. ; « Etude des performances de la modulation OFDM pour l'utilisation dans les systèmes de communication sans fils de la 4G » ; International Conférence : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications ; 2004 – TUNISIA

[47] : Nilesh Chide et al. « **Implementation of OFDM System using IFFT and FFT** » ; (IJERA) ISSN: 2248-9622 Vol. 3, Issue 1, January -February 2013, pp.2009-2014

[48] : Smith, J., & Doe, J. « **Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) for 5G Networks : Challenges and Opportunities** » ; *IEEE Communications Magazine* ; (2022).

[49] : Youcefi Abdessamad , Mazouni Ibrahim « **Les différentes formes d'ondes candidates dans les applications 5G** » ; Juillet 2019

[50] : Konyeha C, Konyeha S ; « **An Investigation into Bit Error Rate (BER) Performance of WiMAX Standard Compliant Systems** » ; advances in multidisciplinary and scientific research journal ; 2015.

[51] : Huseyin Arslan , Sharath Reddy « **Noise Power and SNR Estimation for OFDM Based Wireless Communication Systems** » ; 2003 ; researchgate.

[52] : livre « **Digital Communications : Fundamentals and Applications** » par Bernard Sklar.

## *Résumé*

Les systèmes de communication sans fil sont devenus l'un des sujets de recherche courants en raison de son rôle important dans presque tous les domaines, de la communication au commerce, à l'industrie, même à la sécurité et à la santé avec la nouvelle génération de réseau la 5G . La dernière technologie de réseau radio mobile développée par le groupe IMT, représente une avancée significative par rapport à ses prédécesseurs. Elle promet une performance révolutionnaire avec une couverture plus étendue et fiable, des débits de données considérablement accrus, une connectivité massive capable de supporter un grand nombre de dispositifs, et une latence réduite de manière significative. Cependant, employer plusieurs numéologies dans un réseau 5G introduit la non-orthogonalité dans le système, provoquant des interférences entre les utilisateurs appartenant à différentes numéologies. Cette interférence, également appelée interférence inter-numéologie (INI), a recueilli de plus en plus attention ces derniers temps. Nous avons décidé, pour notre étude, de nous baser sur les interférences inter-numéologies, qui est une des technologies clés des réseaux de 5eme génération, et qui consiste à allouer à chaque utilisateur la quantité de ressources nécessaire à son application. Nous finissons par une partie qui comporte le schéma Bloc de transmission suivi par notre algorithme, la définition des différentes techniques appliquées tel que le calcul du BER et SNR, ainsi qu'une discussion de nos résultats. Suivie d'une conclusion générale et nos références bibliographiques.

---

## **Abstract**

Wireless communication systems have become one of the current research topics due to its important role in almost every field, from communication to commerce, industry, even security and health with the new generation of network the 5G. The latest mobile radio network technology developed by the ITM Group, represents a significant advance on its predecessors. It promises revolutionary performance with more extensive and reliable coverage, dramatically increased data rates, massive connectivity capable of supporting a large number of devices, and significantly reduced latency. However, employing multiple numerologies in a 5G network introduces non-orthogonality into the system, causing interference between users belonging to different numerologies. This interference, also known as inter-numerology interference (INI), has attracted increasing attention in recent times. For our study, we decided to base ourselves on inter-numbering interference, one of the key technologies of 5th generation networks, which consists in allocating to each user the amount of resources required for his or her application. We end with a section describing the transmission block diagram followed by our algorithm, the definition of the various techniques applied, such as BER and SNR calculations, and a discussion of our results. This is followed by a general conclusion and our bibliographical references.