

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique**

**Université Abderrahmane Mira**

**Faculté de la Technologie**



**Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique**

## **Projet de Fin d'Etudes**

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications.

Spécialité : Réseau et télécommunications.

### **Thème**

**Gestion des interférences dans un réseau 5G.**

**Préparé par :**

BOUZOUZOU MANEL.

OUDDAI LYNDA.

**Dirigé par :**

*MD.TOUNSI*

*Y. OUAZZIZ.*

**Examiné par :**

A. ALLICHE.

K. MOKRANI.

**Année universitaire : 2021/2022**



## Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadrant, monsieur *M. Tounsi*, d'avoir bien voulu diriger ce travail.

Nous tenons également à adresser toute notre reconnaissance à notre co-encadrant monsieur *Y. Ouazziz* pour ses précieux conseils et ses orientations bénéfiques.

Un grand merci également aux membres de jurys pour pour l'honneur qu'ils nous font d'avoir eu la gentillesse d'examiner et évaluer notre mémoire.

Nous prendrons garde d'oublier ceux qui nous ont permis d'être ce que nous sommes aujourd'hui nos parents, nos frères et sœurs. Qu'ils trouvent nos profondes grâtes dans ce modeste travail.

---

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Table des matières</b>	<b>III</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>V</b>
<b>Listes des abréviations</b>	<b>VII</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 GENERALITES SUR LA 5G</b>	<b>3</b>
1.1 INTRODUCTION . . . . .	3
1.2 Réseau 5G IMT-2020 . . . . .	3
1.2.1 Défis de la 5G . . . . .	4
1.2.2 Objectifs techniques de la 5G . . . . .	5
1.2.3 Famille d'usages et type de services . . . . .	6
1.3 Architecture du réseau 5G . . . . .	9
1.3.1 NSA et SA . . . . .	9
1.3.2 Réseau d'accès . . . . .	11
1.3.3 Réseau Coeur : NG-CN ou 5GC . . . . .	12
1.4 Nouveaux standards radio en 5G . . . . .	13
1.4.1 Bande de fréquences FR1, FR2 . . . . .	13
1.4.2 Modes de duplexage déployés . . . . .	14

1.4.3	Structure de trame 5G NR . . . . .	16
1.4.3.1	Structure de la trame temporelle de 5G NR . . . . .	17
1.4.3.2	Structure de la trame fréquentielle de 5G NR . . . . .	17
1.4.4	Network slicing (découpage de réseau) . . . . .	18
1.5	Device to device ( D2D) . . . . .	20
1.5.1	Massive MIMO et Beamforming . . . . .	21
1.5.1.1	Massive MIMO . . . . .	21
1.5.1.2	Beamforming (formation de faisceaux) . . . . .	22
1.6	Conclusion . . . . .	23
<b>2</b>	<b>INTERFERENCE INTER-NUMERLOGIE</b>	<b>25</b>
2.1	INTRODUCTION . . . . .	25
2.2	Classification des interférences . . . . .	26
2.2.1	Interférence du canal adjacent . . . . .	26
2.2.2	Interférences intracellulaire et intercellulaire . . . . .	27
2.2.3	Interférence entre canaux (Inter-Channel Interference) : . . . . .	27
2.2.4	Interférence entre les faisceaux (Inter Beam Interference) . . . . .	28
2.3	Interférence inter-numérologies . . . . .	29
2.3.1	Préfixe cyclique (CP) . . . . .	32
2.3.2	Le modèle de système MN-OFDM : . . . . .	33
2.4	Conclusion : . . . . .	36
<b>3</b>	<b>SCMA pour les interférences inter numéologies</b>	<b>37</b>
3.1	INTRODUCTION . . . . .	37
3.2	schéma bloc . . . . .	37
3.3	Codage en FEC : . . . . .	38
3.3.1	FEC forward error correction : . . . . .	38
3.3.2	L'encodeur FEC : . . . . .	39
3.3.3	Les codes en bloc . . . . .	40
3.3.4	Codes convolutionnels : . . . . .	40
3.4	SCMA . . . . .	42

3.4.1	Présentation de l'Accès multiple à code clairsemés SCMA . . . . .	42
3.4.2	Concept de base . . . . .	42
3.4.3	Mappage du livre de codes . . . . .	43
3.4.4	Procédure d'accès multiple . . . . .	45
3.4.5	Les principales caractéristiques de l'accès multiple avec SCMA . . . .	45
3.4.6	Encodage et décodage SCMA . . . . .	46
3.4.6.1	Encodage SCMA . . . . .	47
3.4.6.2	Décodage SCMA : . . . . .	47
3.4.7	Avantages du SCMA : . . . . .	50
3.4.8	Inconvénients du SCMA : . . . . .	51
3.5	Modulation OFDM : . . . . .	51
3.5.1	Principe de l'ofdm . . . . .	51
3.5.2	Modulateur OFDM : . . . . .	52
3.5.3	Démodulateur OFDM . . . . .	53
3.5.4	La modulation QAM : . . . . .	54
3.5.5	Canal de Rayleigh . . . . .	55
3.6	Simulations et résultats . . . . .	56
3.6.1	Algorithme principal . . . . .	56
3.6.2	Discussion des résultats . . . . .	56
3.7	Conclusion . . . . .	59
	<b>Conclusion générale</b>	<b>60</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>61</b>

---

# LISTE DES FIGURES

1.1	Familles d'usage de la 5G . . . . .	7
1.2	architecture du réseau NSA . . . . .	10
1.3	architecture du réseau SA . . . . .	11
1.4	architecture du réseau SA . . . . .	12
1.5	Modes de duplexage en 5G . . . . .	15
1.6	Trame temporelle . . . . .	17
1.7	principe du network slicing . . . . .	19
1.8	Représentation du beamforming dans massive MIMO . . . . .	23
2.1	Interférence du canal adjacent . . . . .	26
2.2	interférences inter/intra cellulaires. . . . .	27
2.3	Interférences entre canaux. . . . .	28
2.4	Interférence entre faisceaux.[24] . . . . .	29
2.5	Prefixe cyclique . . . . .	32
2.6	Illustration de la relation de fréquence et de temps avec deux numérolgies pour le cas $\mu = 2$ . . . . .	34
2.7	modulateur OFDM à numérolgies multiples . . . . .	34
3.1	schéma à suivre. . . . .	38
3.2	Code convolutif de longueur constante[42] . . . . .	41

3.3	un modèle de système de base de SCMA . . . . .	43
3.4	mappage bit mot de code SCMA. . . . .	43
3.5	exemple de livre de code SCMA à 8 points. . . . .	45
3.6	Accès multiple avec SCMA . . . . .	46
3.7	Schéma pour système SCMA . . . . .	47
3.8	Représentation de graphe de facteurs dans SCMA . . . . .	48
3.9	OFDM en temps/fréquence. . . . .	52
3.10	Modulateur OFDM . . . . .	53
3.11	Occupation de la bande passante . . . . .	53
3.12	Démodulateur OFDM . . . . .	54
3.13	Exemple de constellation pour une modulation en 16-QAM . . . . .	55
3.14	BER en fonction du SNR pour les différents utilisateurs . . . . .	58
3.15	BER en fonction du SNR selon différentes méthodes . . . . .	58

---

# LISTE DES TABLEAUX

1.1	Numerologies 5G . . . . .	18
2.1	Numerologies 5G en détail . . . . .	30

---

# LISTES DES ABRÉVIATIONS

**2G** : Second **G**eneration

**3G** : Third **G**eneration

**3GPP** : 3<sup>rd</sup> **G**eneration **P**artnership **P**roject

**4G** : Fourth **G**eneration

**5G** : Fifth **G**eneration

**5GC** : Fifth **G**eneration **C**ore

**5G NR** : Fifth **G**eneration **N**ew **R**adio

**ACI** : Adjacent **C**hannel **I**nterference

**AMF** : Access and **M**obility **M**anagement **F**unction

**AUSF** : **A**uthentication **S**erver **F**unction

**BS** : Base **S**tation

**CSI-RS** : Channel **S**tate **R**eference **S**ignal

**CP** : Cyclic **P**refix

**D2D** : Device to **D**evice

**DL** : Downlink

**E2E** : End to **E**nd

**eMBB** : enhanced **M**obile **B**road **B**and

**EPC** : Evolved **P**acket **C**ore

**FDD** : **F**requency **D**ivision **D**uplex

**FN** : Function **N**ode

**FTT** : Fast **F**ourier **T**ransform  
**GSM** : Global **S**ystem for **M**obile **C**ommunications  
**IBI** : Inter **B**eam **I**nterference  
**ICI** : Inter/Intra **C**ell **I**nterference  
**IEEE** : Institute of **E**lectrical and **E**lectronics **E**ngineers  
**IFFT** : Inverse **F**ast **F**ourier **T**ransform  
**INI** : Inter Numerology **I**nterference  
**IMT** : International **M**obile **T**elecommunication  
**IOT** : Internet **O**f **T**hings  
**ISI** : Inter **S**ymbol **I**nterference  
**LTE** : Long **T**erm **E**volution  
**M2M** : Machine **t**o **M**achine  
**MIMO** : Multiple **I**nput **M**ultiple **O**utput  
**MME** : Mobility **M**anagement **E**ntity  
**M-MIMO** : Massive **MIMO**  
**mMTC** : massive **M**achine **T**ime **C**ommunication  
**MN-OFDM** : Mixed Numerology **O**FD**M**  
**MUI** :Multi **U**ser **I**nterference  
**MPA** :Message **P**assing **A**lgorithm  
**MS** :Mobile **S**tation  
**NG-RAN** : Next **G**eneration **R**adio **A**ccess **N**etwork  
**NSA** : Non-**S**tand-**A**lone  
**NSSF** : Network **S**lice-**S**election **S**election  
**OFDM** : Orthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiplexing  
**OFDMA** : Orthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiplexing **A**ccess  
**PCF** : Policy **C**harging **F**unctio  
**PCRF** : Policy and **C**harging **R**ules **F**unction  
**PDN** : **P**acket **D**ata **N**etwork  
**PFCP** : **P**acket **F**orwarding **C**ontrol **P**rotocol  
**PGW** : **P**acket **G**ate**W**ay

**PDU** : Protocol Data Unit

**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

**SCS** :Sub Carrier Spacing

**SDL** : Supplementary DownLink

**SDMA** : Spatial Division Multiple Access

**SGW** : Serving GateWay

**SIC** : Successive Interference Cancellation

**SINR** : Signal to Interference Noise Ratio

**SM** : Sub-carrier Mapping

**SMF** : Session Management Function

**SN-OFDM** : Single Numerology OFDM

**SUL** : Supplementary UownLink

**TDD** : Time Division Duplex

**TDMA** : Time Division Multiple Access

**UDM** : Unified Data Repository

**UDR** : Unified Data Repository

**UE** : Up Equipment

**UIT** : Union International Telecommunication

**UL** : Up Link

**UPF** : User Plane Function

**uRLLC** : ultra Reliable Low Latency Communication

**VN** : Variable Node **WSN** : Wariable Sub-carrier Numerology

Depuis les années 90, les réseaux de télécommunications ont connu un essor considérable, particulièrement les réseaux mobiles. En effet, en à peine trois décennies, nous sommes passés de téléphones très volumineux ne pouvant supporter que de courtes communications, à de petits smartphones capables de rivaliser avec les ordinateurs les plus performants. Devant les exigences toujours plus élevées des consommateurs, les opérateurs se sont retrouvés dans l'obligation de constamment améliorer les performances de leurs réseaux.

La dernière technologie de réseau radio mobile développée par le groupe IMT (International Mobile Telecommunications) est la 5G, qui, de par diverses améliorations que nous détaillerons dans notre premier chapitre, permet d'offrir un niveau de performance jusque là inimaginable. Elle promet, entre autres, un réseau plus diversifié avec une couverture sans faille, des débits de données plus élevés, des services variés, une connectivité massive et une fiabilité nettement supérieure à celle de toute génération précédente de communication mobile. Par rapport à l'évolution à long terme (LTE), la 5G annonce une multiplication par mille du volume de données et du nombre de dispositifs connectés par zone, une amélioration de 100 fois des débits de données des utilisateurs, une réduction de la consommation d'énergie par un facteur 10 et une diminution de la latence par un facteur 5.

Seulement voilà, un tel niveau de performance vient avec son lot d'inconvénients, le plus important étant que une telle densité et diversité de connexion ne peut exister sans engendrer des interférences, qui font l'objet d'innombrables recherches au sein de la communauté scientifique à travers le monde.

Nous avons décidé, pour notre étude, de nous baser sur les interférences inter-numerologies, qui sont causées par le Network slicing, qui est une des technologies clés des réseaux de 5<sup>me</sup> génération, et qui consiste à allouer à chaque utilisateur la quantité de ressources nécessaire à son application, contrairement à la 4G, où la même quantité de ressources était allouée à chaque utilisateur. Le slicing consiste à configurer différents espacements de sous-porteuses ou SubCarrier Spacing (SCS), selon les nécessités de chaque applications. Mais une telle mesure engendre la perte de l'orthogonalité des sous-porteuses, qui vont donc interférer les unes sur les autres.

La littérature scientifique, à travers plusieurs méthodes, s'est basée sur la réduction des in-

tèrférences inter-numèrologies, etles techniques qui ont été appliquées jusqu'à prèsent ont connu des fortunes diverses, de certaines n'ayant pas apporté des résultats satisfaisants, à d'autres étant trop complexes ou trop couteuse.

Nous proposons dans ce prèsent mèmòire une mètode qui consiste en quelques sortes à contourner le problème, en effet, nous nous sommes attelés à renforcer les données à transmettre par un codage FEC(Forward Error Encoding) et par la technique SCMA (Sparse Code Multiple Access), de façon à rèduire l'effet de INI (Inter Numerology Interferences.

Notre mèmòire sera organisé en trois chapitres :

- Chapitre 1 : Un chapitre introductif dans lequel nous avons procédé la présentation du réseau 5G, ses trois principaux services, son architecture ainsi que les nouveaux standards radios qui lui sont propres.
- Chapitre 2 : inclut la classification des types interférences, la présentation de la multi numèrologie et de l'interférence qu'elle provoque(INI, qui représente l'objet de notre présente étude.
- Chapitre 3 : comporte le schéma Bloc de transmission suivi par notre algorithme, la définition des différentes techniques appliquées ainsi qu'une discussion de nos résultats et une comparaison avec quelques travaux récents.

Nous finirons par une conclusion générale et nos références bibliographiques.

---

---

# CHAPITRE 1

---

## GENERALITES SUR LA 5G

### 1.1 INTRODUCTION

Comme mentionné dans notre introduction générale, le groupe IMT a développé la technologie 5G pour satisfaire des utilisateurs toujours plus exigeants. Dans ce présent chapitre, nous allons détailler les défis auxquels doit faire face cette nouvelle génération de réseaux mobiles, sa principale nouveauté qui est la création de trois principales familles d'usage :

- eMBB(enhanced Mobile Broad Band)
- mMTC(massive Machine Time Communication)
- uRLLC(ultra Reliable Low Latency Communication)

Chacune de ces familles à été mise en place pour répondre à des nécessités spécifiques des utilisateurs. Nous procéderons également à la présentation de la nouvelle architecture du réseau, ainsi qu'aux différents nouveaux standards radio qu'il apporte.

### 1.2 Réseau 5G IMT-2020

Les technologies mobiles 3G et 4G se sont principalement focalisées sur la mise en œuvre d'un accès large bande mobile, fournissant des débits de plus en plus élevés. Cet objectif continue en 5G avec une capacité et des débits plus élevés requis pour des services tels que

la vidéo. Mais le futur réseau 5G fournira un accès mobile à n'importe quelle entité pour la mise en œuvre de l'Internet des objets (Internet of Things, IoT). En effet, les compteurs et les capteurs sont des exemples de machines qui devront être connectées. Tout cela change la nature du réseau puisque la 5G devra absorber la demande de ces objets qui, contrairement aux smartphones, sont peu gourmands en débit et en consommation d'énergie. D'ici deux ans, plus de 20 milliards d'objets connectés, soit trois fois plus que le nombre d'êtres humains intégreront le réseau mobile. Il ne s'agirait donc plus d'une communication spécifique à la téléphonie mobile. Les standards de chaque génération du réseau mobile sont spécifiés par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT, une agence de l'ONU) et le 3GPP (3rd Generation Partnership Project). L'UIT a défini le cadre et les standards de base de la 5G sous la dénomination IMT-2020 (International Mobile Telecommunications).

### 1.2.1 Défis de la 5G

L'enjeu de la 5G n'est pas de répondre aux problèmes d'aujourd'hui qui ne nécessitent que des efforts financiers et logistiques de la part des opérateurs pour améliorer leur couverture. Non, c'est pour les utilisations de demain qu'est pensée la 5G : l'ensemble des usages qui subiront de plein fouet les limitations de nos infrastructures.

Les principaux défis auxquels doit faire face la 5G sont[1, 2] :

- Répondre aux besoins exponentiels en matière de télécommunication, notamment au nombre d'appareils connectés, de débits et de nouveaux cas d'usages
- Répondre aux exigences de l'utilisation des nouvelles bandes de fréquences (ondes millimétriques) en termes de modulation du signal par exemple, le type d'antennes et terminaux adéquats.
- Faire face aux difficultés liées au déploiement : en termes d'investissement et d'infrastructures. De plus la 5G ambitionne aussi de s'attaquer à des marchés très ciblés comme ceux de l'industrie, de la santé, de la ville intelligente et des véhicules connectés. Elle contribuera à révolutionner ces marchés.

### 1.2.2 Objectifs techniques de la 5G

L'objectif principal consiste à faire évoluer les réseaux de la 4G pour répondre à différents besoins complémentaires : augmenter les débits pour les usages courants de la téléphonie mobile, supporter des communications à basse consommation et longue portée pour les objets connectés et enfin des communications quasi-temps réel pour les applications critiques. Le tout en ciblant des usages bien précis comme ceux des véhicules connectés et autonomes, de la santé et des objets connectés. Voici les objectifs à atteindre selon les recommandations dans IMT-2020 définis sur 9 KPI (Indicateurs de Performances Clés) :

- Une bande passante d'au moins 100MHz ;
- Des bandes passantes allant jusqu'à 1GHz sont requises pour les hautes fréquences (mmWave)
- Une densité de connectivité de 1million d'appareils/km<sup>2</sup>
- Un débit théorique de 20Gbit/s en liaison descendante, et 10Gbit/s en liaison montante ;
- Un débit perçu par l'utilisateur de 100Mbit/s en liaison descendante, et 50Mbit/s en liaison montante ;
- Une latence inférieure à 1ms ;
- Une mobilité de 500 km/h ;
- Une disponibilité de 99.999 % ainsi que 100 % de couverture réseau ;
- Une réduction de la consommation d'énergie à 90 %.

Selon ces objectifs, la 5G devra pouvoir offrir un débit utilisateur et un débit maximal respectivement 10 et 20 fois supérieur à ce qui est disponible actuellement. La densité maximale de connexions sera multipliée par 10 et la latence divisée par au moins 10 (la latence point à point cible est de 1 ms, contre 30 à 40 ms à ce jour).

Dans un premier temps, la 5G souhaite apporter des débits de l'ordre du gigabit par seconde, en moyenne 100Mbits/s perçus par chaque utilisateur jusqu' à 20 Gbits/s en théorie, mais sa priorité n'est pas la vitesse brute : elle veut surtout réduire le temps de latence dans la transmission de données. À l'heure actuelle, le temps de réaction des réseaux mobiles peut

atteindre la demi-seconde, voir plus quand les réseaux sont surchargés. Une demi-seconde, ça paraît peu, mais c'est beaucoup trop quand il est question, par exemple, de voitures autonomes. (Pour permettre à une voiture d'éviter un accident, ou pour un robot d'effectuer une opération chirurgicale précise à distance). La 5G va offrir un temps de latence de 1ms. Le problème principal est de résoudre la surcharge du réseau due à la forte concentration de terminaux utilisateurs en milieu urbain. La solution se trouve sûrement du côté des Small Cells. Il s'agit de petites antennes qui pourront être intégrées au mobilier urbain (lampadaires, bancs, poubelles). Celles-ci permettront de répartir efficacement les utilisateurs sur plus d'antennes à haut débit selon leur position, au lieu de les entasser sur une seule et même antenne-relais.

Enfin, la 5G vise à réduire la consommation énergétique de 90%, concrètement : 3 jours sans charger pour les appareils en communications et une durée de vie de batterie équivalent à 10 à 15 ans pour les objets connectés de faible consommation [3].

### 1.2.3 Famille d'usages et type de services

Considérés simultanément, ces défis semblent impossibles à réaliser. Par conséquent, IMT-2020 et 3GPP ont décidé de les affronter séparément. Pour ce faire, trois grandes familles d'usage ont été définies, elles sont resumées dans la figure 1.1.

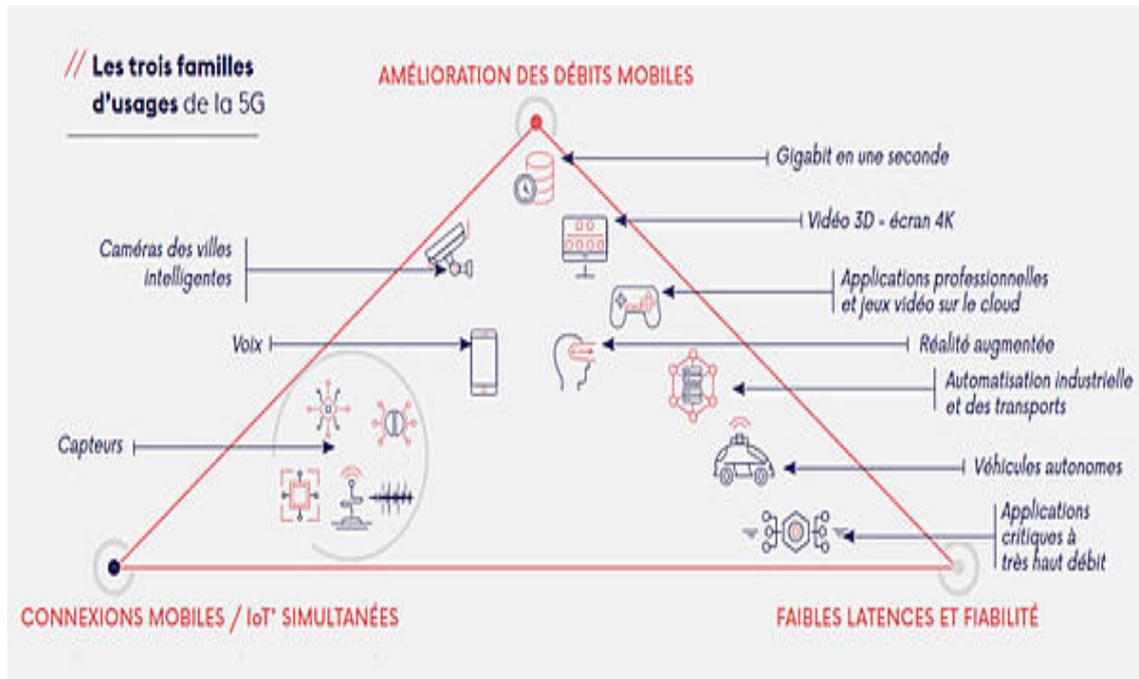


FIGURE 1.1 – Familles d’usage de la 5G

1. L’eMBB(enhanced Mobile Broad Band) Ce service se trouve dans la continuité des précédentes générations de téléphonie mobile, il permet de répondre à l’augmentation exponentielle de l’utilisation des données mobiles. Les applications de cette catégorie sont typiquement des flux vidéo de qualité de plus en plus grande et aussi des applications de réalité virtuelle et augmentée. L’objectif est donc de pouvoir répondre à une demande toujours plus grande en termes de quantité de données et de vitesse de transfert [4]. Le trafic de l’eMBB se caractérise par de grandes charges utiles et par un modèle d’activation de dispositif qui reste stable sur un intervalle de temps prolongé. Cela permet au réseau de programmer des ressources sans fil vers les appareils eMBB de sorte que deux appareils eMBB n’accèdent pas simultanément à la même ressource. L’objectif de cet usage est de maximiser le débit, tout en garantissant une fiabilité modérée, avec un taux d’erreur paquet (PER) de l’ordre de  $10^{-3}$ [5] L’eMBB introduit deux améliorations technologiques majeures :
  - Le décalage du spectre de fréquence dans la gamme des ondes centimétriques et millimétriques, afin d’obtenir des répartitions de bandes passantes supérieures.
  - Un réseau d’antennes évolué avec des dizaines ou même des centaines d’éléments

d'antenne TX/RX pour permettre la MIMO massive et la formation de faisceaux.

2. Le mMTC(massive Machine Time Communication)

Internet des objets rentre dans cette catégorie. Il s'agit dans cette catégorie de pouvoir gérer un nombre très important de connexions (jusqu'à un million par kilomètre carré). La quantité de données à transmettre par communication est en général limitée et la rapidité de transfert peu contraignante. Un domaine d'application typique est la ville intelligente avec des réseaux de capteurs pour gérer différents services[6]. Ce grand nombre d'appareils mMTC peuvent être connecté à une station de base (BS) donnée, mais à un moment donné, seul un sous-ensemble inconnu (aléatoire) d'entre eux devient actif et tente d'envoyer leurs données. Le grand nombre de dispositifs mMTC potentiellement actifs rend impossible l'attribution a priori ressources vers des appareils mMTC individuels. Au lieu de cela, il est nécessaire de fournir des ressources qui peuvent être partagées via un accès aléatoire. La taille du sous-ensemble actif de dispositifs mMTC est une variable aléatoire, dont la valeur moyenne mesure le taux d'arrivée du trafic mMTC. L'objectif dans la conception de mMTC est de maximiser le taux d'arrivée qui peut être pris en charge dans une ressource radio donnée. Le PER ciblé d'une transmission mMTC individuelle est généralement faible, de l'ordre de  $10^{-1}$ [5].

3. L'uRLLC(ultra Reliable Low latency Communication)

La fiabilité et le temps de réponse y sont primordiaux, l'application phare de cette catégorie est le véhicule autonome mais les communications des services de sécurité et d'urgence sont également concernées (télémédecine). De ce fait il ne doit pas y avoir d'échec ou de coupure de communication et la transmission doit être le plus rapide possible, autrement la moindre erreur peut être fatale, ce qui fait que certaines exigences d'applications sont primordiales telles que : -Latence améliorée. -Fiabilité accrue. -Disponibilité supérieure. -Sécurité plus élevée.

Les transmissions URLLC sont également intermittentes, mais l'ensemble des émetteurs URLLC potentiels est beaucoup plus petit que pour mMTC. La prise en charge

de ces transmissions nécessite une combinaison d'ordonnancement, de manière à assurer une certaine prévisibilité dans les ressources disponibles et ainsi prendre en charge une haute fiabilité, ainsi que l'accès aléatoire, afin d'éviter que trop de ressources soient inactives en raison du trafic intermittent. En raison des exigences de faible latence, une transmission URLLC doit être localisée dans le temps. La diversité, qui est essentielle pour atteindre une haute fiabilité, ne peut donc être obtenue qu'en utilisant des ressources multifréquences ou spatiales. Le taux de transmission d'une URLLC est relativement faible, et la principale exigence est d'assurer un haut niveau de fiabilité, avec un PER typiquement inférieur à  $10^{-5}$ , malgré les petites longueurs de bloc[5].

## 1.3 Architecture du réseau 5G

Les opérateurs mobiles devront choisir entre le déploiement d'un réseau standalone (SA) 5G complet qui offre une expérience 5G E2E ou le déploiement d'un réseau non standalone (NSA) 5G qui sera complété et soutenu par un réseau LTE. Alors que la première prendra du temps à se développer, la seconde offre des avantages 5G limités, confinés à l'amélioration de certains indicateurs clés de performance du réseau[7].

En outre, on s'attend à ce que la NSA 5G soit moins gourmande en capital que l'architecture SA 5G. Cependant, cela pourrait ne pas être le cas. Par conséquent, le choix sera basé sur la disponibilité du spectre et les exigences des cas d'utilisation plutôt que sur le budget.

### 1.3.1 NSA et SA

Pour la partie coeur, le réseau 5G a d'abord commencé par une architecture NSA(Non-StandAlone), ou le réseau dépendait encore des équipements de l'ePC(ou evolved Packet Core) déjà déployé en LTE. Actuellement, une migration vers une architecture totalement indépendante est entrain d'être mise en place[7].

1. Architecture du réseau non-standalone (NSA) Le réseau 5G non-standalone, fait référence au fait d'avoir uniquement des cellules 5G NR en place avec l'EPC comme coeur. Les opérateurs déploieront des cellules 5G et dépendront entièrement du réseau LTE

existant pour toutes les fonctions de contrôle et les services complémentaires.

L'architecture NSA 5G fonctionne selon une structure maître-esclave, où le nœud d'accès 4G est le maître et le nœud d'accès 5G est l'esclave (figure 1.2).

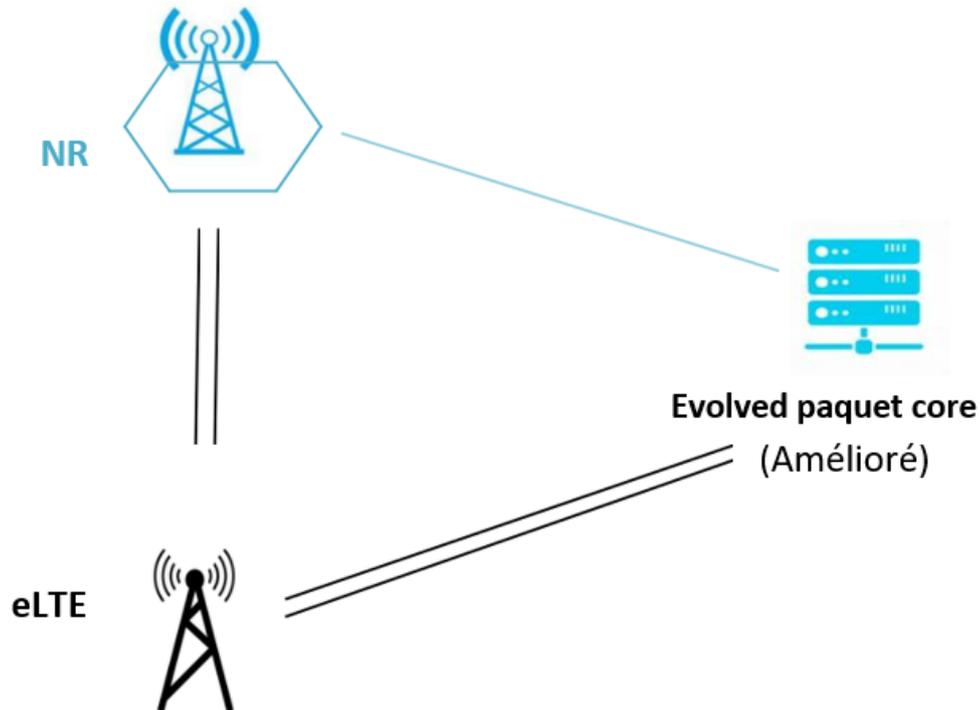


FIGURE 1.2 – architecture du réseau NSA

## 2. Architecture du réseau standalone (SA)

SA désigne le fait d'avoir un réseau 5G indépendant. Il disposera à la fois de la nouvelle interface radio 5G, New Radio (NR), et du 5G Core (5GC). Un réseau 5G standalone offre à l'utilisateur une expérience 5G de bout en bout. Le réseau SA inter-opérera toujours avec le réseau 4G/LTE existant pour assurer la continuité du service entre les deux générations de réseaux (figure 1.3).

Le réseau 5G peut fonctionner de manière indépendante. L'interopérabilité avec le réseau LTE a lieu afin de couvrir les zones qui ne sont pas encore couvertes par la 5G et de connecter les utilisateurs de la 5G avec les utilisateurs non-5G.

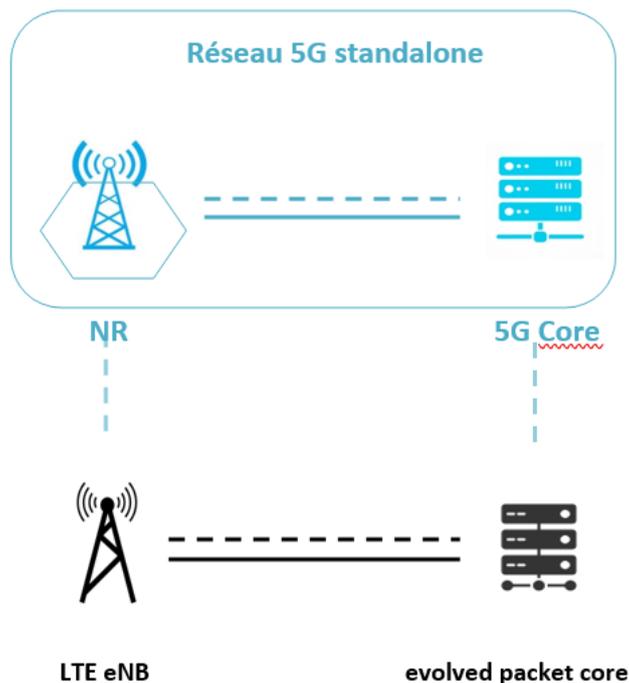


FIGURE 1.3 – architecture du réseau SA

### 1.3.2 Réseau d'accès

L'accès radio 5G (NG-RAN : Next Generation RAN) est constitué de stations de base de nouvelle génération qui forment le nœud de connexion des mobiles avec le cœur réseau 5G (5GC).

Les mobiles UE communiquent avec les stations de base soit par un lien radio 5G, soit par un lien radio 4G. Si la communication est en 5G, la station de base se nomme gNB (next Generation Node Base Station), si la communication est en 4G, la station de base est une station de base 4G eNB évoluée pour s'interconnecter avec le cœur réseau 5G. La station de base se nomme ng-eNb (Next Generation eNb) ou eLTE-eNB[7].

Les fonctions de la station de base gNb sont assez similaires avec l'entité eNB. Cependant, les différences concernent la gestion de la qualité de service par flux et non par support (bearer) et la gestion des tranches de réseau (Slices) sur l'interface radio(figure 1.4).

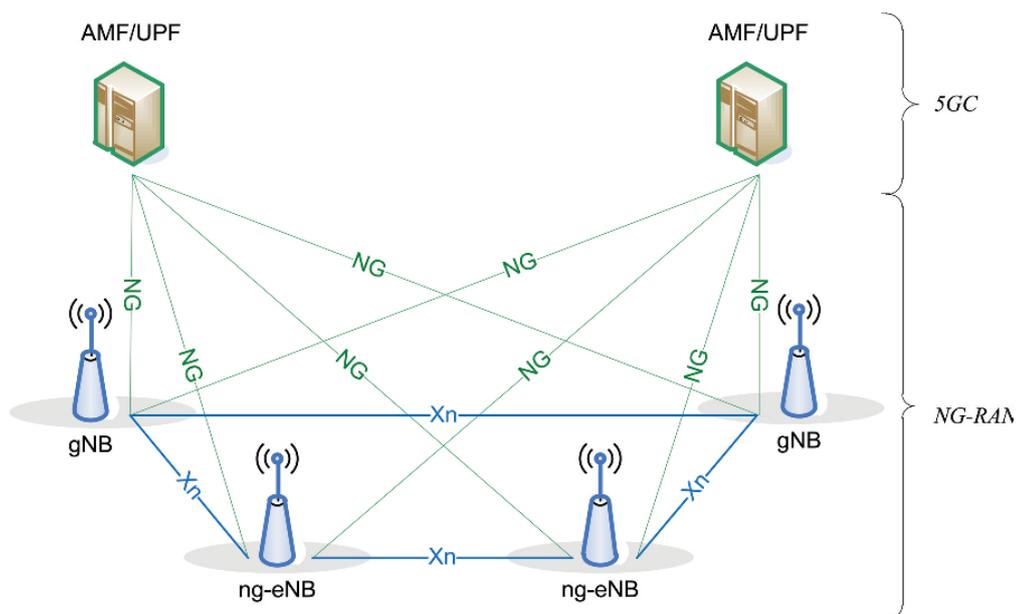


FIGURE 1.4 – architecture du réseau SA

### 1.3.3 Réseau Coeur : NG-CN ou 5GC

Le cœur réseau 5G est adapté pour la virtualisation du réseau et s'appuie sur le découpage du plan de contrôle (Control Plane) et du plan utilisateur (User Plane).

Ainsi, l'entité MME qui gère à la fois l'attachement des mobiles, la localisation et la création des supports (bearers) se décompose en deux entités fonctionnelles en 5G :

- L'entité AMF (Access and Mobility Management Function). L'entité AMF établit une connexion NAS avec le mobile UE et a pour rôle d'enregistrer (attachement) les mobiles UE et de gérer la localisation des mobiles sur le réseau 3GPP et/ou non 3GPP.
- L'entité SMF (Session Management Function). L'entité SMF permet de contrôler les sessions PDN.

L'entité SMF est choisie par l'entité AMF puisque l'entité AMF gère la signalisation NAS avec le mobile. L'entité SMF est responsable de la gestion du plan de contrôle. L'entité SMF a une interface avec l'entité qui gère la politique des flux (PCF : Policy Charging Function). Le plan de transport est composé de passerelle de données qui réalise des mesures sur les données transportées et réalise l'interconnexion avec les réseaux Data (PDN). Pour le cœur

réseau 5G, les fonctions du plan de transport sont à la charge de l'entité UPF (User Plane Function). L'entité UPF communique avec l'entité SMF par l'interface Sx et selon le protocole PFCP.

L'entité PCRF de l'architecture 4G permet de définir les règles de contrôle et les politiques de flux avec l'entité SGW/PGW. En 5G, l'entité PCRF se renomme PCF et permet de contrôler les flux à la fois au niveau de l'entité SMF mais également au niveau de l'entité AMF afin de pouvoir apporter une meilleure granularité sur les flux autorisés en prenant en compte la localisation du mobile UE.

Le profil utilisateur (son abonnement, ses droits, ...) est sauvegardé dans une base de données UDR accessible via l'entité UDM (Unified Data Management). L'entité UDM conserve les profils de sessions de données (sessions PDU) et de l'entité AMF sur laquelle est attaché le mobile UE (éventuellement les entités AMF pour un accès 3GPP et non 3GPP sur un autre opérateur).

L'enregistrement du mobile nécessite une double authentification réalisée au niveau de l'entité AMF et du mobile UE à partir de vecteurs d'authentifications fournies par l'entité AUSF (AUthentication Server Function).

Enfin, l'entité NSSF (Network Slice Selection Function) est une entité permettant d'assister l'entité AMF de la sélection des instances logiques du réseau pour une tranche de réseau (slice) défini[3, 8]

## 1.4 Nouveaux standards radio en 5G

### 1.4.1 Bande de fréquences FR1, FR2

Dans les spécifications radio 3GPP, la nouvelle radio a été développée pour fonctionner dans deux régions de fréquence, la région sous 6GHz sous le nom de FR1 (Frequency Range1), et la région mmWave de 24.25-52.60 GHz sous le nom de FR2 (Frequency Range 2) [9]. Dans chaque bande, la nouvelle radio peut fonctionner soit en mode FDD (Frequency Devision Duplexing), soit en mode TDD (Time Devision Duplexing). Pour fournir une capacité supplémentaire, une bande de liaison descendante supplémentaire (SDL) ou une bande de liaison montante

supplémentaire(SUL) est utilisée.

La vaste gamme de fréquences que 5G NR est nécessaire pour supporter des nouvelles applications. Pour le FR1, trois espacements de sous-porteuse (15,30et60KHz) sont identifiés pour fonctionner en bandes sous-6GHz, en FR2 deux espacements de sous-porteuse (60et 120KHz) sont identifiés pour fonctionner en bandes millimétriques. Les largeurs de bande varient en fonction du SCS (Sub Carriers Spacing), avec beaucoup de préférence pour 5MHz de largeur de canal avec un SCS de 15KHz[9].

Le FR1 couvre une gamme de fréquences de 450 MHz à 6 GHz (cette limite peut être étendue à 7.125 GHz dans Rel-16), tandis que FR2 couvre une gamme de fréquences de 24.25à 52.6 GHz. Notez que les bandes de fréquences au-delà de 52.6 GHz seront prises en charge dans les futures versions du 3GPP.

La bande passante du canal gNB (Next Generation Node B) prend en charge une seule porteuse dans la liaison montante ou la liaison descendante. Différentes largeurs de bande decanalUE(UserEquipment) peuvent être prises en charge dans le même spectre pour transmettre et recevoir des UEs connectés au gNB. L'attribution de la bande passante du canal UE est flexible à l'intérieur de la bande passante du canal gNB. La station de base NR peut émettre vers et / ou recevoir depuis une ou plusieurs parties de bande passante UE BWP-BandwidthPart) qui sont inférieures ou égales au nombre de blocs de ressources de la porteuse RF (RadioFrequency)[9].

### 1.4.2 Modes de duplexage déployés

Le « duplexage » est le mode de circulation utilisé pour transmettre les données à la fois dans le sens descendant ( downlink ); de l'antenne relais vers l'utilisateur et dans le sens montant (uplink); de l'utilisateur vers la station de base.

Pour la 2G, 3G et 4G, un duplexage fréquentiel, dit FDD (Frequency Division Duplexing), est utilisé, il 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 downlinket d'autres pour les transmissions uplink (Figure 1.5). 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. Cependant, les échanges de données entre les antennes d'un réseau de téléphonie mobile et les mobiles apparaissent aujourd'hui très largement déséquilibrés dans le sens descendant (des antennes vers les mobiles). Les utilisateurs reçoivent en effet en moyenne beaucoup plus de données du réseau (vidéo, internet, téléchargement d'email) qu'ils n'en envoient (envoi d'email). Le mode FDD n'est pas assez flexible pour tenir compte de ce déséquilibre entre flux de données downlink et uplink.

La 5G fonctionne en mode TDD dans les nouvelles bandes de fréquences 5G, la même bande de fréquences est utilisée alternativement par le terminal et la station de base pour émettre. En effet, afin d'accroître la flexibilité qu'apporte les réseaux de 5eme génération et de rendre l'utilisation du spectre plus efficace, le TDD devient de plus en plus courant et important. TDD utilise la même fréquence pour chaque direction, avec une trame qui inclut différentes périodes de temps et des créneaux temporels pour les communications de liaison descendante ou de liaison montante. En modifiant la durée de ces performances, les performances du réseau peuvent être adaptées pour répondre à différents besoins et aider à fournir la meilleure expérience possible (figure 1.5)[10].

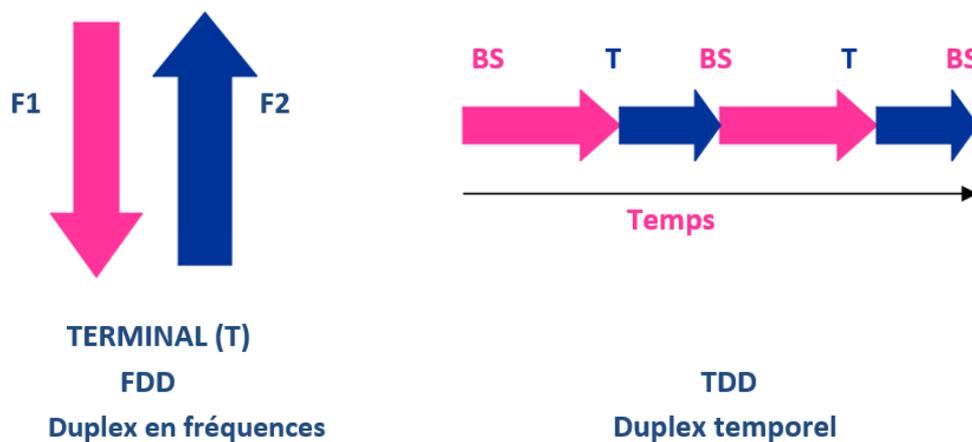


FIGURE 1.5 – Modes de duplexage en 5G

L'utilisation du duplexage temporel TDD présente notamment l'avantage de permettre une grande flexibilité sur la répartition downlink/uplink ; mais il provoque des interférences entre antennes et entre terminaux qui nécessitent de mettre en place des techniques spéci-

fiques pour y remédier. Trois solutions techniques principales sont identifiées pour permettre la coexistence de plusieurs utilisateurs exploitants des réseaux TDD dans des bandes de fréquences adjacentes :

- la synchronisation des réseaux qui impose un format d'émission commun aux opérateurs ;
- l'usage de bandes de garde et de filtres spécifiques par opérateur ;
- la séparation spatiale des émetteurs (séparation géographique) ;

Le duplexage temporel TDD implique que lors des périodes uplink, les antennes n'émettent plus : l'exposition due aux antennes du réseau est donc nulle pendant ces instants.

### 1.4.3 Structure de trame 5G NR

Le release 15 de 3GPP fournit les spécifications de la couche PHY du 5G NR. Le duplexage par division de fréquence (FDD) et le duplexage par division de temps (TDD) seront tous les deux pris en charge.

Différentes numéologies seront utilisées afin de traiter les différents cas d'utilisation de la 5G. La structure de trame suit une grille de temps et de fréquence similaire à celle de LTE, avec un nombre plus élevé de paramètres configurables. L'espacement des sous-porteuses étant un multiple de 15 kHz(SCS en LTE).

Dans le release 15, il y aura au maximum 3 300 ou 6 600 sous-porteuses, pour une largeur de bande maximale de 400 MHz. Une trame dure 10 ms, avec 10 sous-frames de 1 ms, c'est-à-dire 1 trame contient 10 sous-frames.

Il sera possible de multiplexer différentes numéologies pour une fréquence porteuse donnée et toute la communication doit être alignée sur une base de sous-frame. Un slot est composé de 14 symboles OFDM. Il existe plusieurs slots dans une sous-frame et leur nombre est donné par la numéologie utilisée, car la durée du symbole est inversement proportionnelle à l'espacement des sous-porteuses.

La numéologie évolutive devrait permettre l'espacement des sous-porteuses d'au moins 15

kHz à 480 kHz. Toutes les numérogies avec un espacement de 15 kHz et plus, indépendamment de l'en-tête CP, aligné sur les limites du symbole toutes les 1 ms dans la porteuse NR[10, 11].

### 1.4.3.1 Structure de la trame temporelle de 5G NR

La figure 1.6 illustre la structure de la trame temporelle du réseau 5G. Dans le domaine

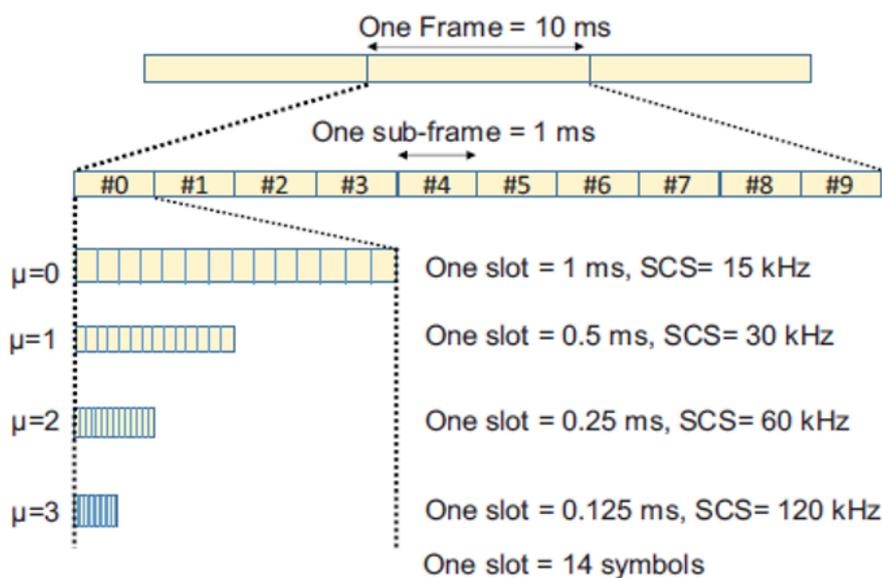


FIGURE 1.6 – Trame temporelle

temporel, une trame radio a une durée de 10 ms. Chaque trame radio est divisée en 10 sous-trames d'une durée de 1 ms. Chaque sous-trame est ensuite divisée en emplacements. Le nombre d'emplacements dans une sous-trame dépend de l'espacement des sous-porteuses, comme indiqué dans le tableau 1.1[12].

### 1.4.3.2 Structure de la trame fréquentielle de 5G NR

Dans le domaine fréquentiel, les transmissions sont organisées en blocs de ressources, un bloc de ressources occupe 12 sous-porteuses.

Un bloc de ressources NR (RB) contient 14 symboles dans le domaine temporel et 12 sous-porteuses dans le domaine fréquentiel semblables au LTE. En bande LTE, la largeur de

TABLE 1.1 – Numerologies 5G

Numérologie	Espacement des sous-porteuses(SCS)	Durée d'un slot	slots par sous-trame
0	15KHz	1 ms	1
1	30KHz	500 $\mu$ s	2
2	60KHz	250 $\mu$ s	4
3	120KHz	125 $\mu$ s	8
4	240KHz	62.5 $\mu$ s	16

bande de bloc de ressources est fixée à 180 KHz mais en NR, elle n'est pas fixe et dépend de l'espacement des sous-porteuses[12]

- Numérologie  $\mu = 0, \Delta f = 15kHz$ , un bloc de ressource est 180 kHz( $15 \times 12$ ) dans le domaine fréquentiel et 1 ms le domaine temporel.
- Numérologie  $\mu = 1, \Delta f = 30kHz$ , un bloc de ressource est 360 kHz( $30 \times 12$ ) dans le domaine fréquentiel et 0.5 ms le domaine temporel.
- Numérologie  $\mu = 2, \Delta f = 60kHz$ , un bloc de ressource est 720 kHz( $60 \times 12$ ) dans le domaine fréquentiel et 0.25 ms le domaine temporel.
- Numérologie  $\mu = 3, \Delta f = 120kHz$ , un bloc de ressource est 1440 kHz( $120 \times 12$ ) dans le domaine fréquentiel et 0.125 ms le domaine temporel.
- Numérologie  $\mu = 4, \Delta f = 240kHz$ , un bloc de ressource est 2880 kHz( $240 \times 12$ ) dans le domaine fréquentiel et 0.0625 ms le domaine temporel.

#### 1.4.4 Network slicing (découpage de réseau)

Le découpage du réseau peut être défini comme le processus de création de tranches dans le réseau aux besoins des différents utilisateurs, dans chacune de ces tranches sont créés des attributs, tels que la faible latence, la bande passante ultra-élevée et le haut débit mobile. Le principe du slicing est de découper le réseau pour allouer les ressources par type d'usage, et ainsi prioriser certains services. Par exemple, une application de streaming en temps réel

nécessite un réseau à faible latence, tandis que la diffusion de vidéos haute définition nécessite une tranche de bande passante ultra-élevée.

La figure 1.7 illustre le principe du Network Slicing EN 5G.

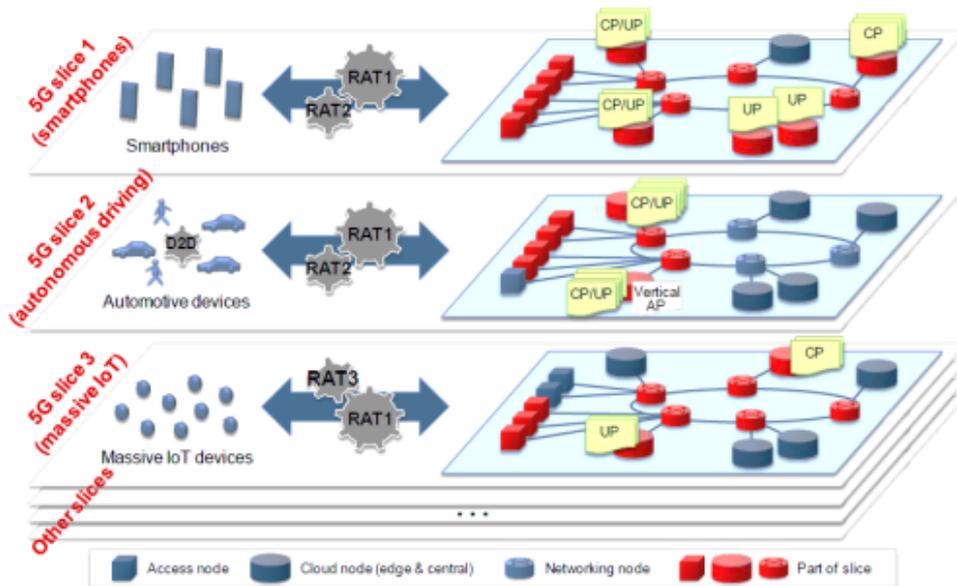


FIGURE 1.7 – principe du network slicing

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, Device to Device) et la tranche 3 pour les communications massives d'objets (mIoT, massive Internet of Things). 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 cœur sont sollicitées différemment selon la tranche considérée[13].

Avec l'avènement de la technologie 5G, le réseau central et le RAN ne faisaient pas de distinction entre les appareils qui s'y connectaient. Le même réseau central et le même RAN desservaient tous les appareils, d'où la nécessité d'une distinction claire entre ces zones du réseau. Le découpage en tranches du réseau peut être mis en œuvre sur différentes zones du réseau, telles que le réseau central, le RAN et l'équipement utilisateur.

## 1.5 Device to device ( D2D)

La communication « device to device » (D2D) est une technologie prometteuse pour les nouveaux réseaux sans fils. Elle permet une communication directe entre dispositifs pour assurer l'amélioration de la fiabilité, le débit, la latence et la consommation. D2D permet également la diminution de la charge du réseau et l'extension de la couverture cellulaire.

De plus, un device peut relayer une communication entre une station de base et un autre device situé en dehors de sa zone de couverture. Par conséquent, la communication D2D peut contribuer à répondre aux exigences du futur réseau radio 5G.

Ces avantages résultent de la proximité des utilisateurs utilisant la communication D2D (gain de proximité), une réutilisation spatiale accrue des ressources de temps et de fréquence (gain de réutilisation) et de l'utilisation d'une seule liaison en mode D2D plutôt que d'utiliser à la fois une ressource de liaison montante et une ressource de liaison descendante lors de la communication via la station de base en mode cellulaire (gain de saut)[14].

Dans le cadre de la communication d'appareil à appareil (D2D), un organisme de radiodiffusion alloue du spectre à l'UE pour qu'elle transmette directement les données planifiées par l'utilisateur.

Le spectre est alloué de l'une des manières suivantes [15] :

- Utilisation des ressources restantes des cellules cellulaires.
- Réutilisation des ressources de la liaison descendante des cellules cellulaires.
- Réutilisation des ressources de la liaison montante des cellules cellulaires.
- Contrôle des interférences : Un contrôle approprié de la puissance peut coordonner les interférences entre les utilisateurs D2D et les autres utilisateurs des réseaux cellulaires lorsque le D2D réutilise les ressources cellulaires.

## 1.5.1 Massive MIMO et Beamforming

### 1.5.1.1 Massive MIMO

La MIMO peut être résumé selon un principe : le multiplexage spatial MIMO consiste à utiliser simultanément les mêmes fréquences radioélectriques pour transmettre des signaux différents. Cela signifie que plusieurs antennes d'émission d'une station de base peuvent émettre des signaux différents et que plusieurs antennes de réception d'un appareil peuvent les recevoir et les diviser simultanément. Les réseaux MIMO standard utilisent généralement deux ou quatre antennes pour transmettre les données et le même nombre pour les recevoir. Massive MIMO, en revanche, est un système MIMO avec un nombre d'antennes particulièrement élevé. Massive MIMO augmente le nombre d'antennes d'émission (des dizaines ou plus de 100 éléments) sur une station de base[16].

MIMO est utilisé dans de nombreuses technologies sans fil et RF modernes, notamment le Wi-Fi et l'évolution à long terme (LTE). La variante initiale du MIMO utilisait deux émetteurs et deux récepteurs, 2x2 MIMO, et les augmentations ultérieures de la puissance de traitement ont permis l'utilisation de flux de données plus simultanés dans les réseaux sans fil avec les réseaux 4G LTE actuels utilisant 4x4 MIMO.

Les longueurs d'onde très courtes aux fréquences mmWave entraînent des dimensions d'antenne plus petites et pour la 5G NR, le 3GPP a spécifié 32 antennes (32 x 32 MIMO) dans la version 15 , qui passeront à 64 et plus dans les versions futures. Cette expansion de la taille de l'antenne MIMO a conduit au terme Massive MIMO.

Le principe de fonctionnement des systèmes Massive MIMO repose sur les informations d'état de canal (CSI) connus à la station de base pour traiter de manière cohérente les signaux, c'est à dire pour effectuer le précodage et la détection. Lorsque le nombre d'antennes d'émission est beaucoup plus grand que le nombre d'antennes de réception, des précodeurs linéaires simples et des détecteurs sont suffisants pour offrir une performance presque optimale. Cependant, lorsque le nombre d'antennes d'émission est inférieur ou égal au nombre d'antennes de réception, la conception de précodeurs et de détecteurs présentant une complexité raisonnable devient plus difficile[17].

— **Exigences des réseaux MIMO massifs :** ‘

- Bandes de fréquences : Le nombre de dipôles d’antenne du MIMO massif dépasse largement celui des antennes traditionnelles. Par conséquent, la distance entre les dipôles ne doit pas être trop importante. Sinon, la taille de l’antenne sera trop importante pour répondre aux exigences d’installation technique. La distance entre les dipôles est liée à la bande de fréquences. Plus la bande de fréquences est élevée, plus la distance entre les dipôles est faible et plus le déploiement Massive MIMO est efficace. (Actuellement, le MIMO massif n’est utilisé que pour les bandes de fréquences supérieures à 2,6 GHz)[18].
- Mode de duplexage : Massive MIMO introduit la technologie de formation de faisceau. La réciprocité entre les canaux de liaison montante et de liaison descendante dans le système TDD facilite le calcul du poids de la formation de faisceau en liaison descendante. Par conséquent, le TDD est plus adapté au déploiement du MIMO massif.

Un nouveau signal de référence (CSI-RS) peut également être introduit pour calculer le poids de la liaison descendante dans le système FDD. Cependant, les performances du système FDD sont légèrement inférieures à celles du système TDD[18].

Massive MIMO se compose de plusieurs mini antennes qui permettent de gérer des milliers de communications simultanées, environ 1 million de connexions par kilomètre carré.

Ces antennes servent à diriger le signal en fonction du besoin de l’utilisateur, cette technique est appelée le Beamforming.

### 1.5.1.2 Beamforming (formation de faisceaux)

Beamforming est un type spécial de diagramme de rayonnement d’antenne, il s’agit d’une méthode pour concentrer la puissance rayonnée omnidirectionnelle de l’antenne dans une ou plusieurs directions spécifiques.

La formation de faisceaux est utilisée en tandem avec MIMO pour focaliser les faisceaux plus étroitement vers un UE individuel, permettant des densités de connexion plus élevées et minimisant les interférences entre les faisceaux individuels. Le beamforming est utilisé avec les systèmes d'antennes à réseau phasé pour focaliser le signal sans fil dans une direction choisie, normalement vers un appareil de réception spécifique. Il en résulte un signal amélioré au niveau de l'équipement utilisateur (UE), et fait également minimiser les interférences entre les signaux de l'UE individuel.

Dans le système 5G, la formation de faisceau désigne la transmission d'un signal de forme plus étroite de la station de base au récepteur de telle sorte que seul l'utilisateur prévu peut récupérer les informations tout en rejetant les interférences provenant d'autres directions. Le Beamforming peut se faire à la fois sur le côté émetteur et côté récepteur, lorsqu'il est fait du côté transmetteur il est appelé transmettre Beamforming, tandis que du côté récepteur, il est appelé recevoir Beamforming (figure 1.8)[19].

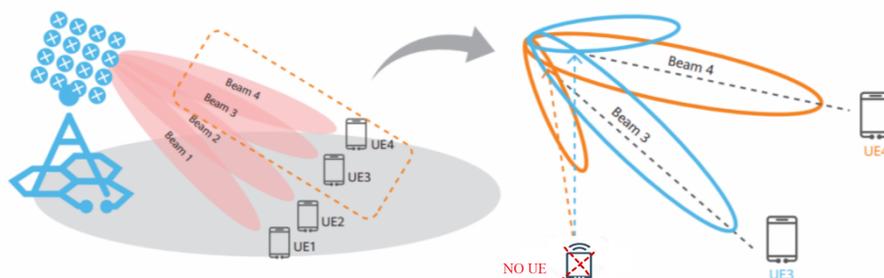


FIGURE 1.8 – Représentation du beamforming dans massive MIMO

## 1.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons d'abord présenté le réseau cellulaire 5G, les défis et les objectifs auxquels il doit faire face et les trois principaux services dont il dispose, à savoir le mMTC, l'uRLLC et l'eMBB. Ensuite nous avons soumis une brève présentation de l'architecture 5G, autonome et non autonome, ainsi que l'architecture du réseau cœur C-RAN et du réseau d'accès.

Par la suite, nous avons défini les nouveaux standard radio : les bandes de fréquences FR1

et FR2, le mode de duplexage utilisé et la structure de trame 5G. Afin de répondre aux exigences des services 5G, diverses technologies ont été mises en place, nous en avons cité quelques unes, les plus importantes étalt le M-MIMO, Beamforming ainsi que le Netwok-slicing qui représente la force de la 5G.

---

---

# CHAPITRE 2

---

## INTERFERENCE INTER-NUMERLOGIE

### 2.1 INTRODUCTION

Dans le monde des communications radio, l'accès et l'utilisation des fréquences sont limités et réglementés afin d'assurer une bonne cohabitation entre les différents standards et systèmes de communication qui ne cessent de se multiplier et de se développer.

La recherche actuelle dans ce domaine vise avant toute chose à accroître la qualité des services offerts aux utilisateurs c'est-à-dire l'augmentation du débit, l'accroissement de la fiabilité des transmissions, l'extension de la couverture pour les utilisateurs en bordure de cellule, hand-over à des vitesses de plus en plus rapides... Bien que toutes ces améliorations paraissent idéales mais elles engendrent des contraintes sur les systèmes, s'ensuit sont des interférences inévitables.

Dans ce second chapitre, nous allons d'abord parler sur les différentes interférences que l'on peut rencontrer lors des transmissions de données dans les systèmes de communication, puis on se focalisera sur l'interférence entre numéologies appelée INI étant donné que le réseau 5G utilise le concept de la multi numéologie.

## 2.2 Classification des interférences

Dans un réseau de communication sans fil à haute densité, la quantité de signal reçu est dégradée en raison de divers problèmes de diffusion et de perte de trajet, ce qui engendre des signaux indésirables.

Bien qu'il puisse exister plusieurs types d'interférences dans chaque réseau mobile, les interférences les plus courantes et les plus impactantes sont citées ci-dessous.

### 2.2.1 Interférence du canal adjacent

L'interférence du canal adjacent se produit lorsque le signal souhaité est brouillé par la bande de fréquence adjacente (canal) dans la même zone de couverture, comme illustré à la figure 2.1. L'interférence de canal adjacent peut être causée par le filtrage imparfait d'un récepteur, causant ainsi l'infiltration des fréquences proches au sein de la bande passante. Cependant, il peut s'agir de la conception tangible d'un filtre passe-bande qui ne conduit qu'une fréquence requise pour le traverser. Par conséquent, une technique fiable d'atténuation des interférences aide à réduire l'impact des interférences des canaux adjacents (figure 2.1)[20].

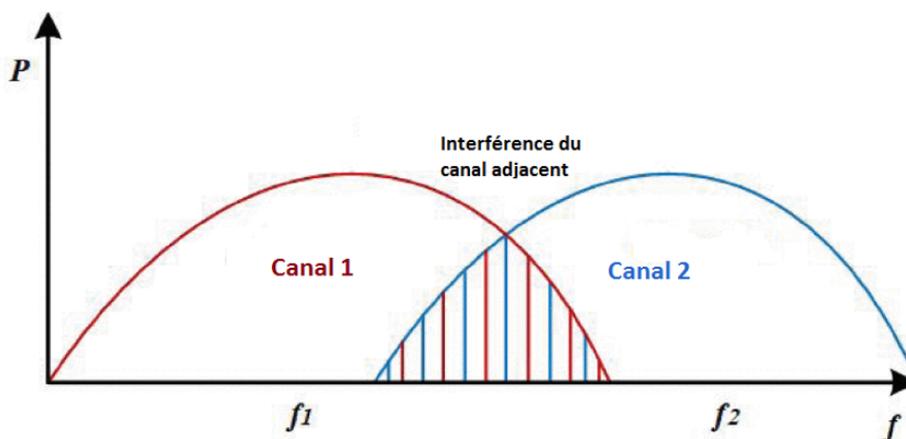


FIGURE 2.1 – Interférence du canal adjacent

### 2.2.2 Interférences intracellulaire et intercellulaire

Elle est due à l'utilisation simultanée d'une même ressource de communication pour transmettre des signaux entre plusieurs paires émetteur-récepteur, elle cause de fortes dégradations des performances de transmission, plus la distance est éloignée de sa source plus l'ICI devient gênant.

Les utilisateurs en bordure de cellule perçoivent d'une part un signal utile faible, et d'autre part subissent l'interférence intercellulaire de par leur plus grande proximité des cellules voisines. L'interférence intracellulaire peut facilement être éliminée par l'OFDMA contrairement à l'interférence intercellulaire à cause du manque de canaux pour rendre orthogonales toutes les transmissions du système( figure 2.2)[21].

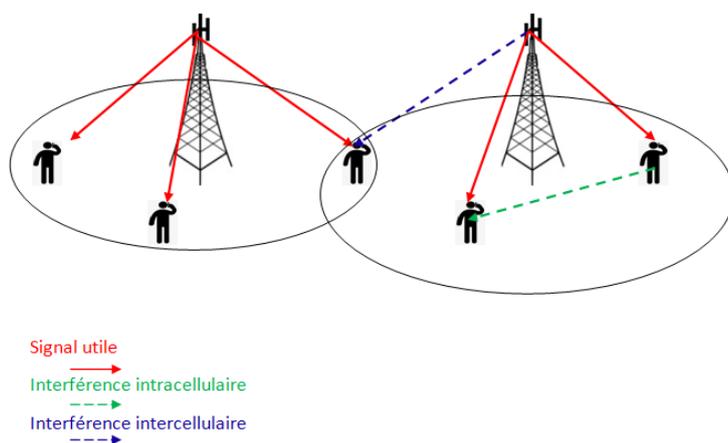


FIGURE 2.2 – interférences inter/intra cellulaires.

### 2.2.3 Interférence entre canaux (Inter-Channel Interference) :

Les interférences inter canaux dans les systèmes de communication résultent de nature non régulière de tout schéma de modulation physiquement réalisable pour la transmission de message numérique.

Dans un réseau hétérogène, si plusieurs appareils de communication non filaire et numérique

fonctionnent à proximité, les interférences inter canaux seront inévitables, l'émetteur d'un signal de forte puissance interfère avec un récepteur de signal faible ( figure 2.3)[21].

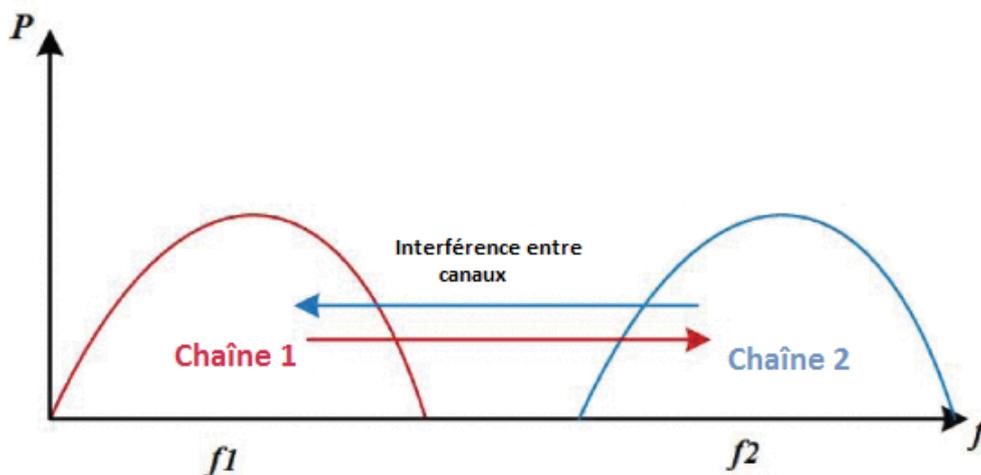


FIGURE 2.3 – Interférences entre canaux.

#### 2.2.4 Interférence entre les faisceaux (Inter Beam Interference)

Pour compenser l'atténuation élevée dans les bandes de fréquences à ondes millimétriques et pour étendre la portée de transmission dans les systèmes cellulaires à ondes millimétriques des antennes de formation de faisceaux sont nécessaires dans la station de base BS et à la station mobile MS. Etant donné qu'elles permettent à chaque BS de desservir simultanément un certain nombre de MS, ainsi offrant un gain substantiel de capacité du système[24].

Dans les systèmes à accès multiple par répartition dans l'espace SDMA l'interférence inter-faisceaux est causée par les faisceaux adjacents qui sont formés par la BS dans la même cellule et les BS dans les cellules voisines. Les faisceaux formés vers les MS dans chaque cellule peuvent générer des interférences importantes pour MS dans les cellules voisines, en particulier pour les MS à la limite de la cellule. (figure 2.4).

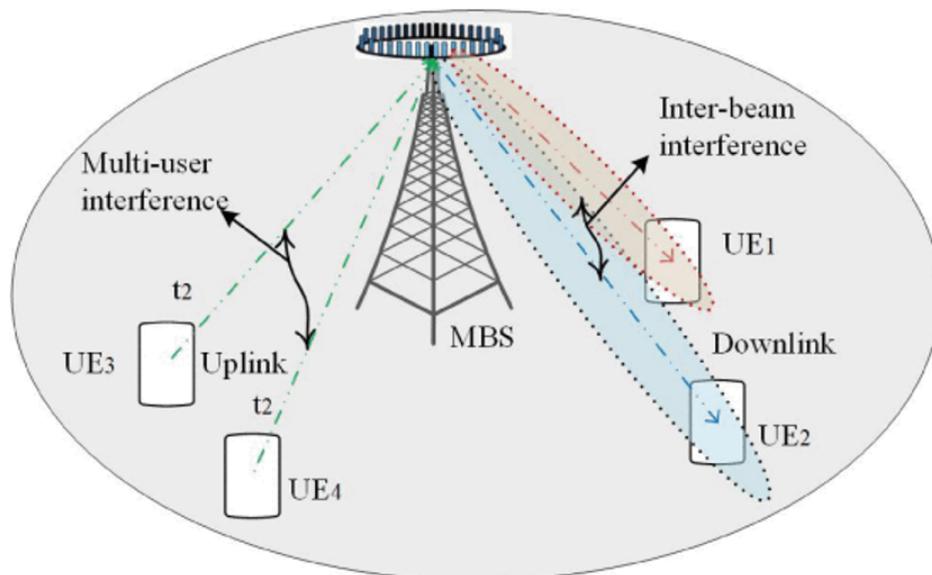


FIGURE 2.4 – Interférence entre faisceaux.[24]

### 2.3 Interférence inter-numérologies

La vision de la cinquième génération (5G) de la technologie sans fil est bien plus que la simple évolution des services à large bande. Un réseau plus diversifié est envisagé avec une couverture sans failles, des débits de données plus élevés, divers services, une connectivité massive et une fiabilité nettement supérieure à toute génération précédente de communication mobile. Par rapport à l'évolution à long terme (LTE), la 5G annonce une multiplication par mille du volume de données et du nombre d'appareils connectés par zone, une amélioration de 100 fois des débits de données des utilisateurs, une réduction de la consommation d'énergie par un facteur de 10 et une diminution de latence d'un facteur 5[25]. Ces exigences qui semblent improbables et impossibles à réaliser, nécessitent plusieurs améliorations de la technologie et de l'infrastructure actuelle.

Les organismes de normalisation, 3GPP et l'Union internationale des télécommunications et des radiocommunications (UIT-R), ont divisés les services de la 5G en trois ensembles différents pour répondre à toutes les exigences, eMBB le haut débit mobile amélioré qui donne la priorité à une large bande passante et à un débit de données élevé, uRLLC la communication ultra-fiable à faible latence comme son nom l'indique nécessite une fiabilité élevée et d'une

faible latence et enfin la communication massive de type machine (mMTC) qui requière une faible consommation d'énergie et de bande passante et une densité de couverture élevée[26]. Afin de mieux répondre et prendre en charge les diverses exigences des services 5G, le 3GPP a opté pour l'utilisation de différentes numéologies de la même forme d'onde mère, le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM), où le terme numéologie fait référence aux différentes configurations d'espacement des sous-porteuses  $\Delta f$  et la durée du préfixe cyclique (CP) d'un symbole OFDM[27].

TABLE 2.1 – Numerologies 5G en détail

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

Le tableau 2.1 donne un bref résumé des différentes numéologies présentes dans la norme. Un total de cinq options de numéologie évolutives sont fournies avec la numéologie LTE conventionnelle (avec  $\Delta f = 15$  kHz) choisie comme numéologie fondamentale. Par évolutif, nous entendons que tous les  $\Delta f$  standardisés sont  $2^\mu$  multiples de la numéologie LTE fondamentale (pour  $\mu = [0; 4]$ ). L'une des raisons fondamentales du choix de cet ensemble de numéologies avec un espacement évolutif des sous-porteuses est de faciliter l'alignement facile des symboles et la synchronisation d'horloge dans le domaine temporel, ce qui simplifie la mise en œuvre[28, 29].

On peut percevoir intuitivement comment différentes numéologies peuvent être utilisées pour répondre aux exigences de chaque classe de service de la 5G. Par exemple, les numéologies inférieures (en termes de  $\Delta f$ ) conviennent mieux au mMTC, car elles peuvent prendre en charge un plus grand nombre d'appareils connectés simultanément dans la même bande passante et nécessitent une puissance inférieure, les numéologies intermédiaires sont appro-

priées pour eMBB qui nécessite à la fois un débit de données élevé et une bande passante importante et des numérolgies plus élevées sont plus adaptées aux applications sensibles au délai relatives au service URLLC en raison de leur durée de symbole plus courte. Il est important de noter que la sélection des numérolgies 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, l'étalement du retard, la bande de fréquence de fonctionnement, etc., doivent également être pris en compte lors du choix d'une numérolgie[30].

Alors que l'utilisation de plusieurs numérolgies est essentielle pour fournir la flexibilité nécessaire requise pour les divers services, elle introduit une non-orthogonalité dans le système qui à son tour provoque des interférences entre les numérolgies multiplexées. Cette nouvelle forme d'interférence est appelée interférence inter-numérolgie (INI)[26, 27, 30, 31].

En plus de provoquer la perte d'orthogonalité entre les sous-porteuses de différentes numérolgies dans le domaine fréquentiel, les numérolgies mixtes rendent également difficile l'alignement des symboles dans le domaine temporel. Avec le même taux d'échantillonnage, un symbole OFDM d'une numérolgie ne s'aligne pas parfaitement avec le symbole d'une autre numérolgie, ce qui rend difficile la synchronisation dans la trame. Cependant, avec la conception de numérolgie évolutive de la 5G, la durée du symbole d'une numérolgie est toujours un multiple entier de la durée du symbole d'une autre numérolgie. Par conséquent, les symboles multi-numérolgiques peuvent être parfaitement alignés sur la durée dite du symbole multiplicateur le moins commun  $T_{LCM}$ [29, 32, 33, 34].

En outre, d'autres facteurs tels que le nombre de sous-porteuses dans chaque numérolgie, le décalage de puissance et la quantité de bande de garde (GB) entre les numérolgie, ainsi que les opérations de fenêtrage/filtrage, ont un impact significatif sur la quantité de INI subie par le système[27, 35, 36].

### 2.3.1 Préfixe cyclique (CP)

Le Préfixe Cyclique (CP) est une technique qui consiste à insérer une copie d'un bloc d'information à transmettre (un symbole OFDM) en amont de la trame. Plus clairement, il s'agit de récupérer une partie des informations à transmettre et d'insérer ces informations en début de trame. (figure 2.5)[31, 33] La conception de base du CP en NR est similaire à LTE.

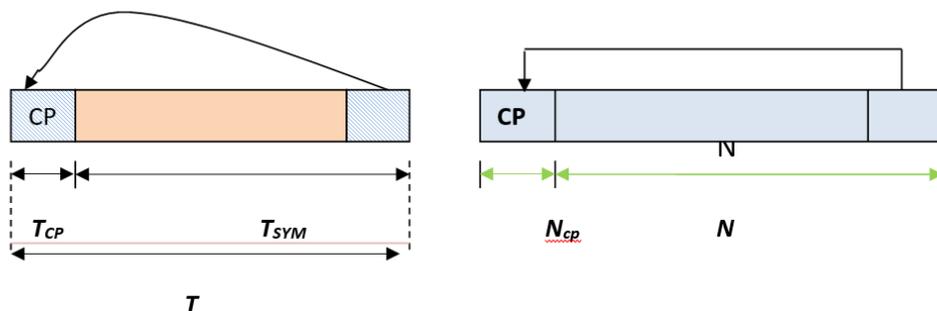


FIGURE 2.5 – Préfixe cyclique

La conception du CP garantit l'alignement des symboles entre les différentes valeurs SCS et la numérolgie de référence (15 kHz). Par exemple,  $\mu = 15$  khz un seul créneau a environ 7 symboles réside dans 0,5 milli de seconde, y compris les CP pour chaque symbole et  $\mu = 30$  Khz un seul créneau a environ 14 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 (fsc).

Il se réfère au préfixe d'un symbole, avec une répétition de la fin dans les systèmes sans fil OFDM. Le récepteur est généralement configuré pour rejeter les échantillons de préfixe cyclique. Un CP peut être utilisé pour contrer les effets de la propagation par trajets multiples. Le préfixe cyclique ajoute de la redondance à la transmission puisque le même contenu est transmis deux fois car le CP est une copie de la queue d'un symbole placé à son début.

Outre la perte d'orthogonalité entre les sous-porteuses de différentes numérolgies dans le domaine fréquentiel, le mélange de numérolgies entraîne des difficultés d'alignement des symboles dans le domaine temporel. Avec la même fréquence d'échantillonnage, un symbole OFDM d'une numérolgie ne s'aligne pas parfaitement avec le symbole d'une autre numérolgie, ce qui rend la synchronisation dans la trame difficile .

### 2.3.2 Le modèle de système MN-OFDM :

L'avènement des techniques multi-porteuses à numéologie mixte (MN-MC) ajoute des flexibilités dans la prise en charge de services hétérogènes dans les systèmes de communication de cinquième génération (5G) et au-delà. Cependant, la coexistence de numéologies mixtes détruit le principe d'orthogonalité défini pour les systèmes de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence à numéologie unique (SN-OFDM) avec des sous-porteuses se chevauchant d'un espacement uniforme des sous-porteuses.

Par conséquent, la perte d'orthogonalité conduit à des interférences inter-numéologiques (INI), ce qui complique la génération du signal et empêche l'isolation du signal. L'INI dans les systèmes MN-OFDM est caractérisé par une modélisation mathématique et repose principalement sur les paramètres du système en ce qui concerne la forme de l'impulsion, la distance relative entre les sous-porteuses et le facteur d'échelle de la numéologie.

Pour la clarté et la simplicité des dérivations, sans perte de généralité, nous considérons un modèle de signal avec deux numéologies, à savoir la numéologie 1 et la numéologie 2<sup>(i)</sup> [38].

L'espacement des sous-porteuses  $\Delta f^{(i)}$  et la durée des symboles  $\Delta T^{(i)}$  associés à la numéologie  $i$ ,  $i = \{1, 2\}$ , sont liés l'un à l'autre via un facteur d'échelle  $V$ , comme selon 3GPP, c'est-à-dire [39] :

$$\frac{\Delta f^{(1)}}{\Delta f^{(2)}} = \frac{\Delta T^{(2)}}{\Delta T^{(1)}} = V \quad (2.1)$$

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  $v = 2\mu$ ,  $\mu \in \{1, 2, \dots\}$ .

La figure 2.6 illustre la relation temps fréquence avec deux numéologies pour le cas  $v = 2$  où  $\Delta f^{(1)} = 2\Delta f^{(2)}$  et  $\Delta T^{(2)} = 2\Delta T^{(1)}$ , et le symbole  $k$  associé avec la numéologie 2 chevauche deux symboles indexés à  $2k$  et  $2k + 1$  associés à la numéologie.

La figure 2.7 illustre un schéma de principe du modulateur/démodulateur MN-OFDM composé de deux modulateurs/démodulateurs SN-OFDM associés aux deux numéologies,

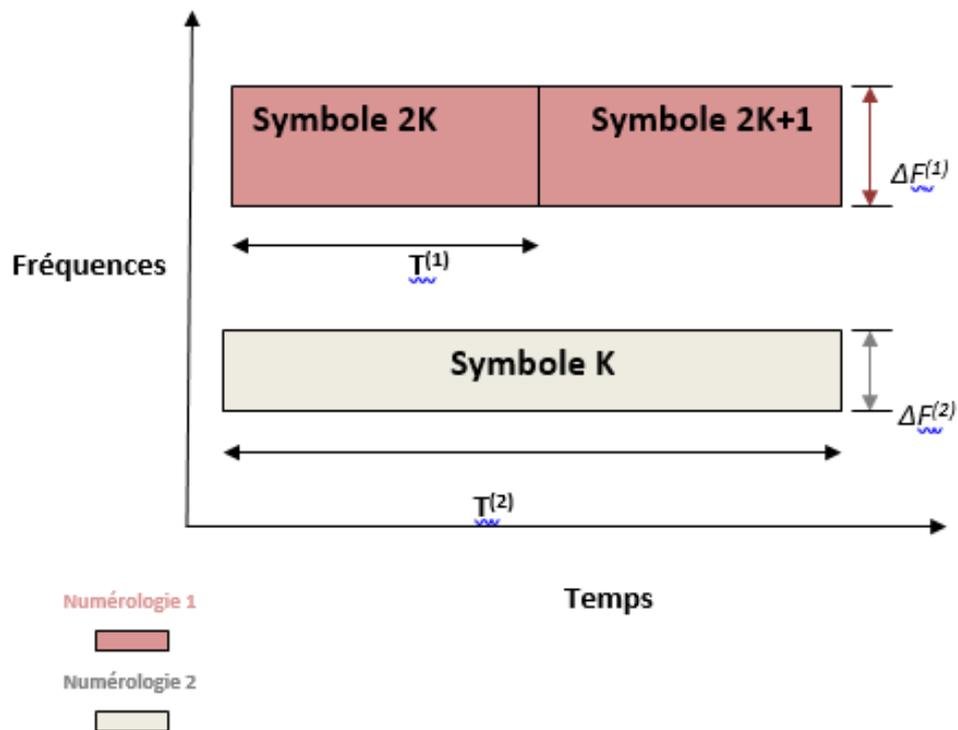


FIGURE 2.6 – Illustration de la relation de fréquence et de temps avec deux numérolgies pour le cas  $\mu = 2$

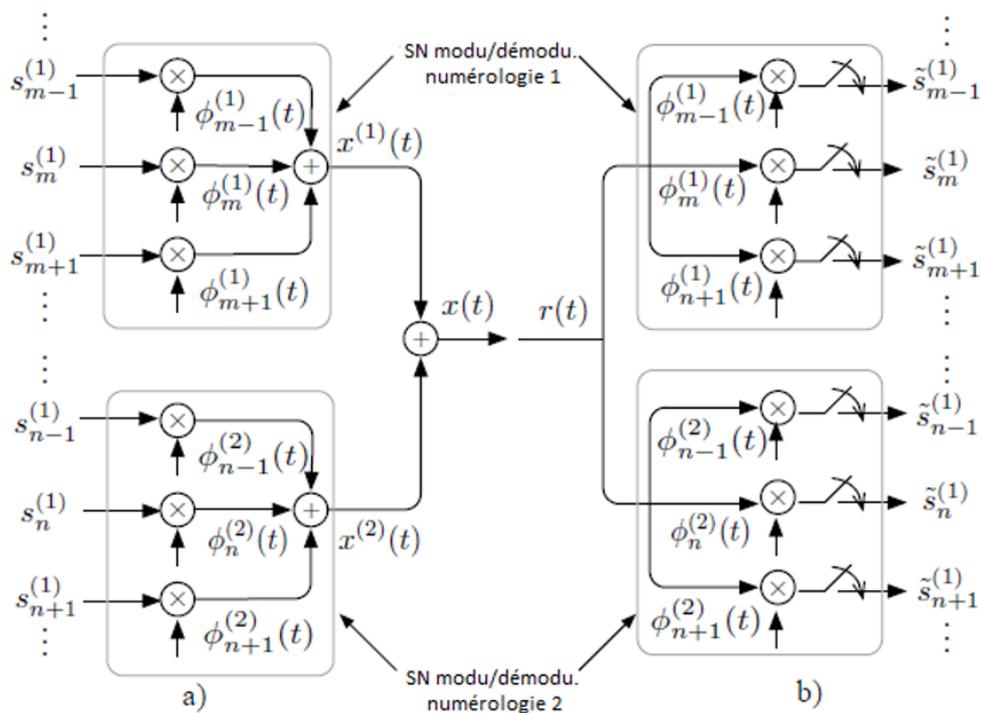


FIGURE 2.7 – modulateur OFDM à numérolgies multiples

respectivement.

Un groupe de symboles complexes  $s^{(i)}$  est modulé via un modulateur SN-OFDM pour la numérogie  $i$ . Soit le symbole de transmission complexe à l'instant  $k$  sur la sous-porteuse  $m$  associée à la numérogie  $i$  soit  $S_{k,m}^{(i)}$ . Le signal transmis pour la numérogie  $i$  peut alors être exprimé comme :

$$x^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k^{(i)}(t) \quad (2.2)$$

où

$$x_k^{(i)}(t) = \sum_{m=0}^{N^{(i)}-1} s_{k,m}^{(i)} \phi_m^{(i)}(t - kT^{(i)}) \quad (2.3)$$

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

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

L'impulsion de base  $\Phi_m^{(i)}(t)$  est une impulsion rectangulaire normalisée et décalée en fréquence définie comme :

$$\phi_m^{(i)}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T}} \exp j2\pi \frac{m}{T^{(i)}} t & 0 \leq t \leq T^{(i)} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.4)$$

Le signal transmis  $x(t)$  est alors obtenu en multiplexant les signaux de numérogie unique tronqués/concaténés associés aux deux numérogies. Le signal mixte prend des formes différentes pour la numérogie 1 et 2 en ce qui concerne leur propre durée de symbole. Plus précisément, le signal  $x(t)$  sur la durée  $[kT^{(1)}, (k+1)T^{(1)}]$  peut être exprimé comme :

$$x_k^{(t)} = x_k^{(1)} + x_{\lfloor \frac{k}{v} \rfloor}^{(2)}(t) \quad (2.5)$$

Où « $\lfloor \cdot \rfloor$ » est la fonction plancher (floor function). Le signal  $x(t)$  sur  $[kT^{(2)}, (k+1)T^{(2)}]$  peut s'écrire :

$$x_k^{(t)} = \sum_{q=0}^{v-1} x_{v(k+q)}^1(t) + x_k^{(2)}(t) \quad (2.6)$$

2.5 et 2.6. décrivent mathématiquement ce qu'illustre la figure 2.6, 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 numérologie 1 chevauche une partie tronquée du  $\lfloor k/v \rfloor$ -ième symbole associé à la numérologie 2, et le  $k$ -ième symbole associé à la numérologie 2 coïncide avec un bloc de symboles consécutifs à partir de le  $(k)$ -ème symbole associé à la numérologie 1.

Le signal reçu passe par des démodulateurs SN-OFDM afin de séparer les signaux sur différentes sous-porteuses dans la numérologie et de rejeter les signaux de l'autre numérologie.

## 2.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons abordé plusieurs types d'interférences classées en fonction de leurs caractéristiques de déploiement, puis nous avons présenté ce qu'était la multi-numérologie, concept que la 5G utilise afin de répondre aux exigences des services mMTC, uRLLC et eMBB. Par la suite, nous avons fait l'étude de l'interférence provoquée par ce concept, nous avons cité les modèles des système multi-numérologiques à savoir MN-OFDM, qui est un système à numérologies multiples, les sous-porteuses étant orthogonales au sein d'une même numérologies. Nous allons présenter la méthode que nous proposons pour réduire l'effet des intèreférences entre différentes numérologies dans le chapitre suivant.

---

---

## CHAPITRE 3

---

# SCMA POUR LES INTERFÉRENCES INTER NUMÉROLOGIES

### 3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre comporte une présentation du schéma que nous appliquerons lors de la réalisation de notre algorithme. le rôle de chaque bloc sera expliqué en détail. La thématique des interférences inter numerologies est un axe de recherche très exploité et très récent, la plupart de la littérature proposant différentes techniques pour les atténuer. Pour notre part, nous avons décidé d'affronter le problème sous un autre angle. En effet, nous avons décidé de renforcer les données des utilisateurs par une FEC(Forwrd Error Encoding) suivi d'un encodage SCMA(Sparse Code Multiple Access). Tout cela dans le but, non pas de réduire les interférences, mais de réduire leur impact sur les données transmises. Nous finirons ce chapitre par une comparaison avec quelques techniques appliquées récemment.

### 3.2 schéma bloc

La figure 3.1 représente le schéma bloc de la chaîne de transmission que nous avons étudiée.

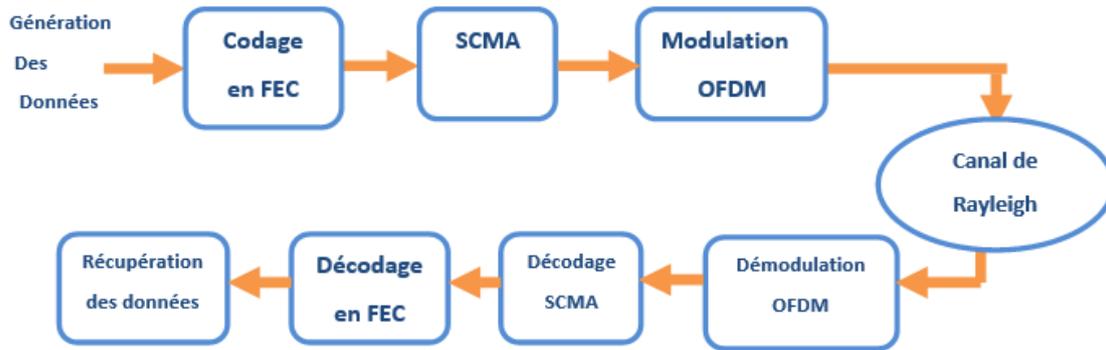


FIGURE 3.1 – schéma à suivre.

Nous commencerons par générer des données à transmettre pour différents utilisateurs, celles-ci traverseront le premier bloc représentant un codage de canal basée sur le renforcement de la résistance des données au bruit par la redondance, c'est à dire que les données seront répétées suivant un certain schéma de façon à être moins affectées par le bruits. L'encodeur SCMA entrera ensuite en jeu, il consiste à renforcer les données par des livres de codes, qui permettront de mieux les récupérer à la réception, les données seront ensuite modulées par la techniques OFDM avant d'être transmises, les opérations inverses seront effectuées à la réception.

### 3.3 Codage en FEC :

Les systèmes de transmission dans le monde cellulaire sont des environnements très hostiles caractérisés par la présence de plusieurs sources d'interférences. L'inclusion de certaines techniques de correction d'erreurs dans les systèmes, permet de faire face aux interférences et ainsi rendre la transmission des données robuste. Dans notre travail nous avons opté pour l'implémentation du codeur de correction d'erreur directe FEC pour optimiser et résoudre les quelques problèmes que l'on a l'habitude de rencontrer lors des transmissions de données.

#### 3.3.1 FEC forward error correction :

C'est une méthode de contrôle d'erreurs pour la transmission des données, qui consiste à générer et ajouter au niveau de l'émetteur une information redondante à un flux de données.

La redondance permet au récepteur de détecter et de corriger les éventuelles erreurs au niveau du flux reçu sans avoir besoin de demander une retransmission au récepteur.

Les codes de correction d'erreur directe (FEC) fournissent une méthode de meilleure fiabilité, ils sont utilisés pour améliorer ou remplacer d'autres méthodes, FEC fait référence à la capacité de surmonter à la fois les pertes et les erreurs au niveau des bits.

Le principe de base de la technique FEC (Forward Error Correction) est l'ajout d'un certain nombre de bits de code à un signal utilisateur pour réduire la probabilité qu'un bit erroné se produise pendant la transmission de ce signal utilisateur. Afin de coder une chaîne de signaux d'utilisateur de longueur  $k$  bits, il faut trouver au moins  $2k$  codes distincts et orthogonaux, un mot de code distinct pour chaque combinaison de bits possible dans le signal d'origine[42].

### 3.3.2 L'encodeur FEC :

L'encodeur FEC génère un certain nombre de symboles d'encodage qui ont la même longueur que les symboles source. La longueur choisie des symboles peut varier selon chaque application du codeur FEC. Ces symboles de codage sont placés dans des paquets pour transmission, le nombre de symboles de codage placés dans chaque paquet peut varier sur une base par paquet, ou un nombre fixe de symboles (généralement 1) peut être placé dans chaque paquet ou sont placées suffisamment d'informations pour identifier les symboles de codage particuliers transportés dans ce paquet[42].

A la réception des paquets contenant l'encodage symboles, le récepteur alimente ces symboles de codage dans le décodeur FEC correspondant pour recréer une copie exacte de la source  $k$  symboles. Idéalement, le décodeur FEC peut recréer une copie exacte de n'importe quel  $k$  des symboles de codage.

La distance de Hamming ( $d$ ) définit la différence de valeur des mots de code individuels. Plus précisément, la distance de Hamming est le nombre minimum de positions binaires par lesquelles les mots de code individuels diffèrent les uns des autres. Plus la distance de Hamming est grande, plus la capacité du code à détecter et à corriger les erreurs en présence de bruit ou d'erreurs introduites pendant la transmission est importante. Le nombre d'erreurs qui peuvent être corrigées est inférieur ou égal à  $(d - 1) / 2$ . Le nombre d'erreurs pouvant être détectées est inférieur ou égal à  $d$ . Il existe cinq grands types de codes de correction d'erreur

directe[43] :

- Les codes en bloc (y compris les codes de Hamming).
- Les codes cycliques.
- Les codes BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem).
- Les codes Reed-Solomon.
- Les codes convolutifs (y compris les codes Viterbi).

Mais, les deux grandes catégories de codes FEC, selon la façon dont la redondance est ajoutée, sont les codes en bloc et les codes convolutionnels. Nous abordons brièvement les principes et le mécanisme de chacun de ces types de codes.

### 3.3.3 Les codes en bloc

Les codes en bloc décomposent le flux de données utilisateur en une série de blocs de  $k$  bits en longueur. À chaque bloc, un bloc de code de  $(n-k)$  bits est ajouté pour former  $n$ -bits mots de code. Le code est décrit par la notation  $(n, k)$  code de bloc. Ainsi, par exemple, un code  $(15, 4)$  comporte des mots de code de 15 bits, dont 11 bits sont des données utilisateur codées réelles et quatre bits sont des bits de parité. En notation mathématique, le codage s'effectue comme suit :

$$c = d[G]$$

Où  $c$ , est un vecteur représentant le mot de code,  $d$  est le vecteur des données de l'utilisateur, et  $[G]$  est la matrice de générateur. La matrice du générateur est une matrice de dimensions  $k$  par  $n$ , composée de la matrice d'identité  $[I]$  et de la matrice de parité  $[P]$ , la matrice  $[P]$  identifie pour chacun des bits de parité, les positions des bits dans le signal des données d'utilisateur qui sont utilisées pour calculer la parité :

$$[G] = [IP]$$

### 3.3.4 Codes convolutionnels :

Contrairement au code par blocs, le code convolutif (CC) contient de la mémoire, c'est-à-dire que la sortie du codeur dépend des bits d'entrée actuels et précédents. Par conséquent,

un code convolutif peut être facilement implémenté à l'aide d'un registre à décalage à états finis linéaire, et il peut être caractérisé par trois paramètres  $(\eta, k, V)$ , où

- $\eta$  : représente la longueur du mot de code.
- $k$  : la longueur d'entrée et la longueur de contrainte.
- $V$  : est donné par le nombre de bits stockés dans chaque registre à décalage, plus les bits d'entrée actuels.

Ainsi, comme pour les codes de blocs linéaires, le taux de code est donné par  $k / \eta$ [44].

Une chaîne de bits consécutifs du flux de données utilisateur d'entrée (d'une longueur de  $K$  bits, où  $K$  est la longueur constante du code), est soumise à une série d'actions de sommation modulo 2 (contrôles de parité). Le nombre de codes de sommation auxquels la séquence de  $K$  bits est soumise est noté  $v$ . Le codage qui résulte d'un codeur  $1/v$  utilisant  $v$  sommations de code différentes est appelé un code convolutif  $1/v$ .

La figure 3.2 illustre un code convolutif dont la longueur constante est de  $K = 3$ [42].

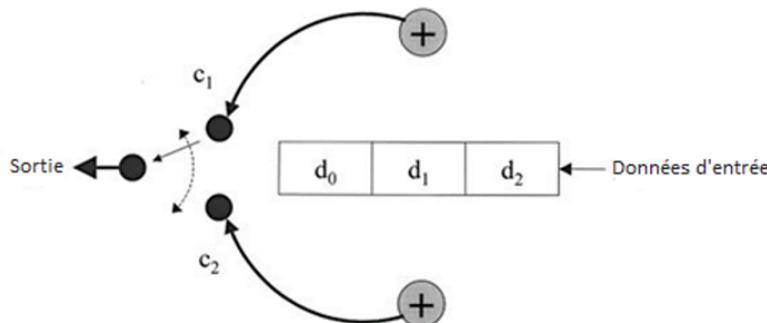


FIGURE 3.2 – Code convolutif de longueur constante[42]

Les deux codes utilisés en alternance pour produire le flux binaire de sortie sont les suivants :

$$c_1 = d_0 + d_1 + d_2$$

$$c_2 = d_0 + d_2$$

## 3.4 SCMA

### 3.4.1 Présentation de l'Accès multiple à code clairsemés SCMA

L'accès multiple à code clairsemé (SCMA) est un nouveau type de technologie d'accès multiple (MA) qui se classe parmi les candidats les plus prometteurs pour la 5G sans fil en raison de ses performances exceptionnelles. Le SCMA bénéficie d'une plus grande tolérance aux surcharges par rapport aux technologies MA traditionnelles[45].

Le SCMA Accès multiple à code clairsemés peut être considéré comme un système d'accès multiple par répartition en code, qui se caractérise par des livres de codes clairsemés, ces livres de codes sont construits sur la base de constellations multidimensionnelles[46]. Dans le système SCMA, plusieurs utilisateurs transmettent sur les mêmes blocs de ressources avec des livres de codes différents. Avec des livres de codes clairsemés, la collision entre les utilisateurs est réduite, ce qui rend le SCMA résistant aux interférences entre utilisateurs. L'éparpillement est également avantageux pour la complexité du récepteur, et l'algorithme de passage de message peut être appliqué pour atteindre une performance presque optimale[47].

### 3.4.2 Concept de base

Le système SCMA permet d'obtenir de meilleures performances au niveau de la liaison : une connectivité massive, une meilleure qualité de service, un débit plus élevé et une faible latence, de ce fait il est considéré comme le meilleur des technologies non orthogonales existantes(figure 3.3).

Les bits codés d'un flux de données sont directement mis en correspondance avec un mot de code provenant d'un livre de codes construit sur la base d'une constellation multidimensionnelle. Comme la figure 3.3 le montre, la structure de base de la mise en œuvre de l'SCMA serait similaire au modèle de transmission LTE, à la différence près de la conception conjointe de la modulation et de l'étalement.

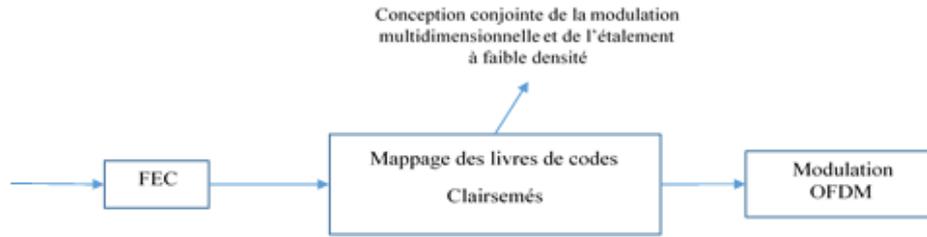


FIGURE 3.3 – un modèle de système de base de SCMA

### 3.4.3 Mappage du livre de codes

Le SCMA aurait un mappage de couches similaire au LTE; une ou plusieurs couches SCMA peuvent être attribuées à un utilisateur/flux de données. La différence réside dans le fait qu'à chaque couche SCMA, le SCMA effectue également le mappage des bits d'information en mots de code, c'est-à-dire que le modulateur SCMA mappe les bits d'entrée en un mot de code multidimensionnel complexe sélectionné dans un livre de codes SCMA spécifique à la couche. Les mots de code SCMA sont clairsemés, c'est-à-dire que seules quelques-unes de leurs entrées sont différentes de zéro et les autres sont nulles.

Tous les mots de code SCMA correspondant à une couche SCMA ont un emplacement unique d'entrées non nulles, appelé motif de rareté pour simplifier[48].

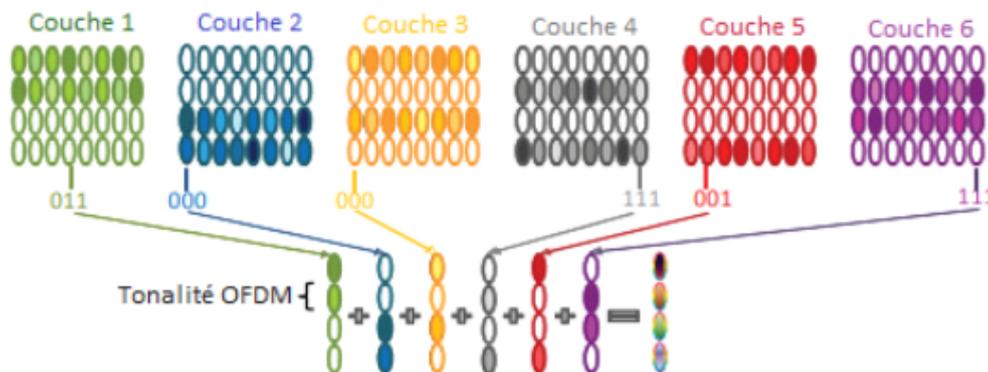


FIGURE 3.4 – mappage bit mot de code SCMA.

La figure 3.4 montre un exemple d'un ensemble de Livre de codes (code books) contenant 6 Livre de codes pour la transmission de 6 couches de données. Chacun des livres de codes comporte 8 mots de codes complexes multidimensionnels qui correspondent respectivement à 8 points de constellation. La longueur de chaque mot de code est de 4, ce qui est la même que la longueur d'étalement. Lors de la transmission, le mot de code de chaque couche est sélectionné en fonction de la séquence de bits d'entrée. Dans la liaison descendante, comme le montre la figure 3.4, les mots de code de différentes couches sont combinés avant le modulateur OFDM. Sur la liaison montante, pour une transmission d'UE à couche unique, chaque mot de code SCMA est d'abord introduit dans le modulateur OFDM, ce qui donne lieu à des transmissions par voie hertzienne de couches SCMA multiples et indépendantes provenant de différents utilisateurs[48].

La conception du livre de codes SCMA est basée sur l'optimisation conjointe de la conception du motif d'étalement clairsemé et de la conception de la modulation multidimensionnelle[49]. Le livre de code a été conçu afin de fournir de bonnes propriétés de distance (euclidienne et/ou de produit) entre les points de la constellation multidimensionnelle globale pour maximiser le gain de codage/mise en forme. Ceci permet d'avoir un nombre inférieur de points de projection sur chaque élément de ressource grâce à la nature multidimensionnelle des livres de codes qui permet à deux points de constellation d'entrer en collision sur certaines des composantes non nulles, puisqu'ils peuvent toujours être séparés sur les autres composantes non nulles.

La figure 3.5 ci-dessous en donne un exemple : les points de constellation correspondant à 100 et 000 entrent en collision sur la première tonalité, mais sont séparés sur le second ton, ce qui fait que le nombre de points de projection est égal à 4 au lieu de 8[48].

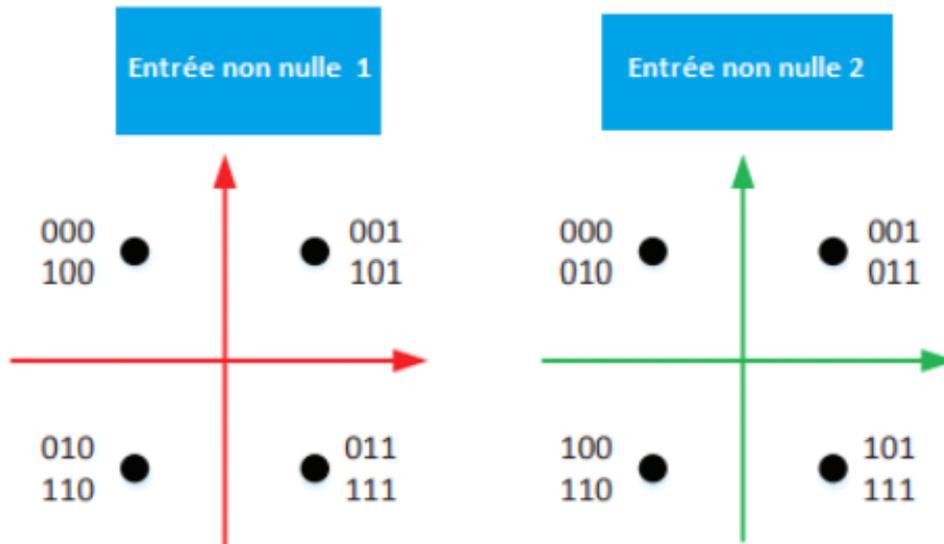


FIGURE 3.5 – exemple de livre de code SCMA à 8 points.

### 3.4.4 Procédure d'accès multiple

La figure 3.6 montre un exemple d'accès multiple de 6 utilisateurs avec les livres de codes spécifiques à la couche SCMA.

L'accès multiple avec SCMA se fait comme suit[49] :

- Attribution d'un livre de code SCMA à chaque utilisateur.
- Mise en correspondance du codeur FEC (forward error correction) et des bits codés de chaque utilisateur avec le mot de code SCMA (selon le livre de code qui lui a été attribué).
- Combinaison des mots de code SCMA sur les tonalités et les symboles OFDM transmis en blocs SCMA.

### 3.4.5 Les principales caractéristiques de l'accès multiple avec SCMA

#### 1. La superposition de signaux non orthogonaux dans le domaine du code :

Elle permet la superposition de plusieurs symboles provenant de différents utilisateurs

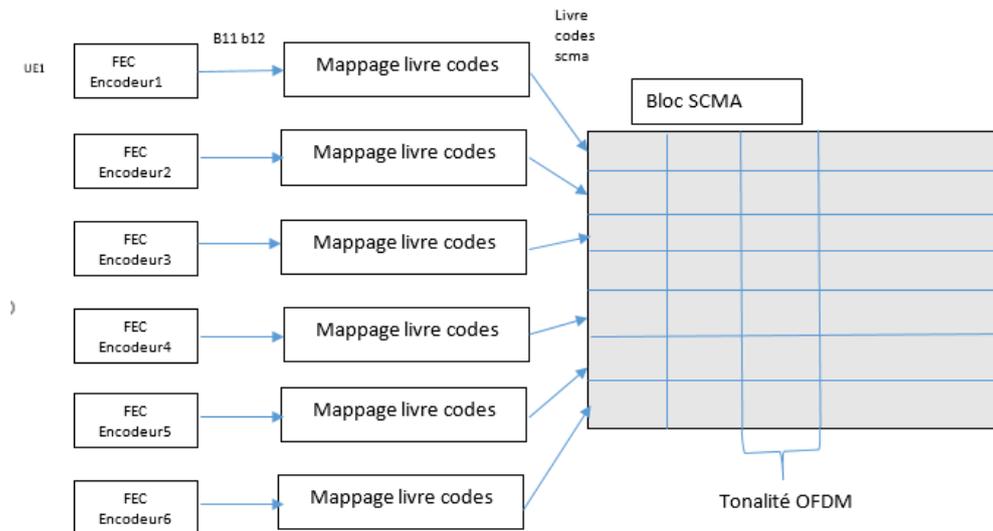


FIGURE 3.6 – Accès multiple avec SCMA

sur chaque élément de ressource (RE), ce qui favorise la surcharge. Le modèle de superposition sur chaque ressource est défini dans des livres de codes.

## 2. L'étalement clairsemé

SCMA utilise un étalement clairsemé pour réduire le nombre de collisions de symboles, de sorte que davantage de collisions de mots de code peuvent être tolérées avec une faible complexité du récepteur.

## 3. La modulation multidimensionnelle :

SCMA utilise une modulation multidimensionnelle au lieu d'un étalement linéaire[50].

### 3.4.6 Encodage et décodage SCMA

Les opérations de codage, à la fois pour la liaison montante et la liaison descendante, impliquent le remplacement du modulateur QAM (Quadrature Amplitude Modulation) par un modulateur SCMA qui mappe les bits codés directement sur le mot de code multidimensionnel à partir des livres de codes normalisés.

Les opérations de décodage remplacent l'égalisation du canal d'un utilisateur unique et le démappeur QAM du récepteur LTE existant par un démodulateur SCMA qui détecte conjointement les couches de données superposées et fournit des résultats LLR (Log-Likelihood Ratio) séparés aux turbo-décodeurs de chaque couche. En raison de la nature clairsemée des

livres de codes SCMA, un algorithme de passage de message de faible complexité MPA (Message Passing Algorithm)[51] pourrait être utilisé pour obtenir des performances de détection à probabilité maximale proches avec une complexité raisonnable

### 3.4.6.1 Encodage SCMA

La procédure de codage SCMA est définie comme un mappage de  $m$  bits à un livre de codes complexe  $K$  dimensionnel de taille  $M(M= 2m)$ . Les mots de code complexes à  $K$  dimensions sont constitués de  $N < K$  éléments non nuls. Chaque utilisateur  $j$  a un livre de codes unique parmi l'ensemble des livres de codes  $J$ [52].

### 3.4.6.2 Décodage SCMA :

#### 1. Schéma de détection :

Les mots de code des codebooks sont rares, de sorte que la technique de détection MPA (Message Passing Algorithm) multi utilisateurs a été utilisée pour détecter les mots de code multiplexés[53].

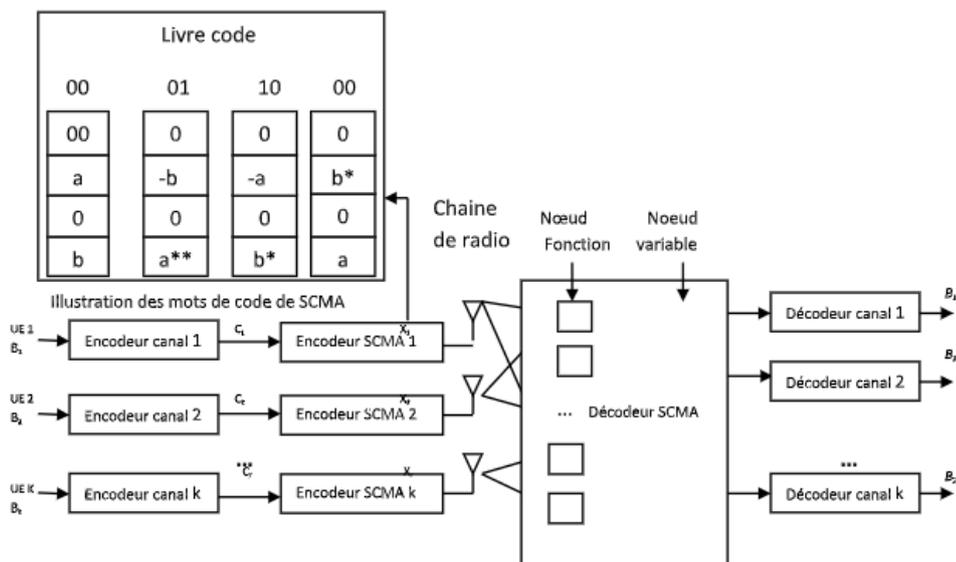


FIGURE 3.7 – Schéma pour système SCMA

La figure 3.7 illustre le schéma fonctionnel d'un système de détection SCMA. En tant que technologie clé des communications sans fil de cinquième génération (5G), le système d'accès multiple à code clairsemé (SCMA) a une utilisation de fréquence assez élevée, mais son décodeur d'algorithme de transmission de messages (MPA) a toujours une complexité temporelle élevée. A l'aide du seuil dynamique à plusieurs niveaux proposés, la complexité du décodage MPA peut être considérablement réduite avec peu de perte de performance d'erreur.

## 2. MPA message passing algorithm

MPA est un graphe factoriel basé sur un algorithme de détection quasi optimal et itératif. Le graphe contient deux types différents de nœuds : les nœuds de fonction (FN) représentant les  $K$  sous-porteuses, et les nœuds variables (VN) représentant les  $J$  utilisateurs actifs. Le  $VN_j$  connecté au  $FN_k$  lorsque l'utilisateur  $j$  utilise la sous-porteuses  $k$ , c'est à dire  $X_k \neq 0$ [54]

## 3. Représentation graphique des facteurs

Le graphe de facteurs sert à caractériser de manière efficace la structure de faible

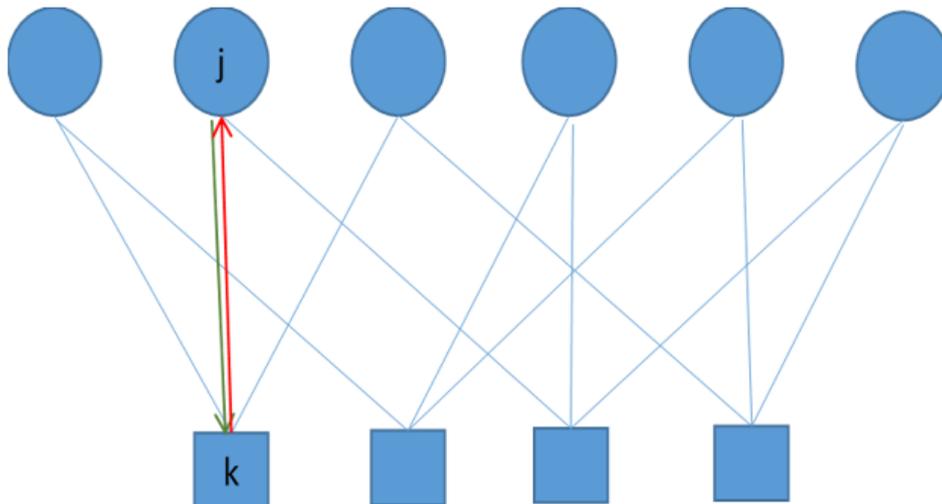


FIGURE 3.8 – Représentation de graphe de facteurs dans SCMA

densité des mots de code SCMA.

Un vecteur colonne binaire  $j$  de longueur  $K$  est utilisé pour indiquer les positions des

entrées nulles (avec le chiffre 0) et non nulles (avec le chiffre 1) du  $j$ -ème livre de codes. Ensuite, une matrice clairsemée  $F$  de taille  $K \times J$ , appelée matrice de graphe de facteurs, peut être utilisée pour indiquer les relations entre les couches et les ressources. Les lignes de  $F$  indiquent les ressources et les colonnes indiquent les couches. Les  $J$  nœuds de variables (VN) et les  $K$  nœuds de fonctions (FN) du graphe factoriel représentent respectivement les couches et les ressources.

Le graphe factoriel représente les couches et les ressources, respectivement, et le  $j$ -ème VN est connecté au  $k$ -ème FN si et seulement si  $f_{k,j} = 1$ . Dans ce qui suit, nous désignons par :

$$\phi k = j : 1 \leq j \leq J, f_{k,j} = 1.$$

$$\phi j = k : 1 \leq k \leq K, f_{k,j} = 1.$$

Exemple : Considérons un système de transmission SCMA à 6 utilisateurs avec  $J = 6$ ,  $K = 4$ .

Un tel système permet une surcharge de transmission de 150 % , et le modèle du système est représenté à la figure 3.5 . Si l'on conçoit soigneusement la matrice  $F$  du graphe de facteurs pour permettre aux utilisateurs d'entrer en collision sur un seul élément non nul, alors le choix de  $F$  est donné par :

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Dans les paramètres de matrice éparses, la matrice (1.1) a  $d_f = 3$  et  $d_v = 2$ , ce qui signifie que chaque FN est connecté à trois VNs et que chaque VN est connecté à deux FNs, comme illustré dans le graphe factoriel dans la figure 3.8[50].

### 3.4.7 Avantages du SCMA :

SCMA peut bénéficier de la nouvelle transmission radio 5G en offrant une capacité élevée, une connectivité massive, une faible surcharge...etc.

- Les couches de données peuvent être prises en charge par la longueur d'étalement 4, ce qui donne un facteur de surcharge de 150 %
- La faible densité de l'étalement dans le domaine du code réduit encore plus les interférences entre les couches, de sorte qu'un plus grand nombre de collisions de symboles peut être toléré avec une complexité raisonnable du récepteur.
- La modulation multidimensionnelle permet une transmission plus efficace sur le plan énergétique et une réduction supplémentaire de la complexité, grâce à l'utilisation de livres de codes SCMA avec un faible nombre de points de projection.

SCMA est un composant important pour supporter les transmissions sans subvention à faible latence et à faible coût pour les paquets d'arrivée petits et sporadiques[48].

Le SCMA est proposé pour la 5G pour obtenir les avantages suivants :

#### 1. Pour l'eMBB :

- Région de plus grande capacité grâce au multiplexage non orthogonal.
- robustesse à l'évanouissement et aux interférences avec le code-domaine.
- Adaptation robuste des liaisons avec une précision de CSI relaxée.

#### 2. Pour l'URLLC :

- Fiabilité accrue grâce au gain de diversité obtenu par les constellations multidimensionnelles.
- Robustesse aux collisions grâce à une conception soignée des livres de codes.

- Réduction de la latence et davantage de possibilités de transmission en permettant un accès sans concession.
- Accès libre, le multiplexage non orthogonal de types de trafic mixtes.

### 3. Pour mMTC :

- Densité de connexion plus élevée avec une forte surcharge.
- Réduction de la surcharge de signalisation et de la consommation d'énergie en permettant l'accès libre[55].

#### 3.4.8 Inconvénients du SCMA :

- La capacité du SCMA pour prendre en charge la connectivité massive est limitée. - La détection multi utilisateurs itérative entraîne un délai de traitement important. - La complexité rend difficile l'utilisation de constellations de grande taille par SCMA, ce qui limite le débit de transmission.

## 3.5 Modulation OFDM :

### 3.5.1 Principe de l'ofdm

Le principe de l'OFDM est de transmettre les informations sur plusieurs porteuses orthogonales entre elles, ainsi le spectre du signal présente une occupation optimale de la bande allouée[56]. Comme le montre la figure 3.9, l'OFDM découpe le canal en cellule selon les axes du temps et des fréquences. A chaque cellule fréquence/temps est attribuée une porteuse dédiée. L'information à transmettre est répartie sur l'ensemble de ces porteuses, modulée chacune à faible débit par une modulation du type QAM. Un symbole OFDM comprend l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant  $t$ .

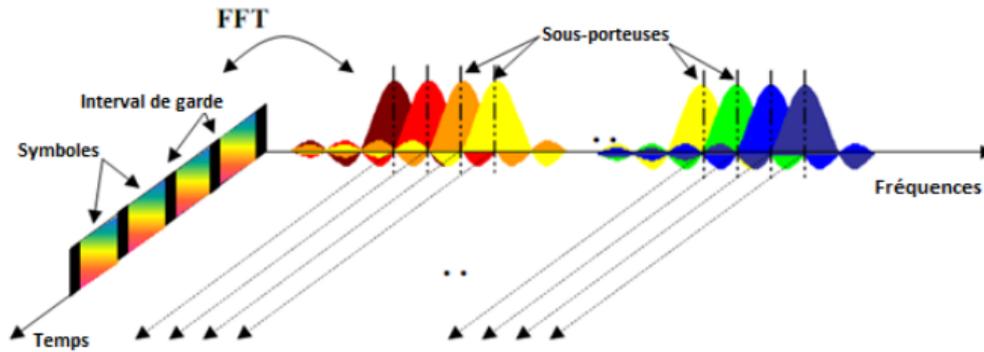


FIGURE 3.9 – OFDM en temps/fréquence.

La technique de transmission OFDM est basée sur l'émission simultanée sur  $n$  bandes de fréquence de  $N$  porteuses sur chaque bande. Pour le cas de l'UMTS la bande allouée est de 5 MHz . Le signal est réparti sur les porteuses. Les fréquences de travail sont choisies en fonction des réglementations, les autres sont « éteintes » de manière logicielle. Le signal est émis à un niveau assez élevé pour pouvoir monter en débit, et injecté sur plusieurs fréquences à la fois. Si l'une d'elles est atténuée le signal passera quand même grâce à l'émission simultanée.

### 3.5.2 Modulateur OFDM :

Si on pose que le signal modulé en bande de base  $s(t)$  est échantillonné par une période  $T_s$  / $N$ . Appelons  $T_s$  la durée symbole c'est-à-dire le temps qui sépare 2 séquences de  $N$  données. Les échantillons  $S_n$  s'écrivent [57] :

$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (3.1)$$

L'équation 3.1 représente la Transformé de Fourier Inverse des symboles  $c_k$  déduis de la constellation du QAM, donc il suffit d'appliqué l'algorithme de la FFT (Fast Fourier Transform) sur ces symboles  $c_k$  pour réaliser la modulation OFDM. Le schéma de principe du modulateur OFDM en utilisant l'algorithme de la transformée de Fourier rapide inverse est présenté dans la figure 3.10[57].

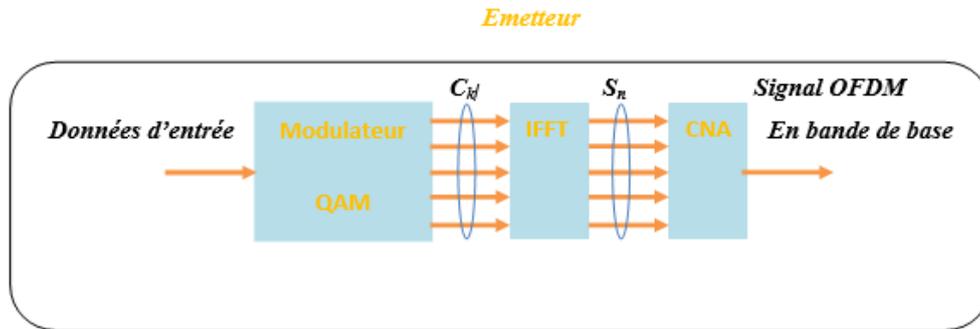


FIGURE 3.10 – Modulateur OFDM

### 3.5.3 Démodulateur OFDM

Le signal OFDM occupe la bande passante  $B$  à partir de la fréquence porteuse  $f_0$  comme le montre le schéma de la figure 3.11.

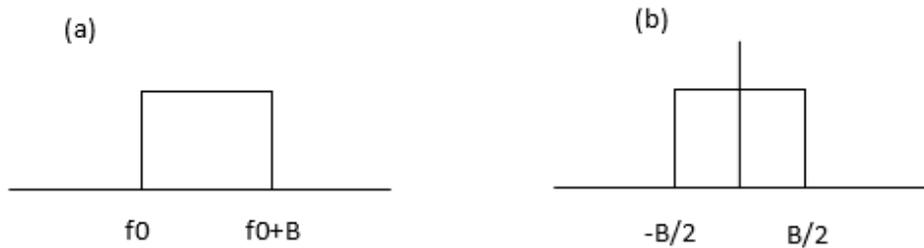


FIGURE 3.11 – Occupation de la bande passante

Pour démoduler, on va d'abord transposer le signal en bande de base, donc effectuer une translation de  $f_0+B/2$ , fréquence médiane de la bande passante. Le spectre occupera la bande  $[-B/2, B/2]$ , comme on le voit sur le schéma de la Figure 3.10 (b). La bande passante du signal étant  $\frac{B}{2} = \frac{N}{2T_s}$ . La fréquence d'échantillonnage doit être supérieure ou égale à  $\frac{2B}{2}$  soit  $\frac{N}{T_s}$ . L'échantillonnage se fera aux temps  $t_n = nT_s/N$  Où le signal émis est :

$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kt}{T_s}} \quad (3.2)$$

Le signal reçu est donné par :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})t} = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi \frac{k}{T_s} t} \quad (3.3)$$

Le signal reçu en bande de base après le décalage en fréquence de  $f_0 + B/2$  est donné par :

$$z(t) = y(t) e^{-2j\pi(f_0 + \frac{N}{2T_s})t} = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi(\frac{k-n}{T_s})t} \quad (3.4)$$

L'échantillonnage se fait à une période  $T_s/N$ , le signal reçu après échantillonnage sera :

$$z(t_n) = z(nT_s/N) = (-1)^n \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k e^{2j\pi \frac{k-n}{N}} \quad (3.5)$$

On voit que  $z(t_n)$  est la Transformée de Fourier discrète inverse de  $C_k H_k$ . La démodulation consiste donc à effectuer une Transformée de Fourier rapide. La figure 3.12 présente le schéma de principe du démodulateur OFDM.

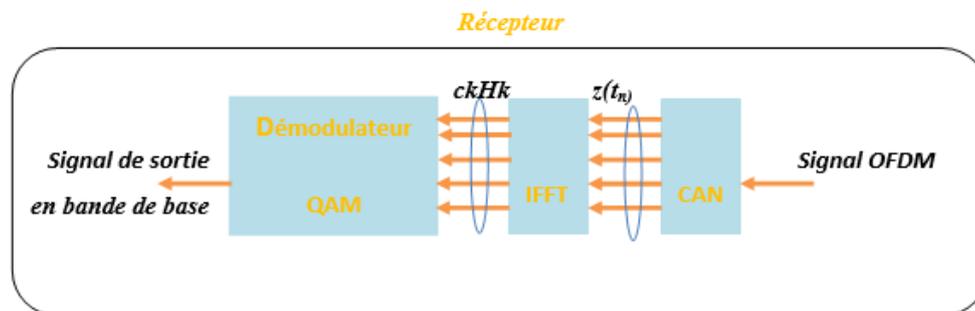


FIGURE 3.12 – Démodulateur OFDM

### 3.5.4 La modulation QAM :

La modulation QAM est caractérisée :

- Directement sur le canal : on parle alors de transmission en bande de base.

- Par la modulation d’amplitude en quadrature permet d’augmenter le débit de données, les formats utilisés dans les systèmes de communication mobile 5G incluent 16QAM, 64QAM, 256QAM et 1024 QAM.
- Par la modulation est appelée de haut niveau pour des indices au-dessus du 64.

Plus l’ordre de modulation augmente, plus le débit augmente, bien que la pénalité soit la résilience au bruit. D’outre, 256 QAM n’est utilisé que lorsque la qualité de la liaison est bonne, et il se réduit à 64 QAM, puis à 16 QAM, etc. à mesure que la liaison se détériore. Il s’agit d’un équilibre entre la résilience et le débit de données(figure 3.13).

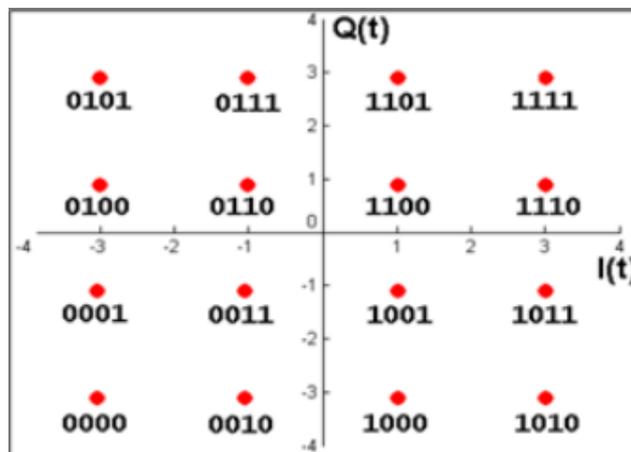


FIGURE 3.13 – Exemple de constellation pour une modulation en 16-QAM

### 3.5.5 Canal de Rayleigh

C’est la distribution que l’on utilise pour modéliser les évanouissements dus aux multi-trajets incohérents lorsque l’émetteur et le récepteur ne sont pas en vue directe. C’est un canal assez courant en milieux urbains denses. La densité de probabilité de est une loi de Rayleigh :  $p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, r \geq 0$

r Est l’enveloppe du signal complexe reçu,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

$\sigma$  est l’écart type de la partie réelle (x) ou la partie imaginaire(y).

D’autres propriétés utiles de cette distribution sont données par :

- La valeur moyenne :  $E\{r\} = \sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}}$
- La valeur quadratique moyenne :  $E\{r^2\} = 2\sigma^2$
- La variance :  $E\{r^2\} - E\{r\}^2 = \sigma^2\left(\frac{4-\pi}{2}\right)$

## 3.6 Simulations et résultats

Nous allons tâcher de présenter l’algorithme que nous avons implémenté sous MATLAB dans l’optique de réduire l’influence de l’interférence inter numéologies sur les performances du réseau.

Nous avons pris comme point de référence le calcul du BER (Bit Error Rate) ou taux d’erreur binaire, qui représente le taux de bits erronés sur l’ensemble des bits transmis. Nous allons exposer nos résultats et faire une brève comparaison avec quelques travaux existants

### 3.6.1 Algorithme principal

Dans notre étude, nous avons considérés une cellule composée de six utilisateurs , chacun nécessitant un catégorie d’application différente, et donc, une numéologie particulière, ce qui provoque une perte d’orthogonalité entre les sous-porteuses comme discuté précédemment.

Notre algorithme principal est résumé dans l’algorithme 1.

### 3.6.2 Discussion des résultats

Le BER calculé pour chaque utilisateur est représenté dans la figure 3.14

La figure 3.14 montre un BER avoisinant les 20% pour un SNR égal à 0dB, le taux d’erreur s’approche du zéro un peu au dessus des 20dB du rapport signal sur bruit. Ceci est un très bon résultat en comparaison à ce que montre la figure 3.15, qui représente un exemple de quelques travaux effectués récemment[58].

---

**Algorithm 1** Programme principal

---

**déclarer** : livres de codes pour chacuns des six utilisateurs

**déclarer** : nombre de bits à transmettre pour chaque utilisateur

**déclarer** : Canal de propagation de Rayleigh

**for**  $i = 1$  to 6 **do**

$data(i) \leftarrow \text{codageFEC}(data(i))$

**end for**

**déclarer** : Vecteur SNR pour la simulation

**for**  $i = 1$  to  $length(SNR)$  **do**

du SCMA aux données utilisateurs

Transmission à travers un canal de rayleigh

Récupération des données à la réception

décodage SCMA

décodage FEC

**return** BER de chaque utilisatuer

**end for**

**Plot** : Graph BER en fonction du SNR

---

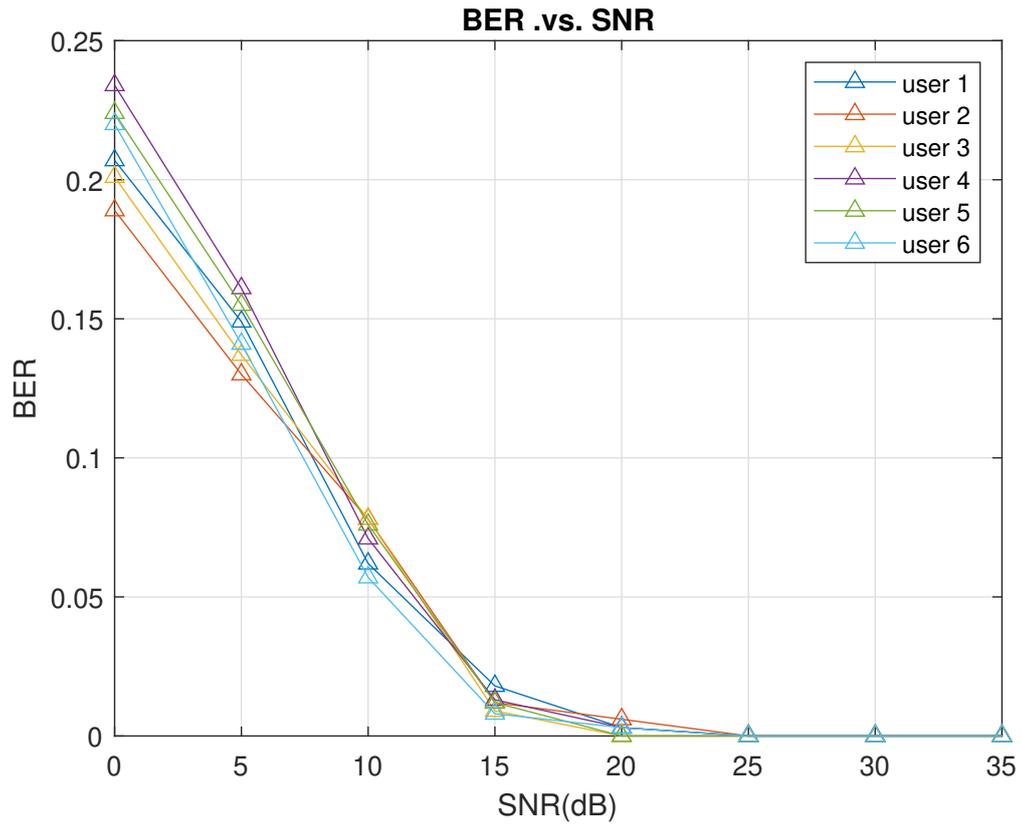


FIGURE 3.14 – BER en fonction du SNR pour les différents utilisateurs

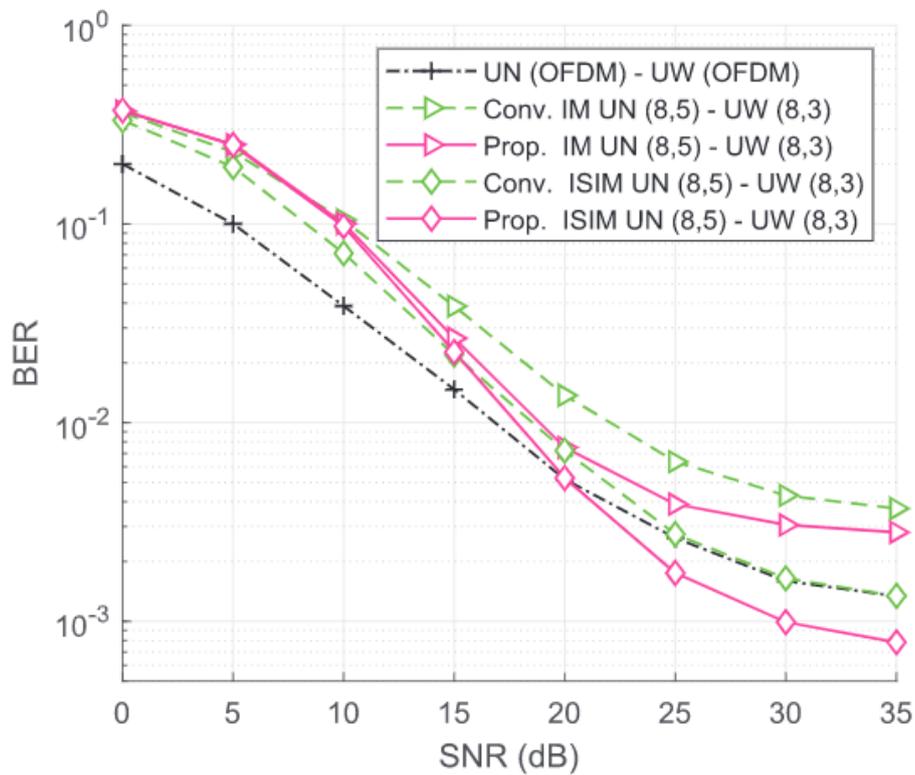


FIGURE 3.15 – BER en fonction du SNR selon différentes méthodes

## 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le schéma bloc que nous avons suivi dans la réalisation de notre algorithme en expliquant le fonctionnement de chacun. Nous avons aussi présenté une vue globale de notre algorithme et de son fonctionnement. Nous avons fini en exposant nos résultats et en les comparant à quelques techniques appliquées récemment dans la thématique des interférences inter numerologies.

Comme mentionné précédemment, les différents types d'interférences engendrées par la densité et la diversité offertes par les réseaux 5G fascinent la communauté scientifique à travers le monde, elles font l'objet d'études dans les quatre coins du globe, chaque chercheur voulant apporter sa pierre à l'édifice que représente cette technologie innovante.

Les interférences internumérologies représentent un problème coriace, plusieurs articles ont proposé, à titre d'exemple, des méthodes basées sur des techniques d'accès multiples non-orthogonales, et bien que ces méthodes aient apporté des résultats satisfaisants, leurs coûts, ainsi que la complexité de leur mises poussent néanmoins à une certaine réticence vis-à-vis d'elles. D'autres idées, moins complexes à mettre en place ont été proposées, mais la plupart ont apporté des résultats moyens.

Nous avons pour notre part essayé de contourner le problème, et cela en proposant une technique qui consiste non pas à réduire les interférences, mais au contraire à réduire leur impact sur les données transmises sur notre réseau. Et bien que notre technique reste perfectible, nous avons obtenu des résultats très satisfaisants en comparaison à la littérature récente.

---

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Hajri, S-E. (2018, 9 avril). L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptifs des utilisateurs [Thèse de doctorat, Université de Paris Saclay].
- [2] T. Rakotondraina « Réseau 5G », cours M2-TCO, Télécommunication, ESPA, AU : 2017-2018.
- [3] O. Ezratty, « Les nombreux défis de la 5G », Les Opinions Libre, Février 2019.
- [4] 5G-TDD-Synchronisation-QA-French.
- [5] ANFR. Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G, vol1, juillet 2019.
- [6] P.Popovski, KF Trillingsgaard, O. Simeone et G. Durisi, "5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC : A Communication-TheoreticView," in IEEE Access , vol. 6, pages 55765-55779, 2018, doi : 10.1109/ACCESS.2018.2872781.
- [7] « 5G mmWave Spectrum », [http ://www.techplayon.com/5g-mmwave-spectrum/](http://www.techplayon.com/5g-mmwave-spectrum/), Mai 2017.
- [8] « 5G ;NR ;Overall Description ; Stage-2», 3GPP TS 38.300 version 15.3.1 Release 15, Octobre 2018.
- [9] « 5G NR gNB Logical Architecture and Its Functional Split Options ». [https ://www.techplayon.com/5g-nr-gnb-logical-architecture-functional-split-options](https://www.techplayon.com/5g-nr-gnb-logical-architecture-functional-split-options), Octobre 2017.

- [10] Dahlman, Erik, Stefan Parkvall, and Johan Skold, "5G NR : The next generation wireless access technology," Academic Press, Elsevier, Paris, France, 2018.
- [11] « 5G ; NR ; Physical layer procedures for control », 3GPP TS 38.213 version 15.3.0 Release 15, Octobre 2018.
- [12] « 5G ; NR ; Overall Description ; Stage-2 », 3GPP TS 38.300 version 15.3.1 Release 15, Octobre 2018.
- [13] « NR Resource Block Definition and RBs Calculation », <http://www.techplayon.com/nr-resource-block-definition-and-rbs-calculation/>, Avril 2019.
- [14] NGMN, "5G white paper", NGMN white paper, 2015. Available : <https://www.ngmn.org/work-programme/5g-white-paper.html>. Accessed on : Apr. 17, 2019.
- [15] Li, Z., Sanchez Moya, F., Gabor, F., Da Silva Jr., J. e Koufos, K. (2016). "Device to device (D2D)". Dans M. Dohler T. Nakamura (Auteurs) A. Osseiran, J. Monserrat P. Marsch (Eds.) « 5G Mobile and Wireless Communications Technology (pp. 107-136). Cambridge : Cambridge University Press. Doi : 10.1017/CBO9781316417744.006.
- [16] huawei.
- [17] Rozé, Antoine. Massive MIMO, un approche angulaire pour les futures systems multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétrique. Diss. INSA de Rennes, 2016.
- [18] C. Wen, W. Shih, and S. Jin, "Deep Learning for Massive MIMO CSI Feedback," IEEE Wirel. Commun. Lett, vol. 7, no. 5, pp. 748–75, 2018.
- [19] 5G development and evolution.
- [20] MN Hindia, F. Qamar, T. Abbas, K. Dimiyati, MSA Talip et IS Amiri, "Annulation des interférences pour le réseau de relais haute densité de cinquième génération utilisant une approche géométrique stochastique", Int. J. Distrib. Capteur Netw. , vol. 15, non. 7, 2019.
- [21] F. Qamar, KB Dimiyati, MN Hindia, KAB Noordin et AM Al-Samman, "Un examen complet sur le fonctionnement multipoint coordonné pour LTE—A", Comput. Réseau , vol. 123, p. 19-37, août 2017.

- [22] F. Qamar, KB Dimiyati, MN Hindia, KAB Noordin et AM Al-Samman, "Un examen complet sur le fonctionnement multipoint coordonné pour LTE—A", *Comput. Réseau*, vol. 123, p. 19-37, août 2017.
- [23] AV Nikitin, "Sur les interférences intercanaux dans les systèmes de communication numérique, sa nature impulsive et son atténuation", *EURASIP J. Adv. Processus de signalisation.*, vol. 2011, non. 1, p. 137, décembre 2011.
- [24] N. Abdallah, HA Kadim et HA Sallomi, "Étude et analyse des interférences intracellulaires et inter-cellulaires pour le réseau 5G", *J. Eng. Soutenir. Développer.*, vol. 24, non. 3, p. 43-57, mai 2020.
- [25] 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.
- [26] A. A. Zaidi, R. Baldemair, H. Tullberg, H. Bjorkegren, L. Sundstrom, J. Medbo, C. Kilinc, and I. Da Silva, "Waveform and numerology to support 5G services and requirements," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 11, pp. 90-98, Nov. 2016.
- [27] X. Zhang, L. Zhang, P. Xiao, D. Ma, J. Wei, and Y. Xin, "Mixed numerologies interference analysis and inter-numerology interference cancellation for windowed OFDM systems," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 67, no. 8, pp. 7047-7061, Apr. 2018.
- [28] NR; Physical Channels and Modulation (Release 15), document TS 38.211, Version 15.1.0, 3GPP, Apr. 2018.
- [29] J. Vihriälä, A. A. Zaidi, V. Venkatasubramanian, N. He, E. Tiirola, J. Medbo, E. Lähetkangas, K. Werner, K. Pajukoski, A. Cedergren, and R. Baldemair, "Numerology and frame structure for 5G radio access," in *Proc. IEEE 27th Annu. Int. Symp. Pers., Indoor, Mobile Radio Commun (PIMRC)*, Valencia, Spain, Sep. 2016, pp. 1-5. *Journal*.
- [30] 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, Mar./Apr. 2018.
- [31] L. Zhang, A. Ijaz, P. Xiao, A. Quddus, and R. Tafazolli, "Single-rate and multi-rate multi-service systems for next generation and beyond communications," in *Proc. IEEE*

- 27th Annu. Int. Symp. Pers., Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC), Valencia, Spain, Sep. 2016, pp. 1-6.
- [32] L. Zhang, A. Ijaz, P. Xiao, A. Quddus, and R. Tafazolli, "Subband-filtered multi-carrier systems for multi-service wireless communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1893-1907, Mar. 2017.
- [33] A. B. Kihero, M. S. J. Solaija, A. Yazar, and H. Arslan, "Inter-numerology interference analysis for 5G and beyond," in *Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Dec. 2018, pp. 1-6.
- [34] L. Zhang, A. Ijaz, J. Mao, P. Xiao, and R. Tafazolli, "Multi-service signal multiplexing and isolation for physical-layer network slicing (PNS)," in *Proc. IEEE 86th Veh. Technol. Conf. (VTC-Fall)*, Sep. 2017, pp. 1-6.
- [35] Z. E. Ankarali, B. Peköz, and H. Arslan, "Flexible radio access beyond 5G : A future projection on waveform, numerology, and frame design principles," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18295-18309, 2017.
- [36] A. Yazar and H. Arslan, "A flexibility metric and optimization methods for mixed numerologies in 5G and beyond," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3755-3764, 2018.
- [37] X. Wang, Y. Wu, and J.-Y. Chouinard, "On the comparison between conventional OFDM and MSE-OFDM systems," in *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf. (GLOBECOM)*, San Francisco, CA, USA, vol. 1, Dec. 2003, pp. 35-39.
- [38] J.-Y. Chouinard, X. Wang, and Y. Wu, "MSE-OFDM : A new OFDM transmission technique with improved system performance," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process. (ICASSP)*, Philadelphia, PA, USA, vol. 3, Mar. 2005, pp. 865-868.
- [39] Mao, Juquan Zhang, Lei McWade, Stephen Chen, Hongzhi Xiao, Pei. (2020). Characterizing Inter-Numerology Interference in Mixed-Numerology OFDM Systems.
- [40] A. T. Abusabah and H. Arslan, "NOMA for multinumeroogy OFDM systems," *Wireless Commun. Mobile Comput.*, vol. 2018, May 2018, Art. no. 8514314.
- [41] "5G waveform candidates," Rohde Schwarz, Munich, Germany, Appl.Note 1MA271-0e, Jun. 2016.
- [42] Appendix 6, « forward error correction codes ».

- [43] Y. Jiang, A Practical Guide to Error-Control Coding Using MATLAB, Norwood, MA, USA :Artech House, pp. 1-17, 2010.
- [44] F. Sandoval, G. Poitau et F. Gagnon, "Optimisation des codes de correction d'erreur directe pour COFDM avec PAPR réduit", dans IEEE Transactions on Communications , vol. 67, non. 7, pages 4605-4619, juillet 2019, doi : 10.1109/TCOMM.2019.2910811.
- [45] C. Yang, C. Zhang, S. Zhang et X. You, "Efficient hardware architecture of deterministic MPA decoder for SCMA," 2016 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS) , 2016, pp. 293-296, doi : 10.1109/APCCAS.2016.7803957.
- [46] G. D. Forney JR., et L.F. Wei, "Multidimensional constellations Part I introduction, figures of merit, and generalized cross constellations," IEEE JSAC, Aug. 1989.
- [47] Y. Wu, et al, " Iterative multiuser receiver in sparse code multiple access systems ", IEEE ICC 2015, juin 2015.
- [48] Yiqun Wu, Chao Wang, Yan Chen, and Alireza Bayesteh, « Sparse Code Multiple Access for 5G Radio Transmission », Huawei Technologies Canada, Ltd. Ottawa, Ontario, Canada. Huawei Technologies, Co, Shanghai, China, 2018.
- [49] M. Taherzadeh et al. "SCMA Codebook Design", IEEE VTC-Fall, 2014.
- [50] Ma, Z., Bao, J. (2019). Accès multiple à code clairsemé (SCMA). Dans : Vaezi, M., Ding, Z., Poor, H. (eds) Techniques d'accès multiples pour les réseaux sans fil 5G et au-delà. Springer, Cham.
- [51] Bendahmane. A, Ghermoul. R, « Etude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC », Mémoire de Master 2, Université Aboubekr Belkaïd – Tlemcen, 2018.
- [52] Ad. Meriem, « Study and simulation of Sparse Code Multiple Access (SCMA) for 5G New Radio », Mémoire de Master, Université de Echahid Hamma Lakhdar ElOued, 2019.
- [53] O.Feriel, H.khadidja «Simulation et performance d'algorithmes pour l'accès aux ressources à base de SCMA», Université Abderrahmane Mira de BEJAIA,2019.
- [54] S. Zhang, X. Xu, L. Lu, Y. Wu, G. He, and Y. Chen, « Sparse code multiple access : An energy efficient uplink approach for 5g wireless systems », in Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014.

- [55] Ad. Meriem, « Study and simulation of Sparse Code Multiple Access (SCMA) for 5G New Radio », Mémoire de Master, Université de Echahid Hamma Lakhdar ElOued, 2019.
- [56] P. Moose, 'A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction', IEEE Transactions on Communications, Vol. 42, No. 10, Octobre 1994, pp. 2908 – 2914.
- [57] S. R. Saunders and A. Aragon, Antennas and Propagation for Wireless communication Systems. Wiley Sons, 2. a. ed., May 2007.
- [58] Dogan-Tusha, S., Tusha, A., Basar, E., Althunibat, S., Qaraqe, K., Arslan, H. : Inter- numerology interference in OFDM-IM systems. IET Commun. 15, 1941– 1949 (2021)