الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supèrieur et de la Recherche Scientifique

جـــامعـــة محمد الصديق بن يحـيـــــى جيجـل

Faculté des Sciences et de Technologies
Département : Electronique

كليـة العـــلوم و التكنولوجيا
قســـــم: الإلكترونيك

Mémoire de Master

Filière : Télécommunications

Option : Systèmes des Télécommunications

Thème

Etude des techniques de modulation pour les réseaux mobiles 5G et 6G de nouvelle génération.

Membres de Jury :

- **Encadreur : Mr. Zakarya ZAAIMIA**
- **Président : Mme. Chehla BEN HADJI**
- **Examinateur : Mr. Sofiane HADDAD**

Présenté par :

- **Bachir SADOU**
- **Dheya Alhaq ALQUDAMI**

Année Universitaire 2019-2020

بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

Il nous est agréable et important de réserver cette page comme un témoin de reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont soutenus et encadrés pour la réalisation de ce travail.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude.

Tout d'abord nous remercions **ALLAH** le tout puissant pour ces Faveurs et ses bontés, de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de terminer ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements au **membre de jury**. Veuillez accepter dans ce travail notre sincère respect et notre profonde reconnaissance. Nous tenons également à remercier infiniment **Mr Z.ZAAIMIA** pour nous avoir offert les conditions nécessaires et nous avoir guidés dans l'élaboration de ce travail. Nous profitons aussi de ce mémoire pour exprimer nos plus vifs remerciements envers tous les **professeurs** de la faculté de **Technologie** de **JIJEL** qui nous ont apportés du soutien durant nos études.

Que ce travail soit pour vous le gage de notre profond amour à tous nos amis à tous ceux qui nous ont aidés. A tous ceux qui nous aimons.

MERCI....

Dédicace

À mes parents,
À ma famille,
À mes amis.

Bachir

Dédicace

À mes parents,
À ma famille,
À mes amis.

Dheya-Alhaq

Résumé :

Avec l'évolution des besoins quotidiens des personnes, les communications mobiles font l'objet de l'étude d'un grand nombre de chercheurs. Cela, pour offrir une bonne qualité de communication mobile, et aussi des grands débits de transmission. L'objectif de ce mémoire est d'étudier et évaluer les performances des techniques de modulation de nouvelle génération, orientées aux futurs réseaux 5G et 6G, tel que les modulations multi-porteuses (OFDM, FBMC, GFDM, UFMC), et aussi mono-porteuse (DFT-s-OFDM), qui est utilisée en 5G. D'autre part, pour les réseaux 6G, la technique NOMA est la plus proche d'être utilisé à cause de ces excellentes performances en termes de capacité. En plus les caractéristiques de la technique NOMA sont étudiées en termes de BER, capacité, et le gain débit/puissance par utilisateur, ainsi que les modulations OFDM-QAM a haut ordre allant jusqu'à 4096 sous porteuse. Les pertes de la propagation en bandes millimétriques envisagées pour les communications à très haut débit en B5G et 6G sont finalement étudiées.

Mots Clés : 5G, B5G, 6G, OMA, NOMA, PAPR, BER, OFDM, FBMC, GFDM…

Abstract:

With the changing daily needs of people, mobile communications are the subject of study by a large number of researchers. This, to offer a good quality of mobile communication, also high transmission rates. The objective of this thesis is to study and evaluate the performance of new generation modulation techniques, oriented to future 5G and 6G networks, such as multi-carrier modulations (OFDM, FBMC, GFDM, UFMC), and also single carrier (DFT-S-OFDM), which is used in 5G. On the other hand, for 6G networks, the NOMA technique is the most likely to be used thanks to its excellent performance in terms of BER and Capacity. In addition, the characteristics of the NOMA technique is studied in terms of BER, capacity, and speed / power gain per user as well as high order QAM modulations up to 4096 subcarrier. The losses of the propagation in millimeter bands considered for very-high-speed communications in B5G and 6 G are finally studied.

Key Words: 5G, B5G, 6G, OMA, NOMA, PAPR, BER, OFDM, FBMC, GFDM…

ملخص:

مع الاحتياجات اليومية المتغيرة للناس، أصبحت الاتصالات اللاسلكية موضوع دراسة من قبل عدد كبير من الباحثين. هذا، لتقديم نوعية جيدة من الاتصالات اللاسلكية، وكذلك معدلات إرسال عالية. الهدف من هذه الرسالة هو دراسة وتقييم أداء تقنيات التعديل للجيل الجديد، الموجهة نحو شبكات الجيل الخامس والسادس المستقبلية، مثل التشكيلات متعددة الموجات

الحاملة (OFDM، FBMC، GFDM، UFMC)، وكذلك أحادية الناقل (DFT-S-OFDM)، والذي يستخدم في 5G. من ناحية أخرى، بالنسبة لشبكات 6G، فإن تقنية NOMA هي الأقرب استخدامًا بسبب أدائها الممتاز من حيث BER والسعة. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة خصائص تقنية NOMA من حيث معدل الخطأ (BER) والسعة والتدفق / الكسب في الطاقة لكل مستخدم بالإضافة إلى تعديلات QAM عالية المستوى حتى 4096 ناقلة فرعية. تم أخيرًا دراسة خسائر الانتشار في نطاقات المليمتر التي تم اعتبارها للاتصالات عالية السرعة جدًا في B5G و6G.

الكلمات المفتاحية: 5G, B5G, 6G, OMA, NOMA, PAPR, BER, OFDM, FBMC, GFDM…

LISTE DES ACRONYMES

1G: First Generation.

2G: Second Generation.

3G: Third Generation.

3GPP: 3rd Generation Partnership Project.

4G: Fourth Generation.

5G: Fifth Generation.

6G: 6th Generation.

ACLR: Adjacent Channel Leakage Ratio.

ADC: Analog To Digital Converter.

AWGN: Additive White Gaussian Noise.

B5G: Beyond 5G.

BDM: Binary Division Multiplexing.

BER: Bit Error Rate.

BLER: Bloc Error Rate.

BS: Base Station.

CDMA : Code Division Multiple Access.

Cloud RAN: Cloud Radio Access Network.

CP: Cyclic Prefix.

CP-OFDM: Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

CR: Cognitive Radio.

D2D: Device To Device

DAB: Digital Audio Braodcasting.

DAC: Digital To Analog Converter.

DFT-S-OFDM: Direct Fourier Transform Spread OFDM.

DL: Down Link.

eMBB: Enhanced Mobile Broadband.

FBMC: Filter Bank based Multi Carrier.

FDD: Frequency Division Duplexing.

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

FER: Frame Error rate.

FFT: Fast Fourier Transform.

FR1: Frequency Range 1.

FR2: Frequency Range 2.

FSPL: Free-Space Path Loss.

GFDM: Generalized Frequency Division Multiplexing.

GS-GFDM: Guard Symbols -Generalized Frequency Division Multiplexing.

gNB: Next Generation Node B.

IFFT: Inverse Fast Fourier Transform.

ICI: Interference Inter Carrier.

ISI: Interferences Inter Symbole.

IOT: Internet Of Things.

LDPC: Low Density Parity Check.

ADSL: Asymetric Digital Subscriber Line.

LTE: Long Term Evolution.

MC: Multi carrier.

MIMO: Multiple-Input Multiple-Output.

M2M: Machine To Machine.

MTC : Machine Type Communication.

mMTS : Massive Machine Type Communications.

MU-MIMO : Multi User-MIMO.

NFV: Network Functions Virtualization.

NG: Next Generation.

NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access.

NR: New Radio.

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access.

OMA: Orthogonal Multiple Acces.

OOB: Out-Of-Band Emission.

P/S: Parallel To Serial.

PAPR: Peak to Average Power Ratio.

PDMA : Pattern Division Multiple Access.

QAM : Quadrature Amplitude Modulation.

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying.

S/P: Serial To Parallel.

SC-FDMA: Single Carrier-FDMA.

SCS: Sub Carriers Spacing.

SDN: Software Defined Networking.

SISO: Single-Input-Single-Output.

SNR: Signal-to-Noise Ratio.

STBC: Space Time Block Codes.

SU-MIMO: Single User-MIMO.

TDD: Time Division Duplexing.

TDMA: Time Division Multiple Access.

TMUX: Terminal Multiplexer.

UE: User Equipment.

UFMC: Universal Filtered Multi Carrier.

UP : Up Link.

ITU: International Telecommunication Union.

URLLC: Ultra-Reliable Low-Latency Communication.

W-GFDM: Windowed-Generalized Frequency Division Multiplexing.

WRAN: Wireless Regional Aria Networks.

LISTES DES FIGURES

Figure I. 1: L'architecture de la 5G. 2
Figure I. 2: Schéma en bloc de la modulation CP-OFDM 10
Figure I. 3 : Spectre électromagnétique 11
Figure I. 4: Model d'un système MIMO 12
Figure I. 5 : model d'un système SU-MIMO 13
Figure I. 6: Uplink et downlink d'un système MU-MIMO.....13
Figure I. 7: Schéma d'un system MU-OFDM 14
Figure I. 8 : MIMO massive.....15
Figure I. 9 : Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD.....16
Figure I. 10: Exigences pour la technologie sans fil 6G 21

Figure II. 1 : Schéma bloc simplifié d'un émetteur-récepteur OFDM 25
Figure II. 2: Effet de canal sur la technique OFDM 26
Figure II. 3 : Système OFDM avec préfix cyclique 29
Figure II. 4 Exemple de constellation pour une modulation en 16-QAM.....30
Figure II. 5 CP-OFDM par rapport à DFT-S-OFDM 32
Figure II. 6 Principe d'un émetteur DFTS-OFDM.....33
Figure II. 7 Principe d'un récepteur DFTS-OFDM. 33
Figure II. 8 Diagramme de bloc de l'émetteur GFDM 35
Figure II. 9 Diagramme de bloc de modulateur GFDM détaillé 35
Figure II. 10 Différentes structures de blocs dans OFDM et GFDM 37
Figure II. 11 : Schéma fonctionnel de baque de filtres multi-porteuse (FBMC) 39
Figure II. 12: Filtre de mise en forme d'impulsion 39
Figure II. 13 : Schéma fonctionnel de l'émetteur UFMC 41
Figure II. 14 : Schéma fonctionnel du récepteur UFMC 42
Figure II. 15 : Une comparaison imagée de la OMA et NOMA 44

Figure III. 1 Performances BER de différentes formes d'onde pour FR1.....49
Figure III. 2 Performances BER de différentes formes d'onde pour FR2.....50
Figure III. 3 Performances BER-FBMC de différents ordres de modulation FR1.....51
Figure III. 4 Performances BER-FBMC de différents ordres de modulation FR2.....51
Figure III. 5 Performances PAPR de différentes formes d'onde pour FR1.....52
Figure III. 6 Performances PAPR de différentes formes d'onde pour FR2.....52

Figure III. 7 l'occupation spectrale des différentes formes d'onde pour FR2. 54
Figure III. 8 l'occupation spectrale des différentes formes d'onde pour FR1. 54
Figure III. 9 Performances MIMO-BER pour la diversité et le multiplexage 56
Figure III. 10 Performances MIMO-FER pour la diversité et le multiplexage 57
Figure III. 11 Performances MIMO-DEBIT pour la diversité et le multiplexage.....57
Figure III. 12: Performances BER-NOMA pour deux utilisateurs.....59
Figure III. 13: Performances BER-NOMA pour deux utilisateurs avec la même puissance.....59
Figure III. 14: Performances BER-NOMA pour deux utilisateurs avec 7GHz de bande passante. 60
Figure III. 15 : Performances BER-NOMA pour trois utilisateurs. 61
Figure III. 16 : Capacité NOMA deux utilisateurs. 62
Figure III. 17 : Capacité NOMA de deux utilisateurs pour 7GHZ de bande passante 63
Figure III. 18 : Performance BER pour modulations d'ordre supérieur QAM 64
Figure III. 19 : Performance FER pour modulations d'ordre supérieur QAM 64
Figure III. 20 : Performance en termes de débit pour les modulations QAM d'ordre supérieur en OFDM. 65
Figure III. 21 : Comparaison BER entre OMA / NOMA 66
Figure III. 22 : Comparaison BER entre OMA / NOMA. 67
Figure III. 23 les pertes de trajet pour différentes fréquences porteuses. 68

LISTE DES TABLEAUS

Tableau I.1: les différents 'Releases' du 4G, 5G et B5G.....6
Tableau I.2 : bandes de fonctionnement définies par 3GPP pour NR dans la gamme de fréquences 1 (FR1) 8
Tableau I.3 : bandes de fonctionnement définies par 3GPP pour NR dans la gamme de fréquences 2 (FR2).....8

Tableau II. 1 Évaluation du CP-OFDM pour différents types de liaisons.....29
Tableau II. 2 Illustration du gain apporté par la modulation QAM.....31
Tableau II. 3 Différentes entre OFDM et FMBC 40

Tableau III. 1 Paramètres des simulations.....49
Tableau III. 2: paramètre de simulation d'ordre supérieur.....63
Tableau III. 3: paramètre de simulation OMA/NOMA.....65

Résumé : ..... **I**
LISTE DES ACRONYMES ..... **III**
LISTES DES FIGURES ..... **VI**
LISTE DES TABLEAUS ..... **VIII**
Introduction Générale ..... **XII**

Chapitre 01 : Généralités sur la 5G et B5G

1. Introduction : **1**
2. Objectif de la 5G : **1**
3. Architecture du réseau 5G : **2**
3.1. Les services innovants : 3
3.2. La plate-forme de validation : (Architecture et gestion réseau) 3
3.3. La radio Hyper-Connecté : 4
4. Normalisation 5G : **4**
4.1. Les spécifications techniques de la 5G : 4
4.2. Normalisation 5G : 5
5. Bandes de fréquences de fonctionnement : **5**
5.1. L'évolution de la 4G a la 5G vers B5G (Releases) : 5
5.2. Bandes de fréquences FR1, FR2 et FR2+ : 7
6. Couches physique de 5GNR : **9**
6.1. OFDM : 9
6.2. CP-OFDM : Préfixe cyclique OFDM : 9
6.3. DFT-S-OFDM : 10
6.4. La modulation QAM : 11
7. Les techniques clé de la 5GNR : **11**
7.1. Bandes millimétriques (bande passante) : 11
7.2. MIMO : 12
7.2.1. SU-MIMO : 12
7.2.2. MU-MIMO : 13
7.2.3. Diversité Spatial MIMO : 14
7.2.4. Multiplexage spatial MIMO : 14
7.3. MIMO massif : 15
7.4. MIMO-STBC(Space Time Block Codes): 15
7.5. Méthodes duplex : 15
7.6. Techniques de codage : 17

7.6.1. Codage LDPC : 17
7.6.2. Codage Polaire : 17
8. Réseaux futurs B5G et 6G : 17
8.1. Perspectives techniques et technologiques : 18
8.2. Objectifs et services attendus : 20
9. Conclusion : 23

Chapitre02 : Techniques de modulation 5GNR, B5G, 6G

1. Introduction : 24
2. Modulations de nouvelle génération : 24
2.1. Technique de modulation (OFDM) : 24
2.1.1. Le système OFDM : 24
2.1.2. Principe et fonctionnement de l'OFDM : 25
2.2. Techniques de modulation pour les liaisons descendantes (Downlink) : 26
2.2.1. Préfixe cyclique standard : 27
2.2.2. CP-OFDM en liaison descendante (Downlink) : 27
2.2.3. La modulation QAM : 30
2.3. Techniques de modulation pour les Liaisons montantes (Uplink) : 31
2.3.1. Principe du DFT-s-OFDM : 32
2.3.2. Les Avantages et les Inconvénients de la forme d'onde DFT-s-OFDM : 33
2.4. Technique de modulation GFDM : 34
2.4.1. Principe de GFDM : 34
2.4.2. Les caractéristiques de GFDM : 36
2.4.3. Caractéristiques OOB : 36
2.4.4. Comparaison entre la structure OFDM et GFDM : 37
2.5. Technique de modulation FBMC : 37
.2.5.1 Définition : 37
2.5.2. Principe de fonctionnement : 38
2.5.3. Différences majeures entre OFDM et FBMC : 40
2.5.4. Avantages et Inconvénients du FBMC : 40
2.6. Technique de modulation UFMC : 41
2.6.1. Définition : 41
3. Modulations des prochaines générations B5G et 6G : 43
3.1. Modulation OMA et NOMA : 43
3.2. Comparaison entre NOMA et OMA : 44

.....44
4. Métriques de mesure et d'évaluation des performances :.....45
4.1. PAPR : 45
4.2. BER :.....46
4.3. BLER(FER) :.....46
4.4. Débit de transmission (Throughput) :.....46
4.5. Compatibilité MIMO : 46
4.6. Occupation Spectrale : 46
5. Conclusion : 47

Chapitre03 : Simulations couches physiques de NG

1. Introduction :.....48
2. Etude comparative de l'OFDM, UFMC, GFDM, FBMC : 48
2.1. Performances BER 48
2.2. Influence de l'ordre de modulation dans un système FBMC : 50
2.3. Caractéristiques de puissances de la forme d'onde (PAPR) : 52
2.4. Occupation spectrale : 53
2.5. Influence de l'ordre de diversité (nombre d'antennes) : 55
2.5.1. Performances BER en MIMO-OFDM : 55
2.5.2. MIMO-OFDM simulation Débit : 56
3. Performances NOMA pour les réseaux B5G : 58
3.1. BER de deux utilisateurs : 58
3.2. BER de Trois utilisateurs : 60
3.3. Capacité NOMA : 61
4. Modulation OFDM-QAM d'ordre supérieur : 63
5. Comparaison entre OMA / NOMA : 65
5.1. BER OMA/NOMA : 65
5.2. Capacité OMA/NOMA :.....66
6. Bandes de fréquence de la B5G et 6G : 67
7. Conclusion : 69
Conclusion Générale : 70
BIBLIOGRAPHIES 71

Introduction Générale

Actuellement et avec l'essor de nouveaux services dans les réseaux de communication mobile, la transmission demande un débit de plus en plus élevé, Alors, les technologies de l'information sont devenues une partie très importante de notre société.

Les systèmes mobiles anciens font généralement référence à un changement de nature du système, de vitesse, de technologie, de fréquence, de capacité de donnée, ou de latence. Les modulations mono-porteuses étaient la base des premiers systèmes de communications numériques. Pour augmenter le débit de transmission en général, on doit réduire la durée des symboles, mais les canaux multi-trajet ont comme effet d'introduire de l'interférence inter-symboles ISI (Interference Inter Symboles), ce qui nécessite une égalisation complexe à la réception. Donc, pour surpasser ces problèmes, les modulations multi-porteuses ont été proposées comme des solutions alternatives afin de contrer les effets des canaux multi-trajets.

Notre mémoire étudié des applications au niveau de la couche physique. L'objectif visé par ce travail est d'étudier les techniques de modulation pour les réseaux mobile 5G (Fifth Generation) et 6G (6th Generation) avec des techniques pour l'amélioration de performances (Débit, BER, PAPR, occupation spectrale,…) et l'optimisation de la conservation de l'énergie dans le réseau afin de pouvoir répondre aux enjeux de la 5G et 6G.

Le mémoire est constitué de trois chapitres comme suite :

Dans le premier chapitre nous allons définir comment le monde est arrivé à la 5G, après nous allons voir l'architecture d'un réseau 5G et ces principaux composant, puis les techniques clés pour atteindre les objectifs de la 5G (Massive MIMO, beamforming, ondes millimétriques,…), et à la fin du chapitre nous allons parler sur les réseaux future B5G (Beyond 5 Generation) et 6G et ces objectifs.

Dans le 2ème chapitre, nous allons faire une étude théorique sur les techniques de modulation utilisées dans la 5G et B5G, en principal les techniques OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), FBMC (Filter Bank Multi Carrier), GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) et UFMC (Universal Filtered Multi Carrier), ou on présente le principe de fonctionnement de chaque technique, ces avantages et inconvénients majeur, après on revoit les techniques utilisées dans la liaison montante et descendante des réseaux 5G. A la fin du chapitre, on présente les techniques des réseaux futurs B5G et 6G.

Le troisième chapitre présente une étude pratique des technique étudiées dans le chapitre 2 en terme de la performance BER (Bit Error Rate), PAPR (Peak to Average Power Ratio), efficacité spectrale, la capacité et le débit, après on fait une comparaison entre les différentes techniques on citant ces avantages et inconvénients. À la fin, nous présentons les simulations pour l'étude de la technique des réseaux future NOMA (Non Orthogonal Multiple Access), ainsi qu'une comparaison avec les techniques OMA (Orthogonal Multiple Access). A la fin, on conclut notre travail par une conclusion.

CHAPITRE 01 : GENERALITES SUR LA 5G ET B5G

1. Introduction :

Aujourd'hui, l'utilisation des technologies de communication mobile est devenue très large, les réseaux de télécommunications sont confrontés à une grande hétérogénéité. Jusqu'à maintenant, chacune des générations (1G, 2G ,3G, 4G) de réseaux mobiles a été implémenté pour offrir l'utilisation des applications spécifiques. Le contraire en ce qui concerne la 5G (5th generation), qu'elle devra offrir des divers besoins. En effet, pour ce nouveau réseaux 5G, ils apparaissent de nouveau type d'objets communicants à côté des utilisateurs cellulaires classiques, où ce qu'on appelle maintenant l'Internet des objets (IOT Internet Of Things).

La 5G est la cinquième génération. Elle a une multitude de fonctionnalités très avancées pour pouvoir résoudre plusieurs problèmes de notre vie quotidienne moderne. La 5G ne s'intéresse pas seulement aux besoins des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, mais elle ouvre aussi de nouvelles perspectives de la future. Elle permet la coexistence d'applications et d'utilisations très diverses, unifiés dans une même technologie pour faciliter l'arriver à une société complètement connectée. Cela permettra à tout le monde d'avoir un accès illimité aux informations et aux conversations virtuelles à tout moment, et en tout lieu pour tout le monde. Et il ne s'agit pas seulement d'appeler les gens, mais cela inclut également la possibilité de se connecter à tous les appareils et la disponibilité n'importe où, n'importe quand.

L'idée qui commence à se dessiner derrière la notion de la 5G est qu'elle ne correspondrait pas à une simple augmentation des vitesses, comme c'était le cas pour les générations précédentes (3G et 4G). La 5G cible une grande variété de secteurs, qui n'auraient pas forcément d'autre élément commun que cette technologie, mais qui sont des bases importantes de la société dans les domaines des : médias, l'énergie, la santé, l'éducation, l'industrie ou les transports.

2. Objectif de la 5G :

La 5G a cinq objectifs principaux, parmi lesquels l'augmentation de la vitesse et de la capacité des réseaux, mais aussi la préparation de l'évènement majeur qu'est l'Internet des objets, qui vas nous permettre de construire un monde complétement connecté.

- Des forfaits data plus volumineux : Le volume de données échangeables sur ce réseau de future devra être supérieur à ce que la norme 4G (LTE, Long Term Evolution) ne peut pas supporter.
- Connectivité de masse : le nombre d'appareils pouvant être connectées par antenne devra être 100 fois plus élevé [1]. Le nombre d'antennes dépend principalement des fréquences utilisées, en fonction des différents phénomènes comme l'absorption des

ondes, dans les murs, bâtiments, tours,... sachant que la technique 5G vise avant tout à connecter plus d'appareils (connectivité de masse).

- Un débit de 1Gbps : les meilleurs débits qui peuvent être offerts actuellement par la 4G sont dix fois inférieurs. il peut être équivalent ou même supérieur à celui proposé dans certaines offres internet résidentielles basées sur la fibre optique.
- Faible Latence : Le temps de latence est le temps entre le moment où nous cliquons sur un lien, envoyons des informations via le réseau, et la réponse de serveur, un temps de latence très court donne l'impression que le réseau est très réactif, temps de latence très courtes est très important dans les applications en temps réel (vidéo conférence, jeux vidéo, ….).
- Plus d'autonomie des batteries et moins de consommation : Pour connecter des appareils à internet, les terminaux ont besoins d'avoir une autonomie et une durée de vie considérablement améliorée. Pour arriver à ça, les constructeurs font des améliorations pour les batteries, mais ce n'est pas suffisant aussi, donc ils ont pensée a réduire la consommation avec des nouvelles techniques, pour doubler la durée de vie des terminaux de dix fois pour une même charge.

3. Architecture du réseau 5G :

Un réseau 5G est composé de trois couches principales, « Services innovants », «la plateforme d'activation » et «la radio hyper-connectée », nous les décrivons avec quelques détails.

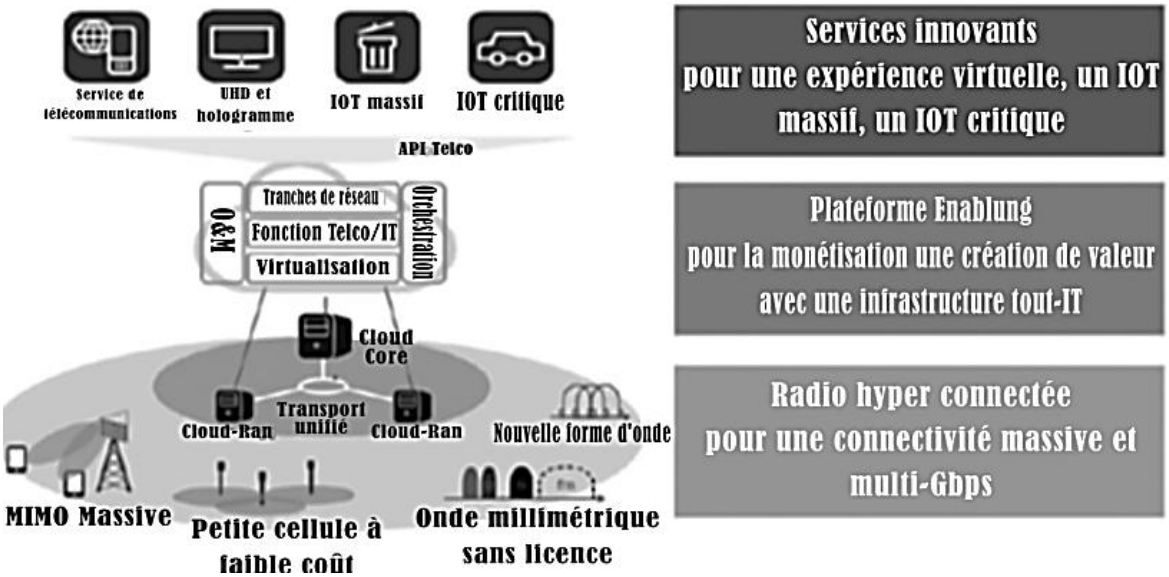

Figure I. 1: L'architecture de la 5G [2].

3.1. Les services innovants :

C'est la couche supérieure, elle comprend les services innovants de la 5G, basés sur les différentes capacités d'infrastructure 5G, les services offert par la 5G peuvent fournir une expérience utilisateur immersive et hautement fiable. D'une façon particulière, les vidéos très hautes définitions (UHD, Ultra High Definition), deviendra parmi les services les plus dominants, qui offrent des expériences utilisateur virtuelles comme les vidéos streaming et les hologrammes. D'autre part, la bande passante et la haute fiabilité offerte par la 5G facilitera le lancement des services de contrôle des robots à distance et aussi les services de l'Internet des Objets.

3.2. La plate-forme de validation : (Architecture et gestion réseau)

C'est la couche intermédiaire d'un réseau 5G qui comporte un réseau sous-jacent à une infrastructure orientée service, elle a comme fonction de crée des valeurs significatives et centrées sur le service pour soutenir la couche supérieure des «services innovants», en transformant correctement les éléments mécaniques et disjoints. Il est utilisé via deux activateurs clés qui représentent l'avenir de télécommunication, pour effectuer cette tâche, l'un est la virtualisation des fonctions réseau NFV (Network Function Virtualisation) et le réseau SDN (Software Defined Networking), qui virtualisent l'infrastructure et les services pour offrir plus de flexibilité et d'intelligence au niveau du réseau.

- Le **SDN :** son but principal consiste à séparer la partie de contrôle du réseau de la partie opérationnelle, les deux parties étant traditionnellement liées et distribuées dans le réseau. Le contrôle du réseau, est concentré sous forme des logiciels sur des serveurs plus puissants et libre des spécifications des équipementiers. Cela permet de lancer des services à forte valeur dans des environnements hétérogènes, comme l'équilibrage de charge, routage intelligent, configuration dynamique, ...

- **Cloud-RAN** : est une fonctionnalité appelée RAN centralisé, il implique une architecture de réseau différente de ce qui se fait aujourd'hui, c'est une évolution de **SDN** : Les unités de traitement du signal sont actuellement situées au niveau de la station de base, elles sont déportées dans le Cloud centralisé, situées au plus près de l'antenne, communiquant avec les têtes de réseau, à l'aide d'un réseau de fibre optique. Cette centralisation permet d'avoir une vision d'ensemble de toutes les stations déployées, la gestion des interférences entre cellules et terminaux et coordonner le traitement du signal.

L'autre est un ensemble bien défini d'interfaces de programmation d'application API (Application Programming Interface), qui offre la possibilité d'automatiser le réseau interne pour un réseau automatisé.

- Le **NFV** : Un complément au **SDN**, son but est la virtualisation, remplacer le logiciel sur un serveur, le NFV vise à accélérer le déploiement et à permettre des changements rapides.

3.3. La radio Hyper-Connecté :

C'est la couche inférieure qui fournit une quantité importante de données à la couche intermédiaire " plate-forme d'activation", de manière efficace et transparente. En raison de l'énorme trafic et des exigences strictes de latence, cette couche inclut de nouvelles technologies de réseau qui sont en cours d'étude par les organismes de recherche.

4. Normalisation 5G :

4.1. Les spécifications techniques de la 5G :

Les deux parties qui spécifient chaque nouvelle génération de téléphonie mobile sont : l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) et le 3GPP (3rd Generation Partnership Project). L'UIT, est une agence des Nations Unies, qui est chargé par les technologies de communication et de l'information, fait des études avec son «Working Party 5D», qui est chargé du traitement des problèmes techniques et l'exploitation des radiocommunications.
En 2013, le groupe a commencé le travail sur la définition d'une nouvelle norme IMT (International Mobile Telecommunications), la norme IMT-2020 (5G), comme le cas de la 4G (IMT-Advanced) qui a été défini au début des années 2000. Avec les travaux de l'UIT, le 3GPP aussi fait des études. Le groupe 3GPP a été établi en 1998, il regroupe sept organismes de normalisation, d'industriels, des associations et des organismes publics [3].

Ce groupe est chargé du développement et de la maintenance des spécifications techniques relatives aux normes de téléphonie mobile. Quand une nouvelle norme est en cours de définition par l'UIT, en même temps le 3GPP travaille sur les solutions techniques qui permettent la réponse aux objectifs définis par l'UIT.

La définition de la release 15 qui est la première norme 3GPP pour la 5G est déjà lancée (en décembre 2016), la définition d'une nouvelle architecture a commencée à partir de mars 2017, pour l'étude d'une nouvelle interface air (appelée NR pour New Radio). En septembre 2018, la première version de la norme a été validée. En mars 2020, la deuxième release (3GPP

release 16) a été publiée. Le passage d'une génération à la suivante se fait d'une façon progressive, le LTE continuera l'évolution en parallèle avec la NR (New Radio), probablement les deux normes seront très complémentaires. Avec les premiers déploiements 5G, le LTE reste une partie du réseau et du contrôle des antennes 5G NR (Fifth Generation New Radio). D'autre part, les objectifs de la 5G qui pourra être atteints ont été mises en place dans les release du 3GPP, 13, 14 et 15 qui ne seront pas uniquement pour la 5G, mais aussi qui représenteront des évolutions de la 4G (donc on parle de la 4.9G ou de LTE Advanced Pro) [3].

4.2. Normalisation 5G :

Le groupe de normalisation 3GPP est responsable de l'établissement de la norme 5G sans fil à l'aide de nombreux participants et contributions du monde entier. La version 15 (Release 15) de la norme 3GPP a été programmée en septembre 2018, introduisant la norme 5G. Une sortie d'une nouvelle norme du groupe de normalisation sera pour les spécifications de la couche physique et les scénarios pour la 5G extrême haut débit mobile eMBB (Enhanced mobile broadband).

L'organisme de normalisation 3GPP s'est déjà mis d'accord sur un certain nombre de points, notamment [3] :

• Plusieurs types de formes d'onde : OFDM à préfixe cyclique et SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) (ceux utilisés dans LTE), avec OFDM filtré et OFDM fenêtré à l'étude comme options supplémentaires pour le spectre.

• Deux types de canaux de propagation pour les simulations avec des fréquences de 500 MHz à 100 GHz.

• Espacement variable entre les porteuses et donc longueur variable des symboles OFDM.

• Schémas de codage multiples, comprenant le codage LDPC (Low Density parity Check) pour les canaux des données et le codage polaire pour les canaux de contrôle.

5. Bandes de fréquences de fonctionnement :

5.1. L'évolution de la 4G a la 5G vers B5G (Releases) :

Le tableau I.1 représente l'évolution des différents releases du 4G, 5G et B5G, depuis la release 8 jusqu'à release 17, la date de libération et des détails sur chaque releases.

Tableau I.1: les différents 'Releases' du 4G, 5G et B5G.

Versions	Libérée	Détails
Release 8	2008 Q4	Première version LTE. Réseau tout IP (SAE). Nouvelle interface radio basée sur OFDMA, FDE et MIMO, non rétro compatible avec les interfaces CDMA précédentes. HSDPA à deux cellules. UMTS HNB.
Release 9	2009 Q4	Améliorations SAES, interopérabilité WiMAX et LTE / UMTS. HSDPA double cellule avec MIMO, HSUPA double cellule, LTE HeNB.
Release 10	2011 Q1	LTE Advanced répondant aux exigences IMT Advanced 4G, Rétro compatible avec la version 8 (LTE), HSDPA multicellulaire (4 porteurs).
Release 11	2012 Q3	Interconnexion IP avancée des services. Interconnexion de la couche de service entre les opérateurs / transporteurs nationaux ainsi que les fournisseurs d'applications tiers. Améliorations des réseaux hétérogènes (H et Net), Opération multipoint coordonnée (CoMP). Coexistence dans l'appareil (IDC).
Release 12	2015 Q1	Petites cellules améliorées (modulation d'ordre supérieur, double connectivité, découverte de cellules, configuration automatique), agrégation de porteuses (2 porteuses de liaison montante, 3 porteuses de liaison descendante, agrégation de porteuses FDD / TDD), MIMO (modélisation de canal 3D, formation de faisceaux en élévation, MIMO massif), nouveau et services améliorés (coût et gamme de MTC, communication D2D, améliorations eMBMS).
Release 13	2016 Q1	LTE dans les améliorations, LTE sans licence pour la communication de type machine, Élévation Beamforming / Full-Dimension MIMO, positionnement intérieur. LTE-Advanced Pro.
Release 14	2017 Q2	Efficacité énergétique, services de localisation (LCS), données critiques sur LTE, vidéo critique sur LTE, direction de service mobile flexible (FMSS), supplément de diffusion multimédia pour le système d'avertissement public (MBSP), amélioration du service de télévision, Internet des objets massif, Service de diffusion cellulaire (CBS).
Release 15	2018 Q2	Première sortie de NR ("New Radio"), Prise en charge du service 5G Vehicle-to-X, du sous-système de réseau central multimédia IP (IMS), du futur système de communication mobile ferroviaire.
Release 16	2020 Q3	Le système 5G - Phase 2, Améliorations de la 5G, accès basé sur NR au spectre sans licence (NR-U), accès satellite.
Release 17	Sept 2021	Les discussions lors des séances plénières TSG 88-e ont révélé que les dates de la Rel-17 sont à haut risque d'être retardées. Cela est dû au passage des réunions physiques aux réunions électroniques.

5.2. Bandes de fréquences FR1, FR2 et 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 Range 1), et la région mmWave de 24.25-52.60 GHz sous le nom de FR2 (Frequency Range 2) [4]. 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, 30 et 60 KHz) sont identifiés pour fonctionner en bandes sous-6 GHz, en FR2 deux espacements de sous-porteuse (60 et 120 KHz) sont identifiés pour fonctionner en bandes millimétriques. Les largeurs de bande varient en fonction du SCS (Sub Carriers Spacing), avec beaucoup de préférence pour 5 MHz de largeur de canal avec un SCS de 15 KHz [4].

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 24.25 à 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. Les bandes de fonctionnement NR sont indiquées dans le **Tableau I.2** et **Tableau I.3**.

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 de canal UE (User Equipment) 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-Bandwidth Part) qui sont inférieures ou égales au nombre de blocs de ressources de la porteuse RF (Radio Frequency).

La bande FR2+ est une nouvelle bande de fréquence, elle est composé d'une bande jusqu'à 52.6 GHz, et une autre bande de 57-71 GHz [4], sous la nomenclature « 5G-New Radio Unlicensed (NRU) », c.-à-d. le spectre de fréquences non licencié, qui peut être utilisé dans la prochaine génération.

Tableau I.2 : bandes de fonctionnement définies par 3GPP pour NR dans la gamme de fréquences 1 (FR1) [4].

NR Band	Uplink Range (MHz)	Downlink Range (MHz)	Duplex Mode	Région(s) principales
n1	1920-1980	2110-2170	FDD	Europe, Asie
n2	1950-1910	1930-1990	FDD	Amériques, (Asie)
n3	1710-1785	1850-1880	FDD	Europe, Asie (Amériques)
n5	824-845	869-894	FDD	Amériques, (Asie)
n7	2500-2570	2620-2690	FDD	Europe, Asie
n8	880-915	925-960	FDD	Europe, Asie
n20	832-862	791-821	FDD	Europe
n28	703-748	758-803	FDD	Asie /Pacific
n38	2570-2620	2570-2620	TDD	Europe
n41	2496-2690	2496-2690	TDD	USA, Chine
n50	1432-1517	1432-1517	TDD	
n51	1427-1432	1427-1432	TDD	
n66	1710-1780	2110-2200	FDD	Amériques
n70	1695-1710	1995-2020	FDD	
n71	633-698	617-652	FDD	Amériques
n74	1427-1470	1475-1518	FDD	Japon
n75	N/A	1432-1517	SDL	Europe
n76	N/A	1427-1432	SDL	Europe
n77	3300-4200	3300-4200	TDD	Europe, Asie
n78	3300-3800	3300-3800	TDD	Europe, Asie
n79	4400-5500	4400-5500	TDD	Asie
n80	1710-1785	N/A	SUL	
n81	880-915	N/A	SUL	
n82	832-862	N/A	SUL	
n83	703-748	N/A	SUL	

Tableau I.3 : bandes de fonctionnement définies par 3GPP pour NR dans la gamme de fréquences 2 (FR2) [4].

NR Band	Range (MHz)	Duplex Mode	Région(s) principales
N257	26500-29500	TDD	Asie, Amériques (global)
N258	24250-27500	TDD	Europe, Asie (global)
N259	37000-40000	TDD	USA (global)

6. Couches physique de 5GNR :

6.1. OFDM :

La technique de modulation OFDM est une évolution des techniques de multiplexage par répartition en fréquence (FDM), elle se repose sur l'utilisation des formes d'impulsions orthogonales pour multiplier les données dans le domaine fréquentiel. L'OFDM n'a pas été utilisée dans une application adressée vers les consommateurs avant la fin des années 1980 et après le déploiement de la ligne numérique d'abonné asymétrique (ADSL), la modulation OFDM a été utilisée dans les applications sans fil avec le Wifi (Wireless Fidelity) et LTE [5].

6.2. CP-OFDM : Préfixe cyclique OFDM :

Dans le réseau 5G NR, le préfixe cyclique OFDM (CP-OFDM) est la version spécifique d'OFDM utilisée pour la liaison descendante, même chose pour LTE qui utilise aussi la CP-OFDM dans sa liaison descendante.

Pour le CP-OFDM, la dernière partie des données de la trame OFDM est ajoutée au début de la trame OFDM suivante, la longueur du préfixe cyclique doit être supérieure à la propagation du retard de canal pour éviter le chevauchement entre les symboles, ce principe élimine les interférences entre symboles qui peuvent être provoqués des retards et des réflexions.

En plus, l'étalement du retard de canal dépend de la fréquence utilisée, la longueur du préfixe cyclique choisie pour être suffisamment longue pour supporter les interférences. Donc, pour ces raisons la longueur du code cyclique CP est adaptative en fonction des conditions de liaison de transmission et le canal.

Différemment de la 4G LTE, la 5G NR a utilisé un format d'onde pour la liaison montante basée sur DFT-S-OFDM. Aussi, la 5G NR consiste à utiliser un espacement flexible entre les sous-porteuses, le LTE aussi à un espacement entre les sous-porteuses de 15KHz, par contre la 5G permet un espacement entre porteuses de 15KHz fois 2 (30KHz), avec un espacement maximal de 240 kHz [6]. L'espacement des porteuses est nécessaire pour préserver l'orthogonalité des porteuses.

La flexibilité de l'espacement entre les sous porteuses est utilisée pour prendre en charge correctement les différents types de bandes de fréquence et de modèles de déploiement que la 5G NR devra prendre en charge. Par exemple, la 5G NR doit être capable de fonctionner dans des bandes d'ondes millimétriques qui ont des canaux plus larges allant jusqu'à 400 MHz [6]. La Release-15 du 3GPP 5G NR a donné des détails sur la numérologie OFDM évolutive avec un échelle d'espacement des sous-porteuses de 30, 60 KHz qui peut évoluer avec la bande passante du canal, de sorte que la taille de la FFT (Fast Fourier Transform) change de sorte que la complexité n'augmente pas sans utilité pour des bandes passantes plus élevées. La flexibilité de

l'espacement entre les porteuses donne également une résistance aux effets du bruit de phase dans le système de transmission.

L'utilisation de l'OFDM offre une faible complexité de mise en œuvre par rapport à certaines des autres formes d'onde envisagées pour la 5G. Aussi, l'OFDM est bien compris et facile à implémentée car elle a été déjà utilisé pour la 4G et d'autres systèmes sans fil.

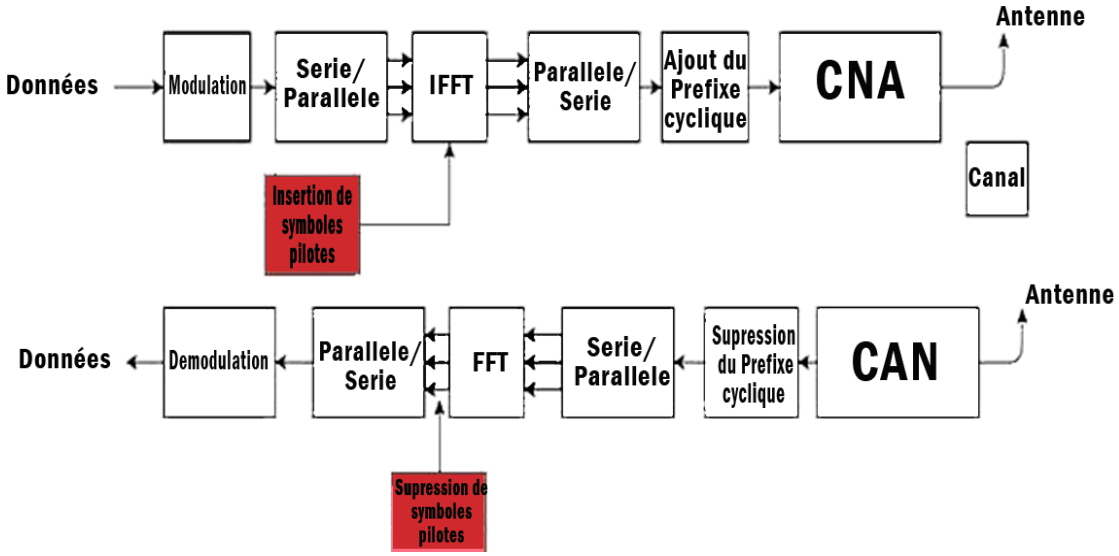

Figure I. 2: Schéma en bloc de la modulation CP-OFDM [6].

6.3. DFT-S-OFDM :

L'OFDM à étalement directe par transformée de Fourier discrète, est une technique de transmission de type SC (Single Carrier) ou à porteuse unique, cette technique peut être combiné avec l'OFDM qui offre une bonne flexibilité pour un système de communication mobile comme la 5G. Elle est plus couramment appelé SC-FDMA.

Le traitement d'une transmission mono-porteuse (SC-FDMA) est très similaire à celui de la transmission multi-porteuse (OFDMA). La séquence de bits transmise pour chaque utilisateur est mise en correspondance avec une constellation complexe de symboles (modulation d'amplitude BPSK, QPSK ou M-Quadrature). Après, les différents utilisateurs prennent différents coefficients de Fourier. Cette opération est effectuée dans les blocs Mappage et démappage. Le récepteur a un bloc de démappage, un bloc IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) et un bloc de détection pour chaque signal à recevoir. Comme la transmission OFDM, des intervalles de garde ou préfixes cycliques sont ajoutés entre les blocs de symboles afin d'éliminer efficacement les interférences de propagation temporelle entre les symboles adjacents (causée par la propagation des trajets multiples) entre les blocs.

6.4. La modulation QAM :

C'est la modulation d'amplitude en quadrature, elle permet d'augmenter le débit de données plusieurs fois surtout quand on monte aux ordres de modulation élevés. Les formats de la modulation d'amplitude en quadrature utilisés dans le système de communication mobile 5 G incluent 16QAM, 64QAM et 256QAM [6].

Plus on choisit des modulations d'ordre élevé, plus on augmente le débit, mais malheureusement la pénalité soit la résistivité au bruit. Alors, 256 QAM est utilisé juste lorsque la qualité de la liaison est bonne, et se réduit à 64 QAM, puis 16 QAM, etc., à mesure que la liaison se dégrade. Donc, Il s'agit d'un équilibre entre le débit de données et la résistivité au bruit.

7. Les techniques clé de la 5GNR :

7.1. Bandes millimétriques (bande passante) :

On parle des fréquences supérieures à 6GHz qui n'ont encore jamais été pris pour l'implémentation des réseaux mobiles pour des raisons technologique et de qualité de propagation. Pour répondre à l'augmentation des débits de transmission et des volumes de données à transmettre, il faut offrir de telles réserves de spectre, et leur utilisation nécessite le développement de toutes les technologies nécessaires comme la miniaturisation à faible coût et avec une faible consommation d'énergie pour être compatible avec les terminaux portables (Amplificateur, codeur, traitement de signal, antenne…). En particulier, la communication par onde millimétrique peut être utilisée pour une couverture extérieure pour des réseaux à haute densité telle que la portée allant jusqu'à 200 à 300 mètre (micro cellules) [2]. Chacune des cellules aura une couverture réduite, ce qui nécessitera l'implémentation de la technique de ' beamforming' [2].

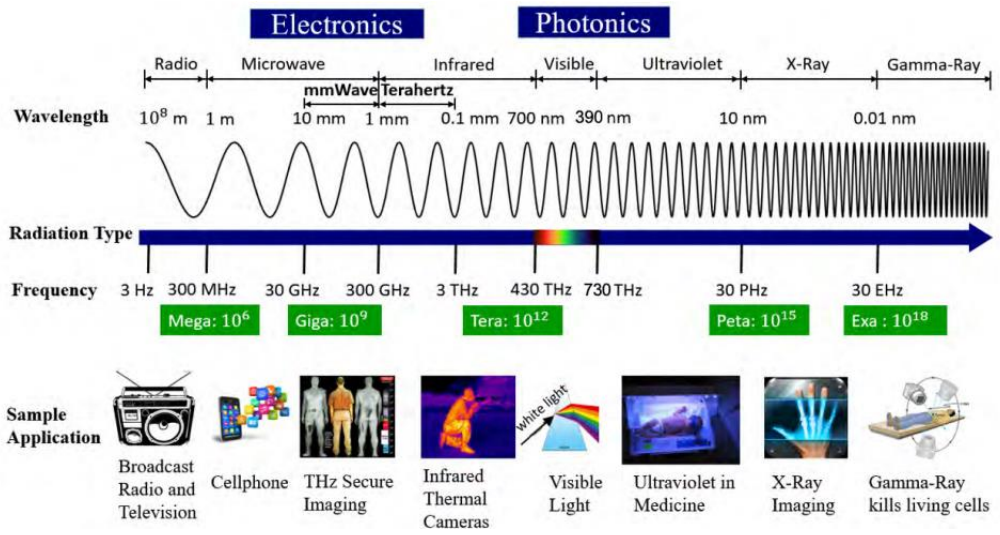

Figure I. 3 : Spectre électromagnétique [2].

7.2. MIMO :

Les besoins des hauts débits pour les communications mobiles de dernière génération ont augmentés, la meilleure solution pour atteindre ce but est d'augmenter le nombre d'antennes pour l'émission et la réception de la liaison sans fil, donc on parle de la technique MIMO. Aussi, pour réduire les évanouissements de signal provoqués par l'environnement de propagation des trajets multiples et le bruit de canal, la technique de diversité peut être utilisée, cette dernière consiste à placer une antenne en émission et plusieurs antennes en réception. Alors que l'intégration de plusieurs antennes sur le plan de masse d'un téléphone mobile est un grand défi pour les chercheurs. En effet, à cause du volume limité des terminaux mobiles, une forte isolation entre les antennes doit être réalisée afin de maximiser le gain de diversité et aussi augmenter la capacité de transmission de l'ensemble du système total [7].

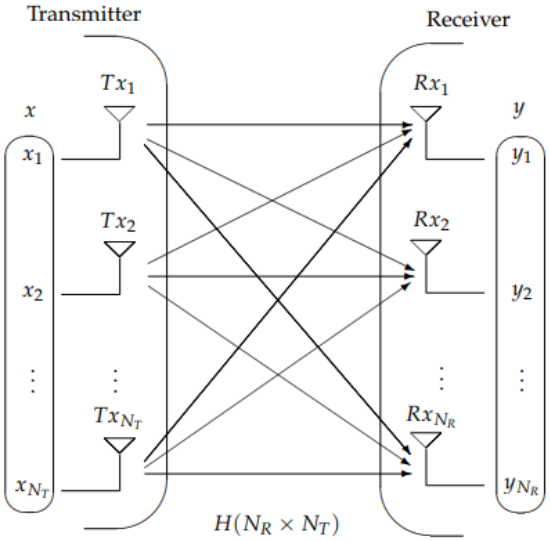

Figure I. 4: Model d'un système MIMO [7].

7.2.1. SU-MIMO :

Le SU-MIMO (Single User), est le type le plus courant, il permet d'envoyer des données à l'aide des différentes antennes vers un seul utilisateur à un instant donné, il nécessite d'avoir plusieurs antennes dans chaque récepteur. Ce type permet d'atteindre un débit unitaire plus élevé.

SU-MIMO était une technologie optionnelle fournie avec la norme 802.11n [8]. Elle consiste qu'un seul utilisateur MIMO utilise plusieurs flux de données qui doivent être envoyés ou reçus entre un seul appareil à la fois. Cette technologie demande que les radios Wi-Fi émettrices et réceptrices prennent en charge la technologie MIMO, aussi que la présence de plusieurs antennes.

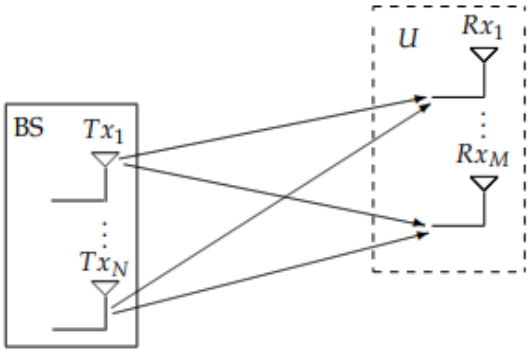

Figure I. 5 : model d'un système SU-MIMO [8].

7.2.2. MU-MIMO :

Pour les systèmes de type MU-MIMO (Multi User), le point d'accès communique avec plusieurs terminaux mobiles à la fois en utilisant la propriété de la dimension spatiale. Ceci peut être réalisé si on utilise la connaissance de chaque canal qui relie les antennes de l'émission avec les autres antennes de réception, en se basant sur la méthode du « Feedback » explicite. Dans la situation du système MU-MIMO, le bloc émetteur doit gérer les interférences entre les utilisateurs. Pour y prévenir, on a proposé plusieurs méthodes, appelée méthodes de pré codage. La diagonalisation par blocs, est la méthode la plus étudiée et fréquemment utiliser, elle consiste en premier lieu à supprimer l'interférence entre les utilisateurs, après à optimiser la capacité des liens de transmission.

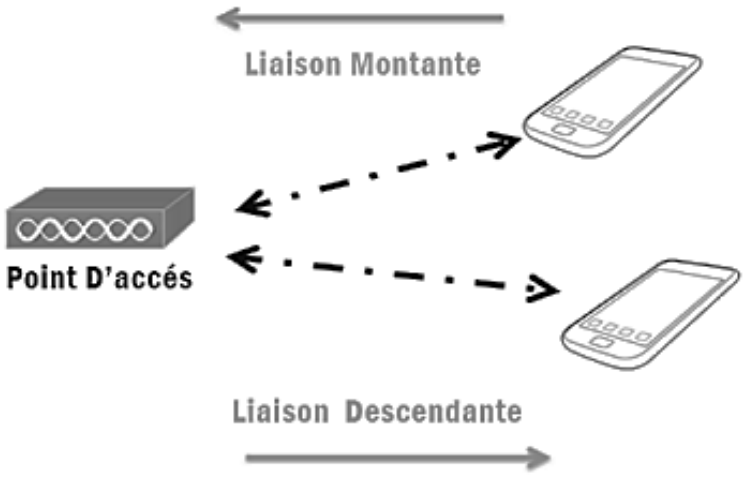

Figure I. 6: Uplink et downlink d'un système MU-MIMO [8].

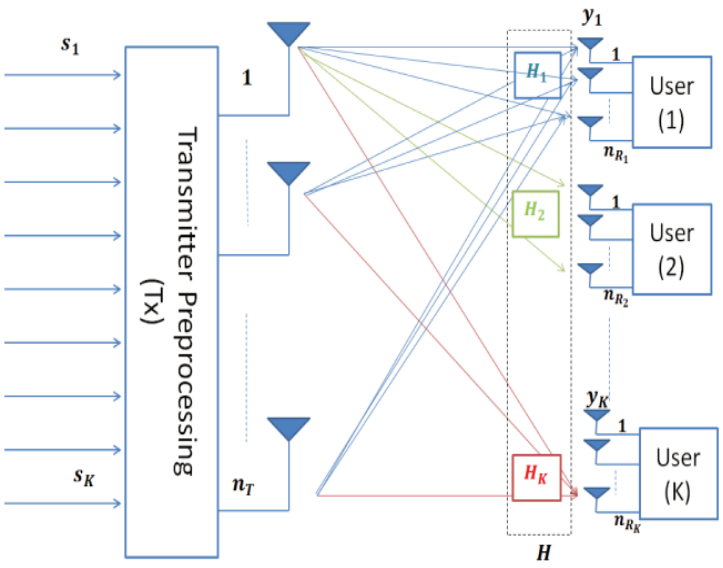

Figure I. 7: Schéma d'un system MU-OFDM [8].

7.2.3. Diversité Spatial MIMO :

Cette technique consiste à transmettre simultanément la même information sur différentes antennes d'émission. A la réception, tous les signaux reçus sur les antennes de réception sont sommés d'une manière cohérente et aussi re-phasés. La version simplifiée de cette technique consiste à utiliser le signal d'une seule des antennes, celle qui reçoit le meilleur signal (antennes polarisées). Cela nous permet d'augmenter le rapport signal sur bruit SNR (Signal Noise Ratio) (grâce au gain de diversité) de la transmission. Pour que la technique de la diversité spatiale soit bien efficace, les sous-canaux MIMO doit être dé corrélés entre eux (indépendants).

7.2.4. Multiplexage spatial MIMO :

Le message à transmettre est partagé en sous-messages. Ensuite on les transmet à la fois sur chacune des antennes d'émission. Les signaux reçus sur les antennes de réception sont ré-assemblés pour reconstituer le message d'origine transmit. Même chose pour la diversité MIMO, les sous-canaux de propagation doivent être dé-corrélés entre eux (indépendants). Cette technique de multiplexage MIMO permet d'augmenter les débits de transmission (grâce au gain de multiplexage). Les deux techniques de diversité et de multiplexage MIMO peuvent être utilisées ensemble [9]. Par exemple dans un système MIMO 5 x 5 (5 antennes d'émission et 5 antennes de réception), on peut faire une configuration d'un sous-système MIMO 2 x 2 pour faire du multiplexage MIMO et un deuxième sous-système MIMO 3 x 3 pour faire de la diversité MIMO.

7.3. MIMO massif :

La technique de MIMO massive consiste à utiliser un grand nombre de micro antennes « antennes intelligentes » sur un seul dispositif (de 8 à 128 antennes actuellement, mais avec l'utilisation de fréquences à 6GHz le nombre devient plus grand). L'intérêt de l'utilisation du massive MIMO est double [2] :

- Nous permet l'amélioration des débits (augmentation) grâce au multiplexage spatiotemporel.
- Elle concentre l'énergie sur un utilisateur pour améliorer son bilan de puissance de la liaison.

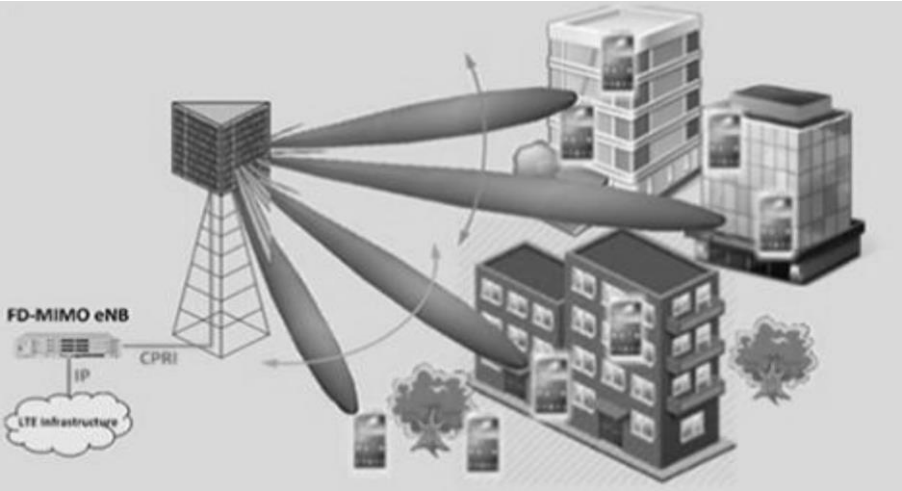

Figure I. 8 : MIMO massive. [2]

7.4. MIMO-STBC(Space Time Block Codes):

Les systèmes modernes de communication sans fil prennent en charge l'utilisation d'antennes multiples en émission et réception. Pour ces systèmes dits MIMO, le codage espace-temps en blocs ou Space Time Block Codes (STBC) est une technologie prometteuse permettant d'augmenter le débit et la fiabilité des communications sans fil .Le STBC transmet plusieurs copies d'un flux de données dans une communication sans fil, et utilise plusieurs antennes pour produire plusieurs versions de réception de données, améliorant ainsi la fiabilité de la transmission des données. Parmi ces copies de données, les copies optimales sont combinées pour fournir les données les plus fiables. Cette redondance augmente les chances d'utiliser une ou plusieurs copies des données reçues pour décoder correctement les données reçues. STBC combine toutes les copies des signaux reçus pour produire les données utiles.

7.5. Méthodes duplex :

Dans les communications mobiles, il est important de pouvoir communiquer simultanément dans les deux sens, c.-à-d. de l'émetteur vers le récepteur et l'inverse à la fois.

Pour les systèmes de téléphonie mobile précédents, ils ont utilisés des systèmes FDD ou TDD, nommée semi-duplex, nécessitant l'utilisation de deux canaux différents, un pour la liaison montante (UL) et un autre pour la liaison descendante (DL), ce système est basé sur l'utilisation de la largeur de bande totale du canal dans les deux zones du spectre. Alors la propagation entre les bandes d'émission et de réception sera également dans des instants différents (pas de communication simultanée). Alors, l'utilisation des filtres devient plus difficile et plus complexe surtout dans le cas ou plusieurs bandes sont utilisées parce que ces derniers sont importants pour augmenter la taille et le coût, ceci introduit des pertes supplémentaires dans la liaison. Deuxièmement les systèmes TDD, qui consiste a alloué des canaux temporels en fonctions de l'émission et de réception dans laquelle la liaison montante et la liaison descendante sont effectuées sur le même canal avec la même fréquence. Les canaux sont pratiquement un peu courts, Donc on sent que la transmission dans les deux directions est instantanée.

Le concept du full duplex 5G est de donner la possibilité d'émettre et de recevoir simultanément les informations, en utilisant les mêmes fréquences, en même moment et au même point. Ce duplex intégral 5G offre plusieurs avantages comme [2] **:**

- Efficacité spectrale.
- Caractéristique d'évanouissement.
- Filtrage.
- Nouvelles solution de relais.
- Coordination améliorée des interférences.

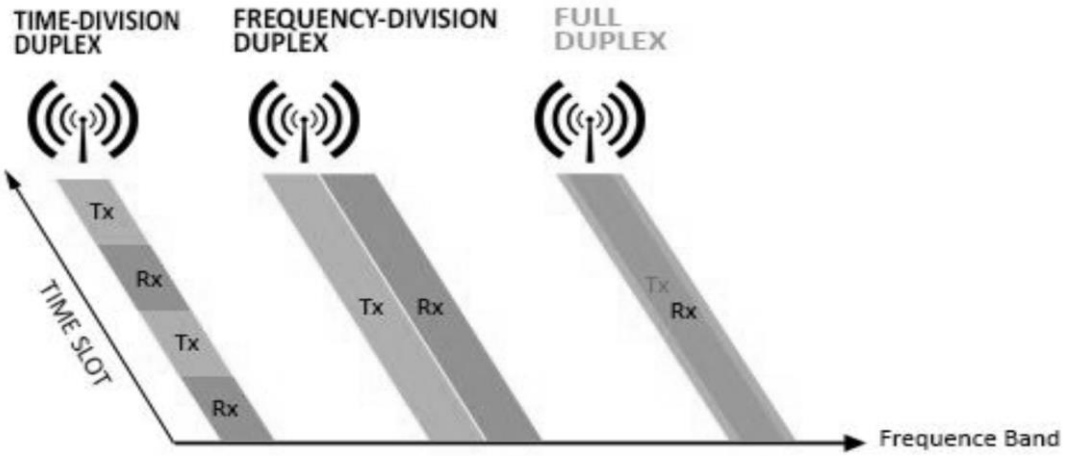

Figure I. 9 : Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD [2].

7.6. Techniques de codage :

7.6.1. Codage LDPC :

Les codes LDPC (Low-Density Parity-Check), inventés en 1963 par Gallager, sont des codes en blocs linéaires. Le nom de LDPC vient des caractéristiques de la matrice de contrôle de parité, qui est composée plus de 0 que de 1. Parmi les avantages principaux de ce type de codage est qu'ils fournissent une performance très proche de la capacité pour beaucoup de canaux différents, aussi une complexité linéaire avec le temps dans le processus du décodage. On peut décrire un code LDPC sous deux manières différentes : la description matricielle (comme tout code en blocs linéaire) ou sous la description graphique (le graphe de Tanner). Construire un code LDPC ayant de bonnes performances n'est pas vraiment difficile parce qu'il y a une grande chance pour que des codes choisis complétement au hasard soient bons. Le problème donc provient de la complexité du bloc codeur [10].

7.6.2. Codage Polaire :

Une architecture de codage fondée sur le circuit de la transformée de Fourier rapide discrète, consistant à fixer un certain nombre de bits d'entrée à 0, un algorithme de d´encodage permettant de calculer la probabilité d'un bit d'entrée connaissant les bits d'entrée précédents et les probabilités que les bits de sortie valent 1[10].

8. Réseaux futurs B5G et 6G :

Les bandes des fréquences envisagées pour les prochaines générations sont les bandes de 100 GHz à 3 THz grâce à une vaste étendue de spectre non utilisé ou exploré [11]. Les fréquences de cette bande donnent la possibilité d'exploiter de nouvelles applications révolutionnaires qui seront rendues possibles grâce à une nouvelle pensée et nouvelles idées, et les progrès des terminaux mobile, les circuits, les logiciels, et les nouvelles techniques du traitement du signal et des systèmes.

Notre mémoire décrit plusieurs défis techniques et les opportunités qui existent pour les applications de communication et de détection sans fil d'environ 100 GHz, et aussi présente des découvertes prometteuses de nouvelles approches et des nouveaux résultats qui aide au développement et à l'implémentation de la sixième génération 6G (6th Generation) de réseaux mobile et au-delà. La 5G représente déjà un grand avancement dans la réalisation de cette grande vision. Pour les générations précédentes, ils ont fait juste une simple amélioration des capacités de communication, par contre la 5G donne une nouvelle infrastructure de communication qui permet d'avoir une variété de services et surtout pour la communication à haut débit mobile utilisé dans l'industrie, communications de type machine massives, l'automatisation des voitures, etc.

En 2018, la réussite des tests et des essais intensifs a soutenu le lancement des services de la 5G en 2019, qui transformeront d'une manière fondamentale les industries actuelles, et aussi auront un impact sur les sociétés et sur la façon dont les gens se connectent aux gens et aux choses (internet des objets). La 5G rendu plusieurs services possibles qui sont caractérisés par des ensembles très divers d'indicateurs clés de performance, donc la conception d'une plate-forme unique permettant à tous de communiquer d'une manière efficace est une tâche très difficile.

La 'softwarisation' et la virtualisation des fonctionnalités réseau sont les bases de la 5G pour relever ce défi. En même temps, les besoins strictes d'améliorer le débit de données et la latence a nécessité l'adoption des communications à ondes millimétriques (mmW) [11], aussi l'exploitation de liens massifs à entrées/sorties multiples (MIMO) et le déploiement ultra dense de points d'accès radio BS (Base Station) [11], la 5G représente une percée majeure par rapport aux générations précédentes.

Dans ce sujet, les principales questions posées sont les suivantes : considérant les énormes potentiels des réseaux 5G et de leur évolution, est ce qu'il y a une motivation réelle pour penser aux réseaux 6G ? Si oui, que devrait-il y avoir dans la 6G qui ne l'est pas dans la 5G ou dans son évolution à long terme ?. Donc le débat de la 6G a en effet déjà commencé. Les centres de la recherche travaillent aujourd'hui à la définition et à l'identification des technologies clés pertinentes qui pourraient définir ce que l'on appelle «au-delà de la 5G» B5G (Beyond 5G) ou sixième génération (6G).

8.1. Perspectives techniques et technologiques :

Pour répondre aux besoins exigeants des nouveaux services, la 6G s'appuiera sur un ensemble des technologies. Nous considérons les grands points suivants :

- **Une nouvelle architecture :**

Le service quasi déterministe, comme dans la fabrication de haute précision, garantissant des contraintes physiques très strictes, comme la latence ou la consommation d'énergie, nécessite l'utilisation d'une nouvelle architecture qui combine des différentes ressources, telles que les ressources de communication et de calcul, dans un cadre unique. L'architecture est composée de [11] :

- Un nouveau plan de données, capable de s'adapter dynamiquement avec les différents modes de fonctionnement et de permettre des communications holographiques.
- Un nouveau plan de contrôle, permettant la synchronisation de flux de données simultanés pour les communications holographiques, des protocoles de routage de chemin

préférés pour établir des liens presque déterministes, pour permettre une implémentation de haute précision.

- Un nouveau plan de gestion, intégrant des capacités d'auto-configuration et d'auto-optimisation, s'appuyant sur le fort soutien de l'intelligence artificielle (IA).

- **Une introduction de l'intelligence artificielle à la périphérie du réseau :**

On s'attend à ce que les algorithmes d'IA distribués, fonctionnant éventuellement avec de fortes contraintes de retard, jouent un rôle clé dans divers aspects [11] :

- L'optimisation automatique de l'allocation des ressources du réseau, en adoptant des stratégies avancées basées sur le réseau d'apprentissage et de prédiction.
- Le développement des applications mobiles intelligentes, qui s'exécutent soit d'une façon directe sur les appareils mobiles, ou à distance grâce à des mécanismes de déchargement de calcul, qui apprennent du comportement des utilisateurs et réagi comme un assistant intelligent virtuel.

Cela sera très utile pour une implémentation efficace des communications holographiques.

- **Couverture 3D :**

La création d'une infrastructure de communication en 3D qui intègre des stations de bases terrestres et aériens et des terminaux mobiles permet d'assurer les fonctionnalités du Cloud à la demande selon les situations. Contrairement à l'idée précédente basant sur une infrastructure fixe, l'infrastructure en 3D est très efficace économiquement lorsque les demandes varient fortement dans l'espace et le temps, comme le cas où on a des événements sporadiques rassemblant beaucoup de personnes ou dans des zones reculées, comme le cas de catastrophe [11].

- **Nouvelle couche physique intégrant sous-THz :**

Les besoins des débits de données très élevés, jusqu'à Tbps, comme pour les communications holographiques, nécessite l'exploitation de la bande sub-THz et de communications en lumière visible [11]. Les stratégies de communication éco-énergétiques deviennent de plus en plus importantes, en particulier l'implémentation généralisée de l'internet des objets, avec une multitude de minuscules capteurs.

- **Mécanismes de sécurité distribués :**

L'énorme échange de données pour permettre une utilisation généralisée des techniques d'intelligence artificiel, pose un grand défi en termes de sécurité, de confidentialité et de confiance, qui doit être correctement traité par les réseaux de la 6G. Pour obtenir une fusion efficace

de l'intelligence artificielle et de la confidentialité des techniques de cryptographie innovantes devraient être utilisées.

On suppose qu'un utilisateur mobile veut exécuter un algorithme d'apprentissage automatique à distance sur ses propres données, il pourrait utiliser un type de cryptage au lieu d'envoyer les données telles qu'elle est (original). L'utilisateur pourrait envoyer des données cryptées, laisser l'algorithme d'apprentissage automatique à distance s'exécuter sur le données chiffrées, et toujours être en mesure de récupérer la sortie souhaitée, les schémas existants ne sont pas encore pratiques en raison de la grande complexité de calcul, l'authentification décentralisée est un autre problème clé, en particulier pour le scénario IoT [11].

D'autres techniques qui peuvent être utilisées pour les réseaux 6 G, on cite [12] :

- **Progrès dans l'estimation massive des canaux MIMO et adaptatifs en temps quasi réel :**
  - Propriétés des canaux et techniques d'apprentissage des canaux efficaces.
  - Traitement des imperfections telles que les effets de couplage d'antenne, la contamination du pilote.
- **Nouvelle attribution du spectre et réaménagement du spectre :**
  - Collaboration synergique entre non licenciés et bandes sous licence.
  - Communication dans la gamme THz.
- **Progrès des principes fondamentaux des communications :**
  - Modélisation de la propagation des canaux mmWave et THz.
  - La connectivité à courte portée est un élément crucial de D2D (Device To Device connectivity).
  - Traitement adaptatif des signaux et algorithmes de formation de faisceaux.
  - Gestion des ressources radio.

8.2. Objectifs et services attendus :

La **figure I.10** représente les exigences de mise à jour de la technologie sans fil par l'évolution de la 5G vers la 6G [13]. Aussi des exigences plus élevées de la 5G et des nouvelles exigences qui n'étaient pas prises en considération dans la 5G ont été ajoutées et améliorées. Comme pour la 5G, toutes les exigences ne doivent pas être satisfaites en même temps, mais de nouvelles combinaisons d'exigences seront nécessaires pour les futurs nouveaux cas d'utilisation.

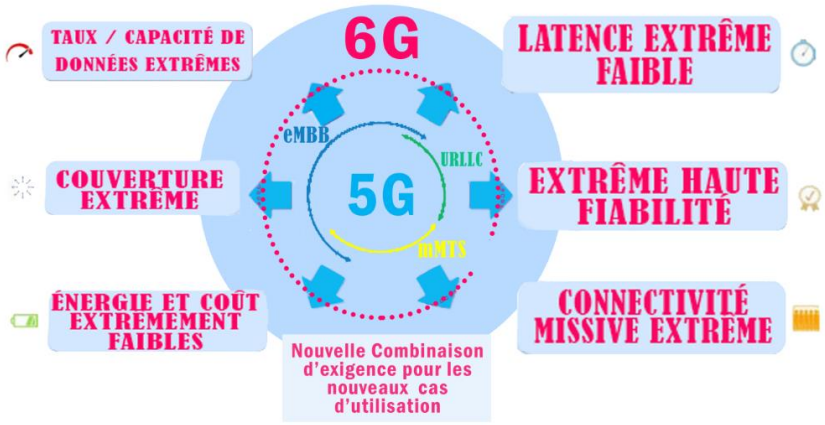

Figure I. 10: Exigences pour la technologie sans fil 6G [13].

- **Communications à très haute vitesse et haute capacité :**

Grâce à des nouvelles améliorations de la vitesse de communication et grâce à la technologie sans fil avec des vitesses extrêmement élevées dépassant 100 Gbit/s, ces nouveaux services d'expérience seront partagés entre plusieurs utilisateurs en temps réel. D'autre part, compte tenu des tendances telles que les cas d'utilisation pour l'industrie et la fusion cyber-physique, divers types d'informations en temps réel devront être transmises au Cloud et à l'IA qui sont des «cerveaux», de sorte que l'amélioration des performances de liaison montante devient plus importante [13].

- **Extension de couverture extrême :**

Dans le futur, nous ciblons le développement d'une "extension de couverture extrême" qui peut être utilisée dans tous les endroits tel que le ciel, la mer et l'espace, qui ne sont pas couverts par les systèmes de communication mobile actuels et précédents. Grâce à cela, une nouvelle expansion des environnements d'activité pour les humains et les machines et la création de nouvelles industries sont attendues. Cette expansion devrait être appliquée à de futurs cas d'utilisation comme les voitures volantes et les voyages dans l'espace.

- **Consommation électrique extrêmement faible et réduction des coûts :**

Comme pour la 5G, la faible consommation d'énergie et la réduction des coûts pour les périphériques réseau et terminaux seront des exigences importantes dans la 6G du point de vue commercial et environnemental. À l'avenir, y compris la 6G, un monde dans lequel les appareils n'ont pas besoin d'être chargés, le développement d'une technologie d'alimentation électrique utilisant des signaux radio est également prévu.

- **Latence extrêmement faible :**

Les communications sans fil qui connectent l'intelligence artificiel et les appareils sont similaires au système nerveux humain qui transmet des informations, donc une faible latence

de bout en bout stable (D2D Device To Device) semble être une exigence de base. Afin de mettre à jour les applications en temps réel et d'être hautement interactifs, une latence D2D d'environ 1 ms ou moins est considérée comme une valeur cible pour la 6G [13], par exemple, un magasin automatisé par robot, des services interactifs qui répondent attentivement à un humain en observant l'expression du visage d'un client peuvent être actualisés.

- **Communication extrêmement fiable :**

D'après l'évolution de la 5G, la 6G ne doit pas juste assurer une meilleure communication mais aussi une communication d'assurance qualité, donc, la fiabilité de la communication mobile est une exigence importante pour de nombreux cas d'utilisation industrielle tels que le contrôle à distance et l'automatisation d'usine. Alors la 6G devrait atteindre un niveau de fiabilité et de sécurité supérieur au niveau de la 5G, avec l'utilisation des robots et des drones et l'extension de la couverture radio vers le ciel, etc. Il est possible que des communications seront nécessaires non seulement dans des domaines limités tels que les usines, mais aussi dans des zones plus vastes, et une actualisation des communications hautement fiables dans diverses scènes est également attendue.

- **Connectivité et détection extrêmement massives :**

La connexion d'un grand nombre d'appareils qui sont environ 10 fois de plus que les exigences 5G (10 millions d'appareils par km carré) est une grande exigence pour les précédentes générations et les prochaines. Le réseau de communication mobile devrait évoluer pour avoir des fonctions de détection du monde réel telles que le positionnement et la détection d'objets à l'aide d'ondes radio. En particulier, l'étude du positionnement a déjà avancé pour la 5G, et il est prévu qu'un positionnement ultra-précis avec une erreur de plusieurs centimètres ou moins puisse être atteint dans certains environnements [13].

9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons souligné certains des nouveaux services et leurs catalyseurs technologiques qui devraient représenter le cœur des réseaux de prochaine génération (B5G et 6G). Aussi nous avons cité quelques techniques et technologies candidates pour la nouvelle génération, et les buts visés par les chercheurs pour améliorer la 5G pour offrir des nouveaux services aux utilisateurs.

Nous avons aussi vu l'architecture d'un réseau 5G et ces composants principaux, nous avons parlé de la normalisation de la 5G et les l'évolution des différents 'Releases', la technique MIMO et le MIMO massif et ces grand avantages pour l'amélioration de la capacité de la liaison de transmission et aussi sa qualité, et les différents type de codage.

A la fin, nous avons vu les prochains réseaux mobiles (B5G), les ambitions que les chercheurs veulent atteindre, les inconvénients majeurs face à eux, ainsi que les exigences fondamentales pour la mise en œuvre.

CHAPITRE 02 :

TECHNIQUES DE MODULATION 5GNR, B5G, 6G

1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les modulations 5GNR, B5G et 6G en commençant par une définition des formes d'onde candidates pour la nouvelle génération 5GNR, FBMC, UFMC, GFDM, DFT-S-OFDM, CP-OFDM et leurs principes de fonctionnement, puis nous allons citer les propriétés de chaque technique et les différents avantages et inconvénients.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous allons voir les techniques de modulation pour la B5G et la 6G, en particulier la techniques NOMA (Non Orthogonal Multiple Access) qui n'a pas été utilisée dans la 5G, et faire une comparaison entre NOMA et OMA (Orthogonal Multiple Access).

2. Modulations de nouvelle génération :

2.1. Technique de modulation (OFDM) :

A la fin des années 50, les modulations multi-porteuses ont été introduites, la première utilisation était dans le domaine militaire, pour les systèmes de communications militaires hautes fréquences. Après quelques années, elle a été améliorée avec l'apparition du concept des signaux orthogonaux à bande limitée, un concept que l'on appellera après "Orthogonal Frequency Division Multiplexing " (OFDM). L'implémentation d'OFDM à l'époque consistait à utiliser des filtres de Nyquist [14].

A cause de la complexité de générer des bancs de filtres sinusoïdaux, l'OFDM n'a pas été le premier choix pour l'industriel civil. Après 20 ans, et avec l'utilisation de la Transformée de Fourier Discrète Inverse (TFDI) à l'émission et de la TFD au niveau du récepteur, le schéma de modulation/démodulation a été simplifié, ce qui rend facile son implémentation numérique. Dans le milieu des années 1980, la technique OFDM a été bien développée dans les domaines industriels civils tels que le projet de radiodiffusion numérique DAB (Digital Audio Broadcasting).

2.1.1. Le système OFDM :

La technique OFDM (multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence) est une solution très efficace pour la lutte contre les effets des trajets multiples et les canaux sélectifs en fréquence, elle est une technique de transmission de donnée analogique. L'OFDM consiste à diviser la bande passante du système en un grand nombre de porteuse individuelles appelés sous-porteuse, on dit que les sous-porteuse sont orthogonaux car pour une transmission idéale, un symbole transmis sur une sous porteuse peut être démodulé sans interférence avec les sous porteuse voisines. Pour la mise en œuvre ou l'implémentation numérique de l'OFDM, les systèmes transmettent les données en blocs : le flux original de donnée de débit R est multiplexé

en *N* flux parallèles de débit *R/N*. Donc on parle d'un multiplexage fréquentiel car les données sont transmises sur *N* canaux différents en même temps.

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

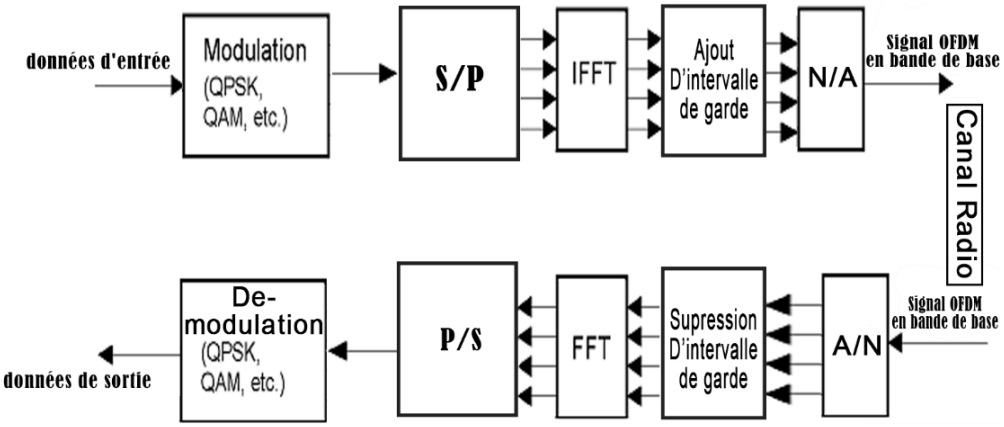

Figure II. 1 : Schéma bloc simplifié d'un émetteur-récepteur OFDM [15].

Les symboles de train de bits qui traversent la modulation QAM sont envoyés par le convertisseur série / parallèle où les bits modulés seraient disposés de telle manière qu'ils seraient alimentés à l'entrée du bloc IFFT. On obtiendra en sortie des signaux modulés et multiplexés, ces derniers sont dans le domaine temporel. Cependant, pour éviter complètement les ISI et ICI, nous ajoutons un intervalle de garde entre les symboles OFDM voisins. La séquence résultante passera par un convertisseur numérique-analogique qui sera transmis via le canal radio mobile. La sortie du canal radio est obtenue après une convolution du signal de sortie avec la réponse impulsionnelle du canal et en ajoutant le bruit. Le signal reçu passera par un convertisseur analogique/numérique (CAN). Etant donné que l'ISI n'existe que dans les premiers échantillons de la séquence reçue, ces échantillons sont supprimés avant la démodulation multi-porteuse. La partie des échantillons libre d'ISI est démodulée par l'OFDM inversée à l'aide de la FTT. En sortie, le flux de données initial est récupéré après une conversion série parallèle [1].

2.1.2. Principe et fonctionnement de l'OFDM :

L'OFDM consiste à diviser la bande de fréquences en un nombre de sous-canaux égale à N (ou sous porteuses) orthogonaux et uniformes, c.-à-d. que les symboles à transmettre vont être répartie sur un grand nombre de porteuse a débit faible (**figure II.2)**, contrairement des

systèmes conventionnels qui transmettent les symboles en série, c.-à-d. que chaque symbole occupe toute la bande passante disponible.

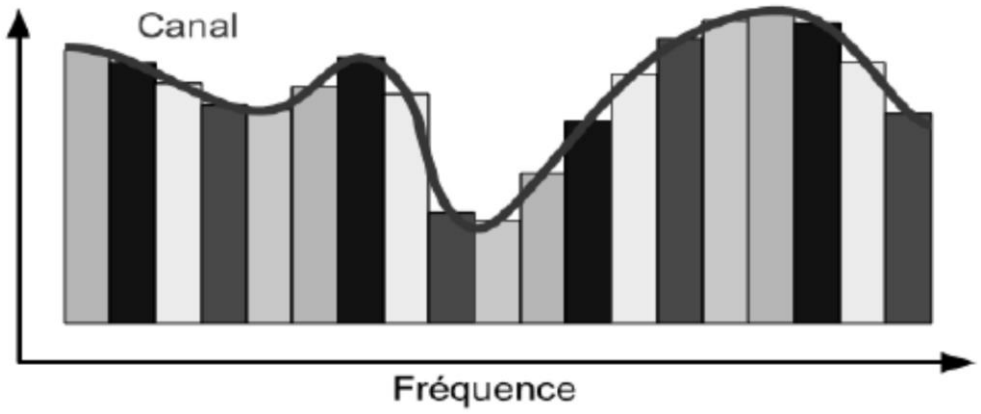

Figure II. 2: Effet de canal sur la technique OFDM [2].

2.2. Techniques de modulation pour les liaisons descendantes (Downlink) :

Le multiplexage orthogonal de division de fréquence était un excellent choix de forme d'onde pour 4G LTE. Il offre une excellente efficacité spectrale, il peut être traité et manipulé avec les niveaux de traitement réalisables dans les combinés mobiles actuels, et il fonctionne bien avec un flux de données à haute vitesse occupant de grandes bandes passantes. Cela fonctionne bien en cas de décoloration sélective.

Avec l'évolution des capacités de traitement qui seront disponibles en 2020, lorsque la 5G devrait faire ses débuts, d'autres formes d'onde peuvent être envisagées. L'utilisation de nouvelles formes d'onde pour la technologie 5G présente plusieurs avantages. L'OFDM nécessite l'utilisation d'un préfixe cyclique, ce qui occupe de l'espace dans les flux de données.

L'une des principales exigences est la disponibilité de la puissance de traitement. En tant que telles, les nouvelles formes d'onde 5G qui nécessitent une puissance de traitement supplémentaire, mais qui sont capables de fournir des avantages supplémentaires sont toujours viables. Les téléchargements vidéo à haute vitesse, les jeux, les communications de voiture à voiture, les communications cellulaires générales, les communications IoT / M2M (Machine To Machine) sont les applications potentielles pour les communications mobiles 5G et imposent toutes la forme d'un schéma de forme d'onde 5G. Certaines des exigences clés qui doivent être prises en charge par le schéma de modulation et la forme d'onde globale comprennent [6] :

- Gérer les signaux à haut débit et à large bande passante.
- Fournir des transmissions à faible latence pour les quantités de données longues et courtes.

- Possibilité de basculer rapidement entre la liaison montante et la liaison descendante pour les systèmes TDD susceptibles d'être utilisés.
- Permettre des communications éco énergétiques en réduisant la durée d'exécution des appareils à faible débit.

La société « Ericsson Research » a présenté cette évaluation de la forme d'onde au sein du 3GPP en avril 2016 (la première réunion du 3GPP RAN 1 pour la nouvelle radio 5G), et a proposé CP-OFDM pour la nouvelle radio 5G. En août 2016, le 3GPP a accepté d'adopter le CP-OFDM pour la liaison descendante pour la nouvelle radio 5G. Par conséquent, le CP-OFDM joue un rôle plus important dans la nouvelle radio 5G par rapport à la 4G LTE.

2.2.1. Préfixe cyclique standard :

Pour éviter les interférences inter symboles dues à des longueurs différentes dans plusieurs trajets de transmission, le préfixe cyclique est transmis avant chaque symbole OFDM. Pour les environnements difficiles avec une variété de voies de transport, un préfixe cyclique plus long de 16.67µs (microsecondes) a également été spécifié [16].

L'inconvénient de l'utilisation d'un préfixe cyclique plus long est que le débit de données de l'utilisateur est plus bas car la durée du symbole reste la même, et donc moins de symboles peuvent être envoyés par intervalle de temps.

2.2.2. CP-OFDM en liaison descendante (Downlink) :

Les chercheurs ont étudié différentes formes d'ondes multi-porteuses et les ont proposées pour l'accès radio 5G. Toutefois, étant donné que les applications OFDM sont bien adaptées au fonctionnement TDD et aux applications sensibles au temps et leur mise en œuvre commerciale s'étant révélée un succès grâce à leur capacité à traiter de manière efficace des signaux de bande passante toujours plus large. La technologie OFDM à préfixe cyclique (CP-OFDM) est devenue le choix préféré pour NR [16].

Les avantages principaux du CP-OFDM qui en font une technologie adaptée à la mise en œuvre 5G sont les suivants [16] :

2.2.2.1. Efficacité spectrale élevée : Cette caractéristique essentielle de l'accès OFDM pour de répondre à vos besoins de vitesse extrême en particulier pour les liaisons reliant. En outre, dans les applications futures surtout dans des environnements urbains denses. L'efficacité spectrale élevée contribuera à répondre aux limitations de capacité qui se posent lorsque plusieurs utilisateurs transmettent périodiquement et de manière asynchrone.

2.2.2.2. Résistance au bruit de phase : Comme la fréquence de fonctionnement augmente (et avec elle le bruit de phase de l'oscillateur), le système OFDM peut réduire l'interférence inter symbole celle a causé par le bruit de phase en appliquant un espacement de sous-porteuses OFDM plus grand.

2.2.2.3. Simplicité de l'émetteur-récepteur : Les émetteurs et les récepteurs OFDM sont plus simples à mettre en œuvre par rapport à d'autres formes d'ondes envisagées par les concepteurs pour les déploiements 5G. Travaillant avec des conceptions OFDM depuis plusieurs années, l'industrie du sans-fil sait que leur fonctionnement facilement compréhensible et leur déploiement commercial étendu peut permettre aux appareils 5G d'effectuer un traitement puissant de la bande de base OFDM à des prix inférieurs.

2.2.2.4. Résistance à la sélectivité en temps et en fréquence du canal : Le système OFDM peut réaliser une transmission entre appareils dans un intervalle plus court que le temps de cohérence du canal et permettre des scénarios hauts mobilité (haute vitesse) et haut débit tout en réduisant les effets de la sélectivité en temps, peut réaliser avec un choix approprié d'espacement de sous-porteuses et de fréquence de fonctionnement. De plus, grâce aux techniques d'estimation et d'égalisation de canal, les formes d'ondes OFDM présentent d'une bonne résistance face aux canaux sélectifs en fréquence.

2.2.2.5. Résistance aux erreurs de temporisation et aux interférences inter symboles : Grâce au préfixe cyclique (CP), le récepteur est mieux en mesure de résister aux erreurs de synchronisation et d'empêcher le symbole OFDM précédent de parasiter le symbole OFDM en cours de réception. Le préfixe cyclique (CP) se trouvant au début de chaque symbole OFDM contient une copie de la fin du symbole OFDM. Lorsque le récepteur démodule le signal, il agit sur la partie du symbole située après le CP. Ce mécanisme empêche l'apparition d'interférences inter symboles entre des symboles OFDM adjacents**.**

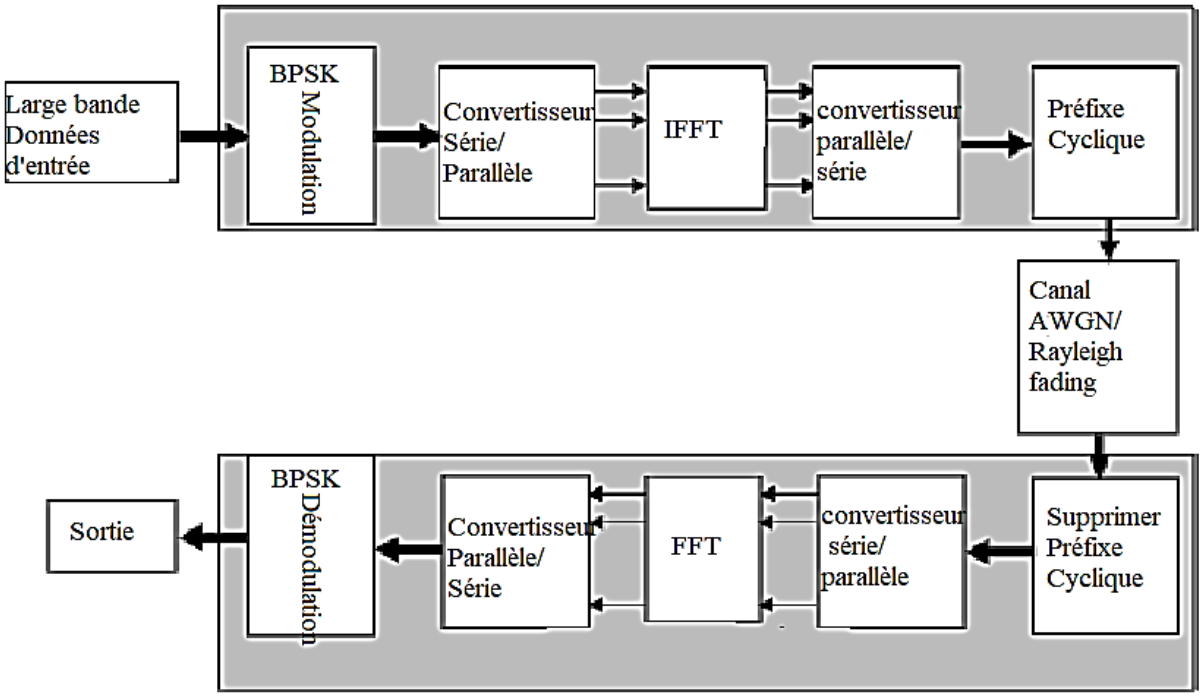

Figure II. 3 : Système OFDM avec préfix cyclique [17].

Le **tableau II.1** Représente l'évaluation de la technique CP-OFDM pour la liaison montante et la descendante.

Tableau II. 1 Évaluation du CP-OFDM pour différents types de liaisons [18].

Indicateur de performance	Evaluation	DL	UL
Efficacité spectrale	Haute	Haute	Haute
Compatibilité MIMO	Haute	Très haute	Très Haute
Localisation temporelle	Haute	Haute	Haute
Complexité de l'émetteur-récepteur	Faible	Très haute	Haute
Souplesse/évolutivité	Haute	Haute	Haute
Robustesse au canal sélectif en fréquence	Haute	Haute	Haute
Robustesse au canal sélectif en temps	Moyenne	Haute	Haute
Robustesse au bruit de phase	Moyenne	Haute	Haute
Robustesse aux erreurs de synchronisation	Moyenne	Moyenne	Moyenne
PAPR	Haute (peut être réduit)	Faible	Haute
Localisation de fréquence	Faible (peut être amélioré)	Moyenne	Haute

Pour la normalisation 5G, la « Ericsson Research » a effectué une évaluation approfondie des formes d'onde. Nous avons réalisé que le CP-OFDM était en fait le candidat le plus approprié pour NR. Le CP-OFDM se classe au premier rang des indicateurs de performance les plus importants (compatibilité avec les technologies multi-antennes, efficacité spectrale élevée et faible complexité de mise en œuvre).

D'outre, CP-OFDM est bien localisé dans le domaine du temps, ce qui est important pour les applications critiques de latence et les déploiements TDD. Il est également plus robuste au bruit de phase de l'oscillateur et à l'effet Doppler que les autres formes d'onde à multi-porteuses. La robustesse au bruit de phase est essentielle à l'exploitation des fréquences porteuses élevées (bande millimétrique).

2.2.3. La modulation QAM :

La modulation QAM est caractérisée par :

- Directement sur le canal : on parle alors de transmission en bande de base.
- 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.
- La modulation est appelée de haut niveau pour des indices au-dessus du 64 [19].

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 [19].

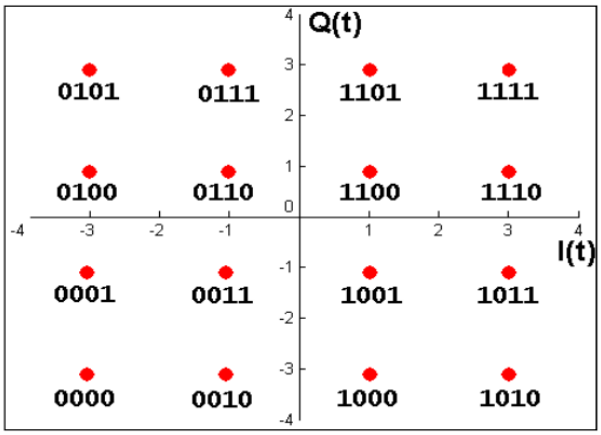

Figure II. 4 Exemple de constellation pour une modulation en 16-QAM [20].

Tableau II. 2 Illustration du gain apporté par la modulation QAM [20].

N	Indice M	Modulation	Débit binaire	Efficacité Spectrale
1	2	BPSK	D	ŋ
2	4	QPSK	2D	2 ŋ
4	16	16-QAM	4D	4 ŋ
6	64	64-QAM	6D	6 ŋ
8	256	256-QAM	8D	8 ŋ
10	1024	1024-QAM	10D	10 ŋ

Ou D est le débit et ŋ et l'efficacité spectrale.

2.3. Techniques de modulation pour les Liaisons montantes (Uplink) :

La transmission d'un grand nombre de sous-porteuses augmente le PAPR et réduit l'efficacité énergétique d'émetteur. L'OFDM est donc peu adaptée à une transmission par un terminal portable alimenté sur batterie. On peut utiliser dans le cas du 5G, une variante de l'OFDM appelé DFT-S-OFDM (Direct Fourier Transform Spread), ou SC-FDMA (Single Carrier FDMA). Dans les liaisons montantes nous avons utilisé une forme appelée DFT-S-OFDM (Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence à étalement par transformée de Fourier discrète).

Le rapport valeur de crête sur valeur moyenne (PAPR) est plus élevé pour des formes d'ondes OFDM, c'est l'un des principaux inconvénients pour les formes d'ondes OFDM. Les amplificateurs de puissance de sortie RF situés sur les émetteurs voient donc leur efficacité réduite et ne parviennent pas à réduire de manière appropriée les effets non linéaires d'ordre élevé. Pour les UE tels que les smartphones, la préservation de la durée de vie de la batterie et l'efficacité énergétique sont des aspects importants. L'amplificateur de puissance RF qui transmet le signal à la station de base consomme le plus de puissance au niveau de l'appareil mobile [16].

Les concepteurs système ont donc besoin d'un type de forme d'onde permettant un fonctionnement hautement efficace de l'amplificateur tout en répondant aux exigences spectrales des applications 5G. Bien que les formes d'ondes mono-porteuses aient un PAPR très faible et permettent un fonctionnement plus efficace des amplificateurs de puissance, elles n'offrent pas une efficacité spectrale élevée et une utilisation dynamique du spectre, par ailleurs, leur compatibilité avec les systèmes MIMO est moindre et elles sont sensibles aux canaux sélectifs en fréquence [16].

Grâce à la forme d'onde DFT-S-OFDM, l'émetteur module toutes les sous-porteuses avec les mêmes données. La **figure II.5** partie droite montre que chaque groupe de sous-porteuses utilise la même quantité de largeur de bande que le symbole CP-OFDM représenté à gauche. Donc le modulateur DFT-S-OFDM mappe les mêmes données sur toutes les sous-porteuses, mais pendant une durée plus courte.

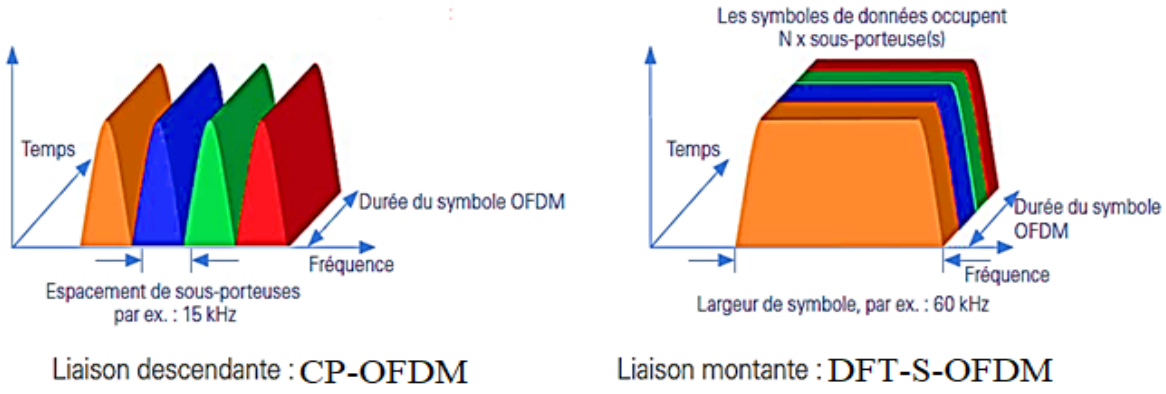

Figure II. 5 CP-OFDM par rapport à DFT-S-OFDM [16].

Avec la forme d'onde DFT-S-OFDM, l'UE prend en charge les schémas de modulation suivants [16] :

- π/2-BPSK.
- 16 QAM.
- 64 QAM.
- 256 QAM.

2.3.1. Principe du DFT-s-OFDM :

DFT-s-OFDM ou SC-FDMA, est une technique de transmission très proche de la modulation OFDMA. Cette technique consiste à répartir sur un grand nombre de porteuses et non pas directement les symboles source comme en OFDMA, mais leur représentation fréquentielle, après les avoir réparties sur la bande du système selon un certain mode que nous présenterons dans l'émetteur dans la **figure II.6** [21].

L'OFDM n'est pas adaptée à une transmission d'un terminal portable alimenté par batterie. Pour remédier à ce défaut, le DFT-s-OFDM va alors être utilisée. Elle consiste à modifier l'étage d'entrée de l'émetteur OFDM et l'étage de sortie du récepteur OFDM.

Dans l'émetteur, on considère *M* symboles temporels qui seront transformés en *M* symboles fréquentiels via une DFT. Des sous porteuses nulles (symboles fréquentiels nuls) sont ajoutés afin de constituer une puissance de 2 (*N* symboles). Les étages suivants sont identiques à l'OFDM pur [22] :

- FFT inverse afin d'obtenir des symboles temporels.
- Passage de symboles parallèles en symboles série.
- Ajout d'un préfixe cyclique.
- Conversion numérique-analogique.
- Transposition en fréquence.

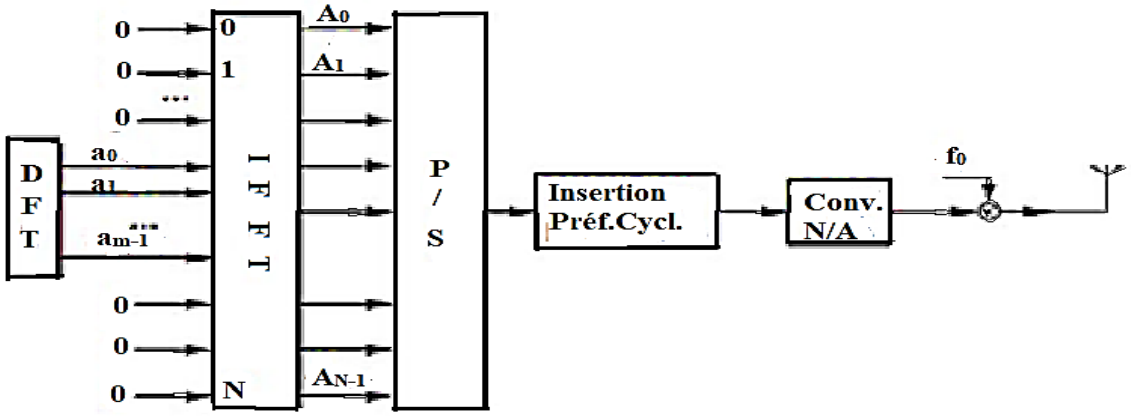

Figure II. 6 Principe d'un émetteur DFTS-OFDM[22].

Une DFT inverse et le passage de symboles parallèles en symboles série, permettront de retourner les *M* symboles temporels de l'émission.

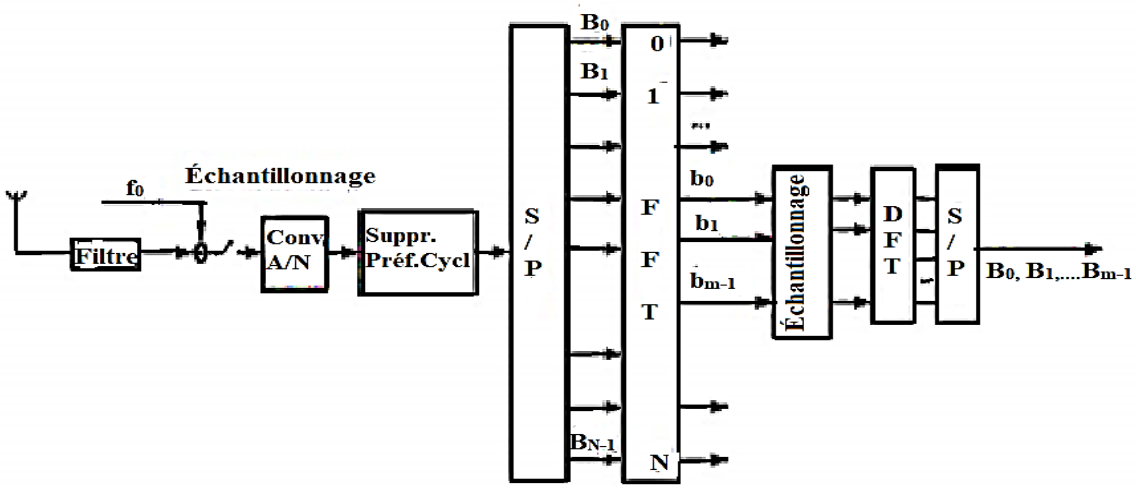

Figure II. 7 Principe d'un récepteur DFTS-OFDM[22].

2.3.2. Les Avantages et les Inconvénients de la forme d'onde DFT-s-OFDM :

La DFT-s-OFDM est caractérisée par [23] :

- **Avantages :**
  - ✓ Mise en œuvre efficace à l'aide de FFT / IFFT.

- ✓ Attribution d'un spectre flexible pour différents utilisateurs.
- ✓ Faible PAPR et BER.

- **Inconvénients :**
  - ✓ Mauvaise localisation des fréquences due au filtrage (filtre rectangulaire).

2.4. Technique de modulation GFDM :

Actuellement, la demande croissante de dispositifs intelligents avec une faible latence d'aller-retour et une fiabilité élevée apparaît comme un facteur décisif pour la mise en œuvre des futurs systèmes de communication. Les réseaux cellulaires de la 5G à venir doivent être en mesure de faire face à un nombre élevé d'appareils connectés ainsi qu'à une augmentation significative du volume de données.

Les principaux scénarios pour les réseaux cellulaires 5G sont la communication de type machine (MTC), internet tactile et le réseau régional sans fil (WRAN). En particulier, l'introduction du MTC caractérisé par des dispositifs à accès aléatoire sporadique peut être réalisée au moyen de techniques radios cognitives, où la flexibilité dans la mise en forme et la structuration du signal transmis est un aspect clé. Dans le cas du scénario Tactile Internet, une latence ultra-faible et une fiabilité de courte durée sont des exigences clés. Dans le scénario du WRAN (Wireless Regional Area Network), une plus grande zone de couverture et un très long retard de propagation sont des défis majeurs.

GFDM est une solution prometteuse pour la couche PHY 5G car sa flexibilité permet de répondre à différentes exigences. Les filtres prototype utilisés dans cette technique affectent les émissions hors bande [24]. Nous allons présenter dans cette partie la GFDM et les techniques utilisées pour la réduction de l'OOB (Out Of Band emission).

2.4.1. Principe de GFDM :

La technique de modulation GFDM ou multiplexage par répartition en fréquence généralisé, est un nouveau concept de transmission multi-porteuse flexible qui introduit des degrés de liberté supplémentaires par rapport au multiplexage OFDM traditionnel. Dans GFDM, le rayonnement hors bande du signal d'émission est contrôlé par un filtre de mise en forme d'impulsions réglable qui est appliqué aux sous-porteuses individuelles.

GFDM est une technique de transmission multi-porteuse dynamique similaire à l'OFDM. La seule différence entre les deux est que les porteuses ne sont pas mutuellement orthogonales [25]. La GFDM offre un meilleur contrôle d'émissions hors bande et une puissance réduite sur puissance moyenne.

De plus, une structure de données bidimensionnelle (2D) est introduite pour regrouper des symboles de données sur plusieurs sous-porteuses et périodes de temps en blocs. La taille des blocs est variable et permet de mettre en œuvre des filtres longs diminuant le nombre total de sous-porteuses. Le traitement de ces blocs est basé sur des filtres numériques qui préservent les propriétés circulaires dans le domaine fréquentiel et temporel.

De la même manière à OFDM, la GFDM utilise un préfixe cyclique pour combattre l'interférence entre symboles dans un canal à trajets multiples. L'un des inconvénients de cette technique est le filtrage de sous-porteuse qui peut entraîner des sous-porteuses non orthogonales, et il peut se produire à la fois une interférence entre symboles et une interférence entre porteuses [27]. Les **figures II.8** et **II.9** montre deux diagrammes de bloc l'un présente un émetteur GFDM et l'autre un modulateur GFDM détaillé.

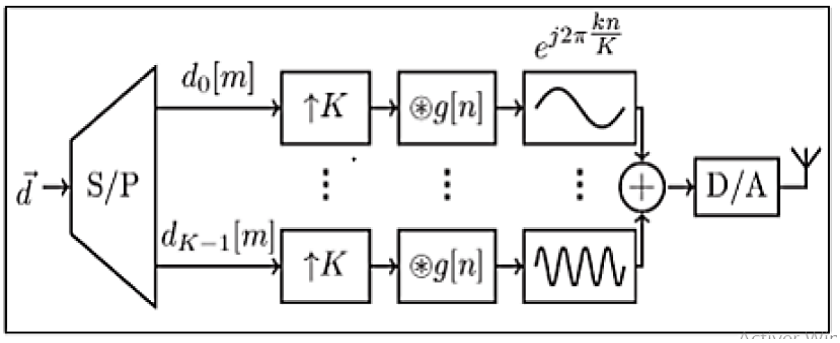

Figure II. 8 Diagramme de bloc de l'émetteur GFDM [26].

Le vecteur d⟶ résultant désigne un bloc de données contenant des éléments qui peuvent être décomposés en *K* sous-porteuses et *M* sous-symboles, le nombre total de symboles est N = KM, le g[n] est la fonction d'un filtre prototype.

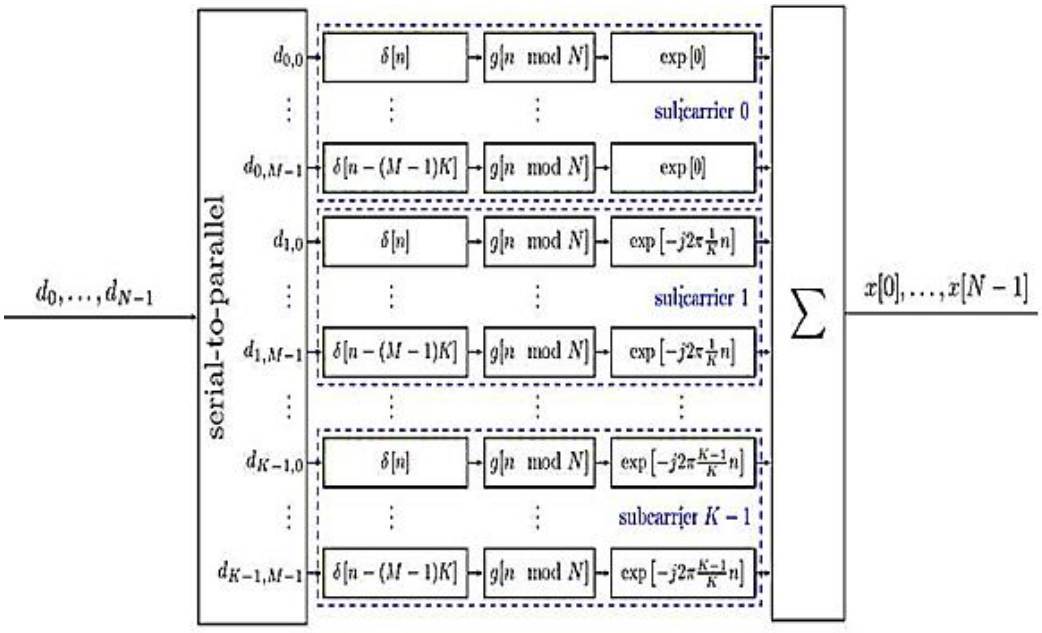

Figure II. 9 Diagramme de bloc de modulateur GFDM détaillé [27].

2.4.2. Les caractéristiques de GFDM :

La nature flexible du GFDM rend cette forme d'onde adaptée à un futur système de communication 5G. Les caractéristiques des techniques GFDM sont répertoriées comme suit [26] :

- Débits plus élevés.
- Faible consommation d'énergie.
- Réduire l'OOB.
- Haute efficacité spectrale et réponse à court portée.
- Une bonne localisation en fréquence de l'impulsion d'émission rend le système robuste contre la dispersion de fréquence (effet Doppler).
- Une bonne localisation de l'impulsion fournit une robustesse contre la dispersion du temps.
- PAPR, le taux de puissance moyen maximal pour GFDM est inférieur à celui de l'OFDM.
- Modulation multi-porteuse flexible avec une allocation de spectre dynamique qui peut être obtenues sans interférence sévère dans le service ou d'autres utilisateurs.
- Petit coût supplémentaire en ajoutant un seul CP pour tout le bloc qui contient plusieurs sous symboles pour réduire la consommation d'énergie, et réaliser la diversité de transmission et de réception, pour réduire la complexité car GFDM est une forme d'onde non orthogonale.

2.4.3. Caractéristiques OOB :

La GFDM est une technique de modulation multi-porteuse soumise à l'interface radio. Contrairement à l'OFDM, le GFDM offre plus de flexibilité et facilite la fragmentation du spectre et fournit également des émissions OOB et un PAPR plus faible. Le GFDM est basé sur le positionnement temps-fréquence qui offre la robustesse contre les effets doppler en raison de sa bonne localisation de fréquence inhérente. De plus, il offre une robustesse contre la dispersion temporelle en raison de sa bonne localisation inhérente en temps [27].

Le GFDM est une technique de transmission par blocs dans laquelle chaque bloc GFDM est constitué de B sous-porteuses et chaque sous-porteuse porte un sous-symbole J, chaque sous-porteuse est filtrée individuellement à l'aide d'un filtre prototype pour fournir une faible OOB [28]. Le filtrage basé sur les sous-porteuses affaiblira l'OOB mais à un certain niveau, pour atténuer considérablement le rayonnement OOB, un fenêtrage de sous-porteuses basées

sur des blocs est utilisé pour cela, chaque bloc GFDM étant pincé des deux côtés pour fournir une faible OOB. Une fenêtre appropriée doit être choisie, pour fournir un faible OOB et moins d'interférences entre symboles.

2.4.4. Comparaison entre la structure OFDM et GFDM :

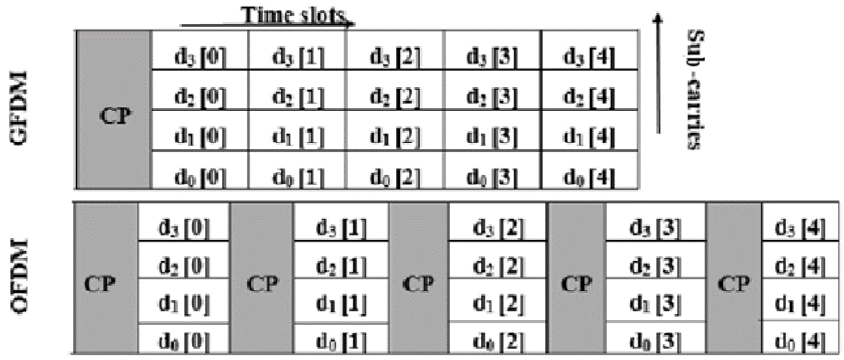

Figure II. 10 Différentes structures de blocs dans OFDM et GFDM [28].

La figure II. 10 représente une comparaison entre la OFDM et GFDM par rapport à l'utilisation du préfix cyclique, l'OFDM utilise un CP pour chaque sous-porteuse, par contre la GFDM utilise un seule CP pour toutes les sous-porteuses. L'OFDM souffre de sa faible efficacité énergétique due à l'utilisation du CP ainsi que de ses émissions élevées OOB.

2.5. Technique de modulation FBMC :

2.5.1. Définition :

FBMC est une modification du multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM). C'est une technique de modulation permettant de surmonter les interférences ICI et ISI, qui représente un défi majeur pour les systèmes de réseau.

En OFDM, les préfixes cycliques sont utilisés pour la robustesse du signal, mais l'utilisation du préfixe cyclique par multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence présente certains inconvénients. Pour surmonter ces inconvénients, on utilise le FBMC. Il fournit la bande passante efficace, pour gérer cette situation, des techniques de modulation sont utilisées et d'autres nouvelles méthodes seront utilisées à l'avenir, l'un d'eux est Filter Bank MultiCarrier qui offre une efficacité élevée comparée à l'OFDM [29].

2.5.2. Principe de fonctionnement :

Son principe de base est de diviser le spectre de fréquence en sous-porteuses multiples très étroites qui sont filtrées individuellement, elle est capable de fournir un haut niveau d'efficacité spectrale. La technique FBMC surmonte les limites de l'OFDM en ajoutant des filtres de mise en forme d'impulsions généralisés qui fournissent un sous-canal bien défini dans les domaines temporel et fréquentiel. Par conséquent, les systèmes FBMC contiennent plus de signaux de confinement spectral et offrent une utilisation plus efficace des ressources radio, car la production de CP n'est pas nécessaire.

Sur la **figure II.11**, nous montrons que les bancs de filtres des deux côté émetteur et récepteur sont constitués d'un ensemble de N filtres qui traite N signaux d'entrée pour donner N sorties. Si les entrées de ces N filtres sont associées, le système peut être mesuré de manière analogue en tant qu'analyseur du signal d'entrée en fonction des caractéristiques de chaque filtre.

Sur la **figure II.11,** le filtre du coté émetteur est appelé filtres de synthèse et le filtre du coté récepteur est appelé filtres d'analyse, on observe également que le signal d'entrée est d'abord converti de sa forme série en forme parallèle afin qu'il puisse passer à travers le banc de filtres de synthèse, puis il est reconverti en forme série après être sorti du banc de synthèse. Ensuite, il peut être vu sous la même figure que du côté du récepteur après que le signal ait traversé le canal, il est converti en forme parallèle par un convertisseur série-parallèle et passe à travers un groupe de filtres d'analyse. Enfin, lorsque le signal de sortie est obtenu, il est reconverti au format série par un convertisseur parallèle à série.

Par conséquent, la configuration de synthèse-analyse illustrée à la **figure II.11** est appelée trans-mulitplexer ou TMUX (Terminal Multiplexer), et est appliquée dans les systèmes de communication MC(Multi-Carriers) [30].

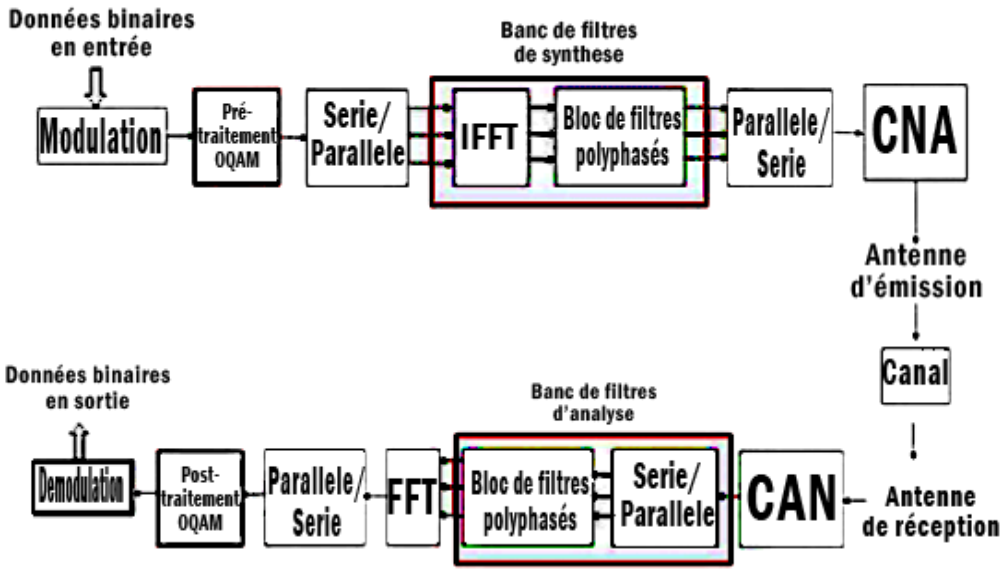

Figure II. 11 : Schéma fonctionnel de baque de filtres multi-porteuse (FBMC) [6].

En FBMC, chacun des sous-canaux individuels est filtré séparément, il utilise le filtre à bande très étroite avec une longue durée, cela nous donne un très bon contrôle de chaque banc de filtres, il fournit un bon contrôle des émissions de chacune des sous-porteuses. Nous avons une très bonne efficacité spectrale et un très bon débit de données mais comme nous n'avons pas de préfixe cyclique, il est un peu difficile de traiter MIMO. FBMC ne prend pas très bien en charge la grande technologie des réseaux MIMO, pour les applications avec MIMO ou transmission courte durée / rafale, ce n'est pas vraiment efficace [31].

L'important est que chacune des sous-porteuses passe par un filtre appelé «Pulse Shaping Filter» [31]. Le procédé illustré ci-dessus peut être représentée de manière plus intuitive, comme indiqué ci-dessous. Chacun des sous-canaux passe par un filtre.

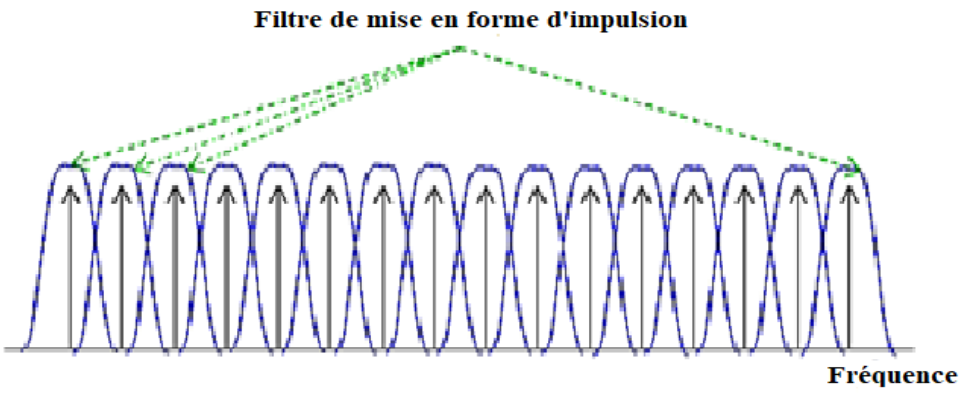

Figure II. 12: Filtre de mise en forme d'impulsion [31].

2.5.3. Différences majeures entre OFDM et FBMC :

On peut résumer la différence entre OFDM et FBMC dans le **tableau II.3** suivant :

Tableau II. 3 Différences entre OFDM et FMBC [32].

Propriétés	OFDM	FBMC
Extension de préfixe cyclique	Le préfixe cyclique est requis dans OFDM et ceci sacrifie la bande passante	Préfixe cyclique non requis et cela conserve la bande passante
lobes latéraux (secondaires)	Grands lobes latéraux (secondaires) gênants	Lobes latéraux (secondaires) bas
Synchronisation	Pour une détection correcte, l'annulation des interférences d'accès multiples (MAI) doit être effectuée sur le récepteur	MAI est réprimé en raison de l'excellente localisation en fréquence de la sous-porteuse
Effet Doppler	Très sensible au décalage de fréquence porteuse	Moins sensible et donc performant avec l'augmentation de la mobilité des utilisateurs
Système MIMO	Grande flexibilité tout en adoptant les techniques MIMO	Flexibilité limitée
Détection du spectre	Performances de détection de spectre dégradées en raison d'un problème de fuite spectrale dans OFDM	Résolution de détection à spectre élevé
Complexité informatique	Très faible complexité	Grande complexité

2.5.4. Avantages et Inconvénients du FBMC :

La technique FBMC est caractérisée par [6] :

A. Avantages FBMC :

- FBMC est en mesure de fournir un système à spectre efficace et plus sélectif.
- Le préfixe cyclique CP requis pour OFDM n'est pas nécessaire, libérant ainsi plus d'espace pour les données réelles.
- Fournir des brouilleurs robustes à bande étroite.

B. Inconvénients du FBMC :

- L'utilisation de MIMO avec FBMC est très compliquée, et par conséquent, peu de travaux ont étudié l'utilisation de ces deux techniques ensemble.

- La conception de systèmes à large bande passante et à plage dynamique élevée avec FBMC présente des défis de développement RF importants.
- Le FBMC est plus compliqué que l'OFDM.

2.6. Technique de modulation UFMC :

2.6.1. Définition :

UFMC (Universal Filter MultiCarrier) est une forme d'onde prometteuse de faible complexité qui fournit une propriété quasi orthogonale entre les sous-porteuses. La technique combine la simplicité d'OFDM avec les avantages de FBMC [33]. Cependant, ces avantages vont de pair avec une augmentation de la complexité au niveau de l'émetteur provoquée par la mise en œuvre d'un filtre et l'application d'une FFT pour chaque sous-bande tandis qu'au niveau du récepteur, il est nécessaire de doubler la taille de la FFT mise en œuvre [33]. Au lieu de filtrer chaque sous-porteuse individuellement, UFMC divise le signal en un certain nombre de sous-bande qu'il filtrera ensuite. On peut l'utiliser pour améliorer la protection contre les interférences entre symboles.

2.6.2. Emetteur et récepteur UFMC :

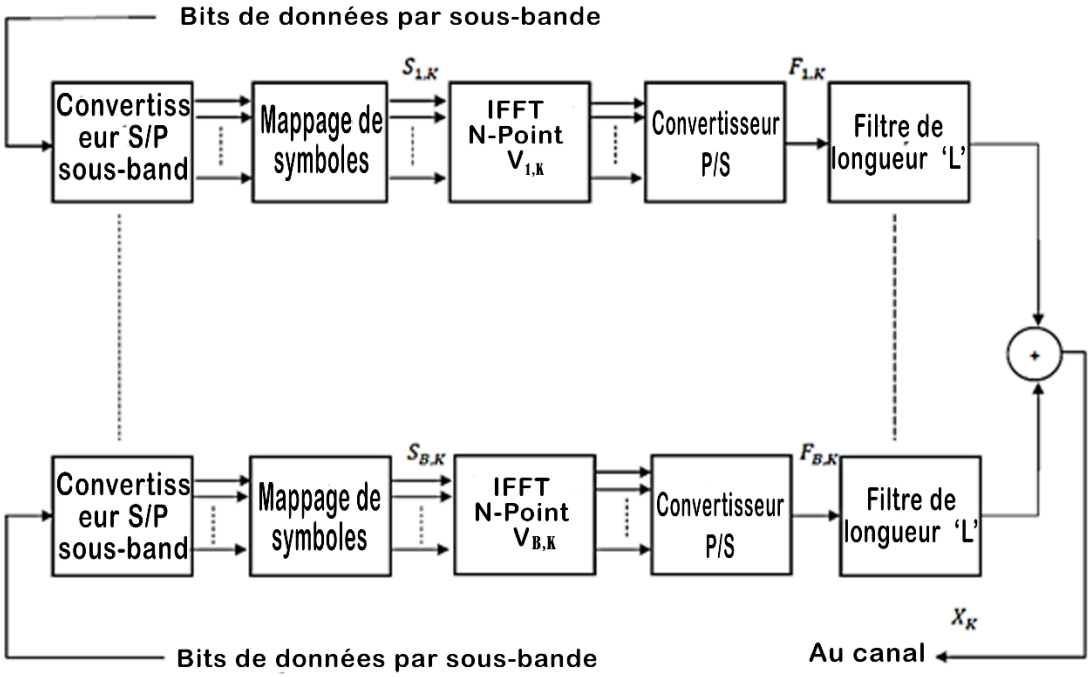

Figure II. 13 : Schéma fonctionnel de l'émetteur UFMC [33].

Dans l'UFMC, la bande passante totale est divisée en sous-bandes, chaque sous-bande a des sous-porteuses. Au lieu de filtrer chaque sous-porteuse comme la **figure II.13** montre (le

schéma synoptique de l'émetteur UFMC). La figure montre que dans l'UFMC la bande passante totale est divisée en *B* sous-bandes, chaque sous-bande à *k* sous-porteuses, les bits de données sont donnés à chaque sous-bande, ensuite, les bits de données deviennent parallèles.

Avec l'utilisation d'un convertisseur série-parallèle, la sortie du convertisseur série-parallèle est donnée au mappeur de symboles, pour assigner des bits aux symboles. La sortie du mappeur de symboles est donnée à IFFT. L'IFFT fonctionne comme un modulateur, Il est très difficile de concevoir des modulateurs pour chaque sous-porteuse.

La sortie de l'IFFT est sérialisée par un convertisseur parallèle-série et cette sortie est filtrée avec un filtre de mise en forme d'impulsions de longueur L (filtre de Tchebychev) [33].

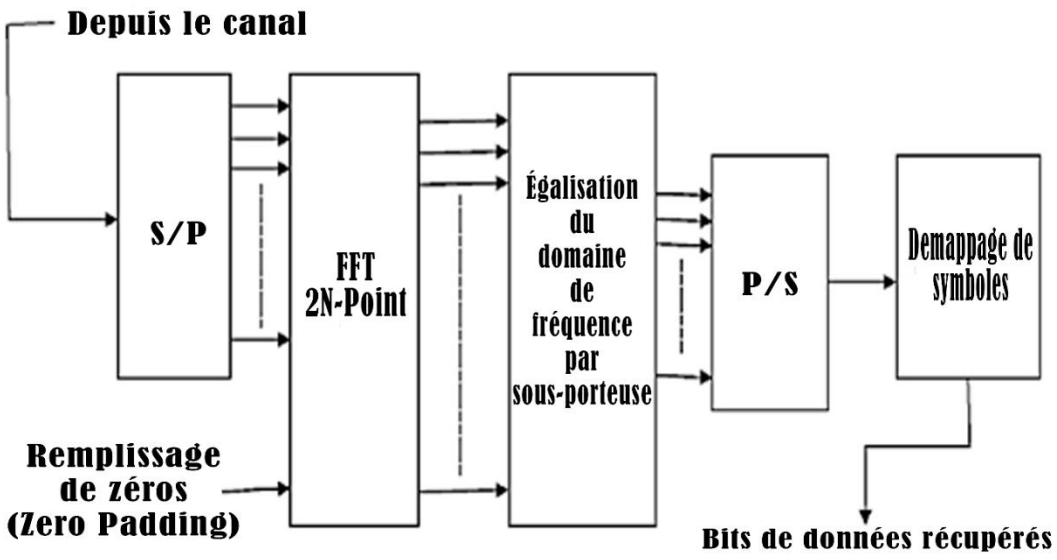

Figure II. 14 : Schéma fonctionnel du récepteur UFMC [33].

La **figure II.14** montre le schéma synoptique du récepteur UFMC, les données reçues du canal entrent dans un convertisseur série-parallèle, puis transmises via une FFT pour démoduler les données. Ensuite, la sortie de FFT entre dans un convertisseur parallèle-série ; il convertit tous les flux de données parallèles en un seul flux. Le démappeur de symboles convertit les symboles en bits et les données d'origine sont récupérées.

2.6.3. Avantage UFMC :

Parmi les avantages de l'UFMC [33] :

- UFMC a une bonne efficacité spectrale par rapporte à l'OFDM, car l'UFMC n'insère pas de préfixe cyclique comme dans OFDM.
- Il n'y a pas de répétition des mêmes bits, donc il utilise efficacement tout le spectre alloué.
- Moins de lobes latéraux que l'OFDM, au fur et à mesure que les lobes latéraux diminuent, les interférences sur les sous porteuses adjacentes diminuent également.

- PAPR est faible pour UFMC par rapport à OFDM, car en OFDM le signal est constitué en un grand nombre de sous-porteuses modulées indépendamment qui peuvent conduire à un large PAPR lorsqu'elles sont ajoutées en phase. Dans UFMC, la bande passante totale est divisée en sous bandes. Comme la probabilité que le nombre de sous-porteuses s'additionnent en phase est moindre dans UFMC, la puissance maximale diminue.

3. Modulations des prochaines générations B5G et 6G :

Dans les décennies récentes, les communications micro-ondes dans la gamme en dessous de 6 GHz ont été étudiées et développés. Cependant, en raison de ressources de fréquences limitées et d'une occupation excessive, la sous-bande 6 GHz est devenue très encombrée et ne peut plus supporter l'augmentation exponentielle de la capacité de communication. Pour cette raison, les communications à ondes millimétriques seront l'une des principales technologies candidates pour le futur de la 5G (B5G) et la 6G pour les communications mobiles sans fil, mais avec la fréquence de 30GHz Jusqu'à 300GHz [34], une ressource de spectre de fréquences abondante peut être utilisée pour prendre en charge le taux de transmission de données ultra élevé.

Les systèmes conventionnels d'accès multiple orthogonal OMA (Orthogonal Multiple Access), par exemple TDMA (Time Division Multiple Access), CDMA (Code Division Multiple Access) et OFDMA, ne peuvent pas supporter un grand nombre d'appareils mobiles pour les générations B5G et 6G, parce qu'il est prévu que d'ici 2030, le nombre d'appareils mobiles dans le monde atteindra plus de 125 milliards [34].

Outre les techniques susmentionnées, une nouvelle technologie d'accès radio est également développée par les chercheurs pour être utilisée dans les réseaux de communication en raison de sa capacité à augmenter la capacité du système est appelé NOMA (Non Orthogonal Multiple Access). La stratégie d'accès multiple non orthogonal (NOMA) peut prendre en charge plusieurs utilisateurs dans le même bloc de ressources (temps / fréquence / code), en utilisant un codage de superposition dans le domaine de la puissance. Dans les récepteurs, plusieurs utilisateurs peuvent être distingués les uns des autres en exploitant l'annulation d'interférence successive (SIC). Donc, le nombre d'utilisateurs peut être multiplié par plusieurs, ce qui fait de NOMA un système d'accès prometteur dans les systèmes 5G et au-delà.

3.1. Modulation OMA et NOMA :

Dans OMA, chaque utilisateur peut exploiter des ressources de communication orthogonales dans un intervalle de temps, une bande de fréquences ou un code spécifique afin d'éviter

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

En général, les schémas NOMA peuvent être classés en deux types : le multiplexage dans le domaine de la puissance et le multiplexage dans le domaine du code. En plus, il existe d'autres schémas NOMA tels que l'accès multiple par division de motifs (PDMA) et le multiplexage par répartition binaire (BDM) [35].

Le multiplexage dans le domaine du code a le potentiel d'améliorer l'efficacité spectrale. Il nécessite une bande passante de transmission élevée et n'est pas facilement applicable aux systèmes actuels. En revanche, le multiplexage dans le domaine de la puissance a une implémentation simple car des changements considérables ne sont pas nécessaires sur les réseaux existants. Et aussi il ne nécessite pas de bande passante supplémentaire pour améliorer l'efficacité spectrale [35].

3.2. Comparaison entre NOMA et OMA :

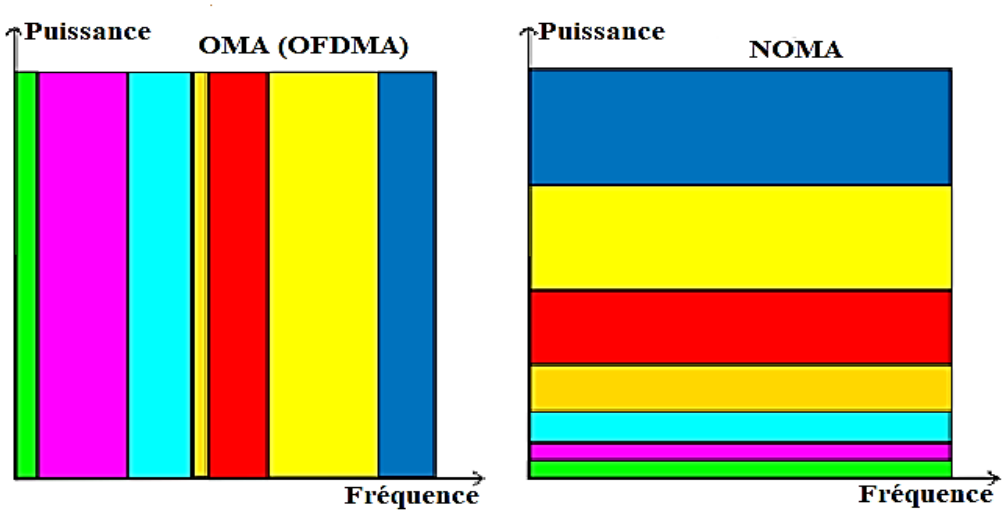

Figure II. 15 : Une comparaison imagée de la OMA et NOMA [35].

La supériorité de NOMA sur OMA peut être remarquée comme suit [35] :

- Efficacité spectrale et débit : en OMA, comme en OFDMA, chaque utilisateur se voit attribuer une ressource de fréquence spécifique même s'il connaît un état de canal bon ou mauvais. Par conséquent, le système global souffre d'une faible efficacité spectrale

et d'un faible débit. Au contraire, dans NOMA, la même ressource de fréquence est attribuée à plusieurs utilisateurs mobiles avec de bonnes et de mauvaises conditions de canal en même temps. Par conséquent, la ressource affectée à l'utilisateur faible est également utilisée par l'utilisateur fort, et l'interférence peut être atténuée par des processus SIC dans les récepteurs des utilisateurs. Ainsi, la possibilité d'améliorer l'efficacité spectrale et le débit élevé sera considérablement augmentée.

- Équité pour l'utilisateur, faible latence et connectivité massive : en OMA, par exemple en OFDMA avec planification, l'utilisateur avec un bon statut de canal à une priorité plus élevée à donner lorsque l'utilisateur est dans un mauvais statut de canal doit attendre l'accès, ce qui conduit à un problème d'équité et une latence élevée. Cette approche ne peut pas supporter une communication massive. Cependant, NOMA peut servir simultanément plusieurs utilisateurs avec différentes conditions de canal. Ainsi, il peut offrir une meilleure équité aux utilisateurs, moins de latence et une connectivité massive plus élevée.
- NOMA est également compatible avec les systèmes de communication actuels et futurs car il ne nécessite pas de modifications importantes sur l'architecture existante. Par exemple, NOMA a été inclus dans le projet de partenariat de troisième génération à évolution à long terme avancé (3GPP LTE version 13).

4. Métriques de mesure et d'évaluation des performances :

4.1. PAPR :

Le PAPR (Peak to Average Power Ratio) est la relation entre la puissance maximale d'un échantillon dans un symbole de transmission donné divisée par la puissance moyenne de ce symbole OFDM. En termes simples, PAPR est le rapport entre la puissance de crête et la puissance moyenne d'un signal. Il est exprimé en unités de dB, le PAPR se produit lorsque dans un système à porteuses multiples, ou les différentes sous-porteuses sont déphasées les unes par rapport aux autres. À chaque instant, ils sont différents les uns des autres à différentes valeurs de phase, lorsque tous les points atteignent simultanément la valeur maximale, cela entraînera une augmentation soudaine de l'enveloppe de sortie, ce qui provoquera un «pic» dans l'enveloppe de sortie. Le PAPR peut être calculé par :

$$PAPR = \frac{\max_{0 \le t \le T} (|x(t)|^2)}{\frac{1}{T}\int_0^T |x(t)|^2 \, dt} \qquad \text{II.1}$$

Ou x(t) est un signal réel ou complexe, T temps d'intégration et t est le temps. Un faible PAPR est essentiel pour une efficacité énergétique de transmissions à partir d'appareils (par

exemple, liaison montante). Par conséquent, un faible PAPR est également important pour la liaison descendante.

4.2. BER :

BER (Bit Error Rate) ou TEB (Taux d'erreur binaire) est un paramètre clé qui est utilisée dans l'évaluation des systèmes qui transmettent des données numériques à partir d'un emplacement à un autre. Il est utilisé pour quantifier un canal de transport de données en comptant le taux d'erreurs dans une chaîne de données**.**

Un taux d'erreur binaire est défini comme étant le taux auquel les erreurs se produisent dans un système de transmission. La définition du taux d'erreur binaire peut être traduite en une formule simple :

$$\mathbf{BER = TEB = \frac{Nombre\ d'erreurs}{Nombre\ total\ de\ bits\ envoyés}} \qquad \text{II.2}$$

4.3. BLER(FER) :

BLER (Bloc Error Rate), nommé aussi FER (Frame Error rate), est le rapport entre les erreurs de trame totales et les trames testées exprimé en pourcentage. La FER est utilisée pour déterminer le nombre de trames à tester avant de rendre disponibles les résultats réussite / échec.

$$\text{FER} = \frac{\text{nombre de trames erronés appartenant `a la source}}{\text{nombre total de trames transmises pour la source}} \qquad \text{II.3}$$

4.4. Débit de transmission (Throughput) :

Le débit est une mesure utilisée pour déterminer la quantité de données transmises dans un intervalle de temps fixé (par second). Cette mesure est utilisée principalement pour des transmissions audio ou vidéo.

4.5. Compatibilité MIMO :

Les déploiements MIMO remédient également aux problèmes d'affaiblissement de propagation élevé et étendent la plage de couverture grâce à la formation de faisceau.

Les stations de base et les appareils mobiles bénéficieront de la technologie MIMO, qui permettra la mise en œuvre d'un multiplexage spatial et fréquentiel en mode MIMO utilisateur unique et MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO).

4.6. Occupation Spectrale :

Le Spectre d'un signal est la représentation fréquentielle du signal, ce paramètre sert à quantifier le masque spectral de la forme d'onde d'une technique donnée pour caractériser l'ACLR (Adjacent Channel Leakage Ratio).

5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié théoriquement les propriétés des différentes techniques utilisées en 5G et les prochaines générations B5G et 6G. Ici, nous pouvons donner quelques commentaires concluant à ce chapitre :

L'OFDM présente deux inconvénients : une localisation basse en fréquence et un rapport puissance / crête (PAPR) élevé comme toutes les formes d'onde multi-porteuses. Cependant, il existe des techniques simples bien établies pour améliorer la localisation des fréquences et réduire le PAPR. Ces techniques peuvent être appliquées au CP-OFDM au niveau de l'émetteur.

Les signaux DFT-S-OFDM ont les meilleures caractéristiques du point de vue énergétique, par rapport aux signaux OFDM. C'est la raison principale du choix du DFT-S-OFDM pour les transmissions en liaisons montantes. La différence majeure entre DFT-S-OFDM et OFDMA est : l'OFDMA est une technique de transmission multi-porteuse, tandis que le DFT-S-OFDM est une technique mono-porteuse.

La modulation GFDM en utilisant les filtres prototypes RRC Meyer permet de réduire considérablement les OOB par rapport à la modulation OFDM. Cela nous mène à comprendre l'avantage de la GFDM pour la future norme de communication. La modulation GFDM offre une meilleure technique et une meilleure solution aux problèmes que l'OFDM génère en termes de la bande passante occupée et d'efficacité spectrale.

CHAPITRE 03 :

SIMULATIONS COUCHES PHYSIQUES DE NG

1. Introduction :

En vue des données disponibles sur la 5G et B5G mobile communications dans le standard 3GPP, et après avoir finaliser la partie théorique, nous passons dans ce chapitre à la simulation et comparaisons des modulations.

Nous allons établir la simulation des techniques FBMC, OFDM, GFDM, UFMC, DFT-S-OFDM et CP-OFDM, en termes de BER, PAPR, l'efficacité spectrale, et finalement en termes de la compatibilité avec les systèmes MIMO.

Nous commençons par la présentation des systèmes FBMC, OFDM, GFDM, UFMC, DFT-S-OFDM, CP-OFDM et puis l'implémentation dans un logiciel de validation de couches physiques et finalement on passe à l'étude des performances.

Afin de pouvoir faire des comparaisons entre les différentes formes d'ondes et fixer leurs avantages et inconvénients, et pour bien comprendre la différence entre les formes d'onde candidate dans la 5G, nous avons choisi les paramètres présentés dans le **tableau III.1**. Une fréquence de porteuse dans le rang de fréquences FR1 et l'autre dans le FR2 Pour montrer l'effet de la variation de la fréquence porteuse sur les simulations. Aussi, deux largueurs de bande passante une dans le FR1 (100MHz), l'autre dans le FR2 (400MHz) pour montrer l'effet du largueur de la bande passante. Nous avons fixé la puissance de l'émetteur à 0.1W pour une comparaison identique. 16-QAM et QPSK sont les types de modulation utilisé dans nos simulations, le type du canal est toujours AWGN dans toutes les simulations avec une configuration d'antennes SISO (single input single output). Les simulations sont faites sans défaillance matériel (aucun bruit de phase et amplificateur linéaire) et une synchronisation idéale entre émetteur et récepteur.

2. Etude comparative de l'OFDM, UFMC, GFDM, FBMC :

2.1. Performances BER

Pour mieux comprendre les avantages et les inconvénients des types de modulation de nouvelle génération, sans dégradations–matérielles, les performances des formes d'onde (CP-OFDM, DFT-S-OFDM, UF-OFDM, FBMC), doivent être évaluées suivants les critères et métriques d'évaluation, détaillées en **chapitre 02**. Les évaluations au niveau des liens des formes d'onde sont effectuées à l'aide d'un logiciel de validation de couches physiques**.**

Dans cette partie nous avons simuler les diferentes forme d'onde en terme de BER dans le FR1[1] et FR2[2]. Les paramétres utilisées dans nos simulation sont illsutrés par la **table III.1**,

[1] Une fréquence de 2.5 GHz en bande FR1, et non pas toutes la bande FR1.
[2] Une fréquence de 28 GHz en bande FR2, et non pas toutes la bande FR2.

et les résultats des comparisons des performances en terme de BER sont presentés par les **figures III.1 et III.2.**

Tableau III. 1 : Paramètres des simulations.

Paramètres	FR1	FR2
la fréquence de la porteuse	2.5 GHz	28 GHz
Bande passante	100MHz	400MHz
puissance du signal	0.01 W	0.01 W
Type modulation	16-QAM, QPSK	16-QAM, QPSK
Le nombre de sous porteuses actives	1200[3]	1200[4]
Configuration d'antennes	SISO	SISO
Type de Canal	AWGN	AWGN
Défaillance matériel	Sans	Sans

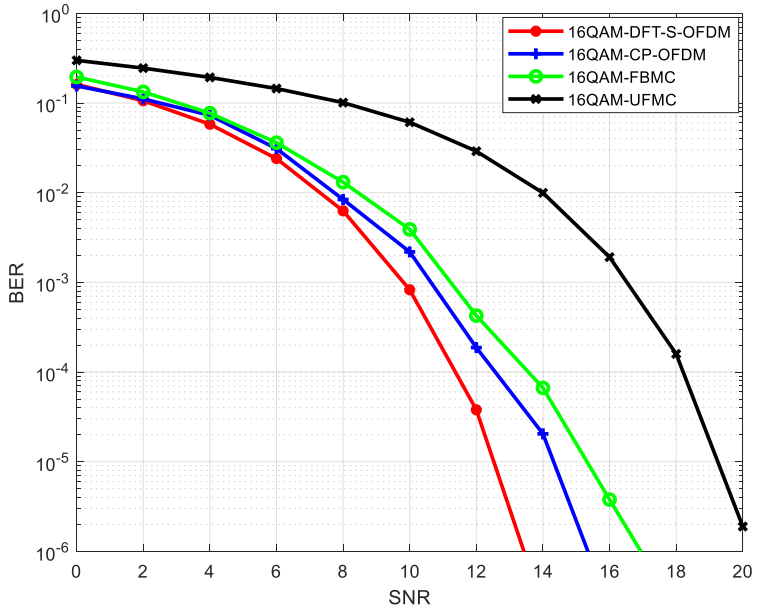

Figure III. 1 : Performances BER de différentes formes d'onde pour FR1.

[3] Valeur choisis pour un compromis entre 1024 et 2048.

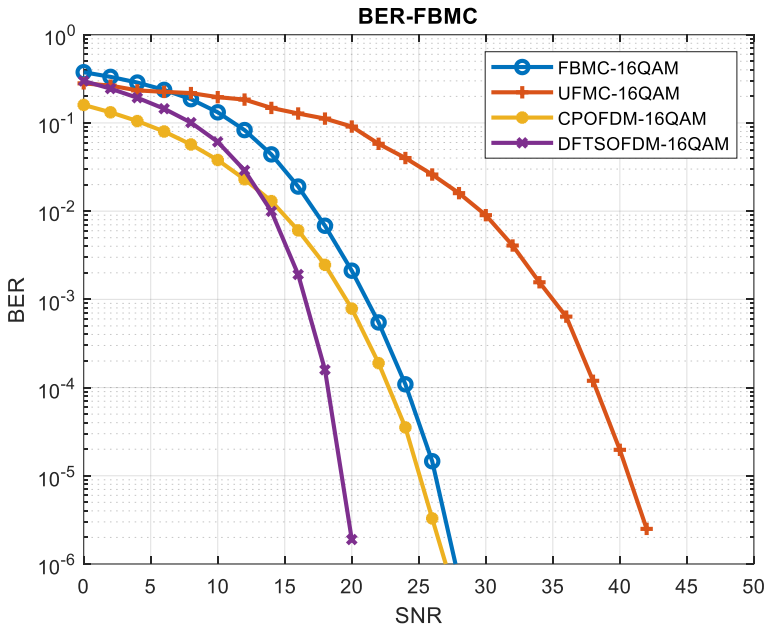

Figure III. 2 : Performances BER de différentes formes d'onde pour FR2.

Les **figures III.1 et 2** montres le BER de différentes formes d'onde FBMC, CP-OFDM, DFT-s-OFDM et UFDM. A partir des figures précédentes, on peut dire que la modulation DFT-s-OFDM est la meilleur en termes de BER (le plus faible BER), par contre la technique FBMC et UFMC ont un BER plus élevé.

Une approche qui peut être accepté pour réduire le taux d'erreur binaire est de réduire la bande passante, car les niveaux de bruit seront inférieurs, et donc le rapport signal sur bruit s'améliorera. Dans ce cas, nous sommes confrontés au problème du débit, car si la bande passante est étroite, le débit diminuera. La technique mono-porteuse DFT-s-OFDM donne des valeurs de BER meilleur par rapport aux techniques multi-porteuses (FBMC). Pour que le CP soit présent, l'énergie devrait être divisée en informations et le préfix cyclique, de même, un symbole UFMC se compose des informations réelles plus les réponses du filtre. Il faut donc considérer que l'OFDM, GFDM et UFMC serait plus mauvais en fonction de la longueur du CP, ou de la réponse du filtre. La technique DFT-s-OFDM a le plus faible BER par rapport aux autres techniques parce qu'elle est une technique mono-porteuses, donc on n'a pas le problème d'interférence entre les autres sous-porteuses.

2.2. Influence de l'ordre de modulation dans un système FBMC :

Les **figures III.3 et 4** ci-dessous présente l'influence de l'ordre de modulation QAM sur les performances d'un système FBMC (canal non activé). Nous avons simulé les performances BER de la modulation QPSK jusqu'à la modulation 2048 QAM pour les bandes du FR1 et FR2, les deux courbes montre la variation du BER en fonction de nombre de sous porteuse dans un intervalle de SNR identique.

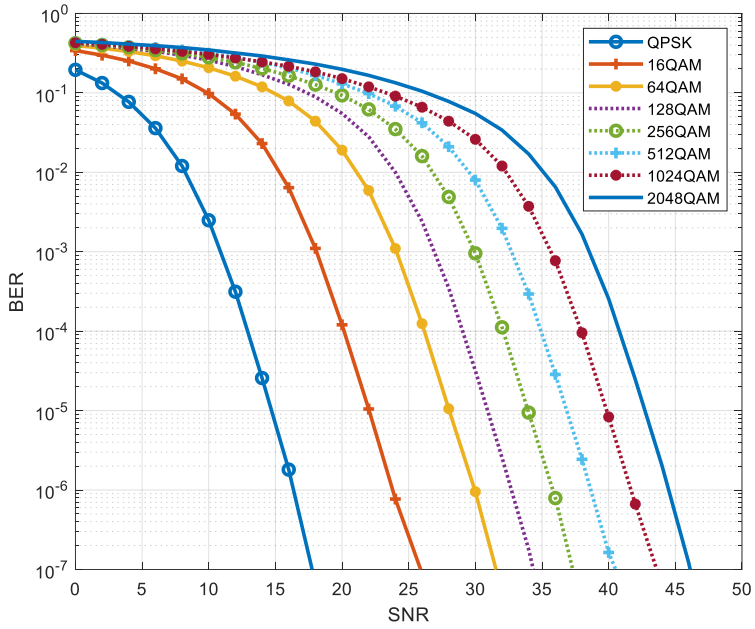

Figure III. 3 : Performances BER-FBMC de différents ordres de modulation FR1.

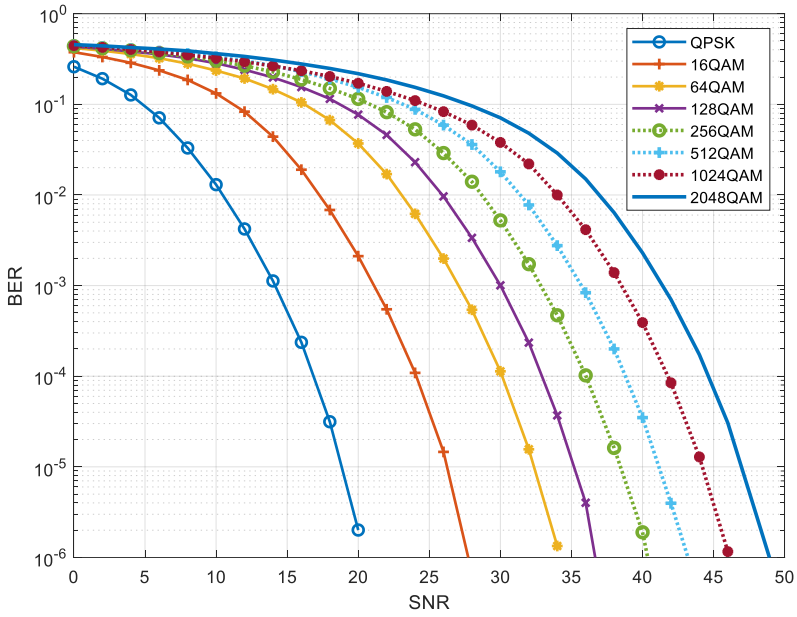

Figure III. 4 : Performances BER-FBMC de différents ordres de modulation FR2.

Nous constatons d'après ces résultats que les meilleures performances sont obtenues pour la QPSK. Nous remarquons aussi que si l'ordre de modulation augmente la qualité diminue, parce que chaque fois on augmente l'ordre de la modulation, on augmente le nombre des bits à transmettre, par exemple, pour la QPSK, on envoi deux bits à la fois, par contre pour la 1024QAM, on envoi 10 bits à la fois. Ceci s'explique par le fait que si le nombre de bit par symbole augmente la probabilité d'erreur augmente et la qualité diminue.

2.3. Caractéristiques de puissances de la forme d'onde (PAPR) :

A cause de l'autonomie des batteries, il est nécessaire d'utilisé une technique qui a le plus faible PAPR. Dans cette partie de ce chapitre nous avons tracé les courbes de la fonction de distribution du PAPR pour les différentes formes d'onde (FBMC, GFDM, DFT-S-OFDM, CP-OFDM, UFMC, OFDM) dans les deux plages de fréquences FR1 et le FR2, pour pouvoir étudier leurs performance et faire des comparaisons entre eux pour déterminer la meilleur technique qui donne la meilleur performance (le PAPR le plus faible est le meilleur pour nous).

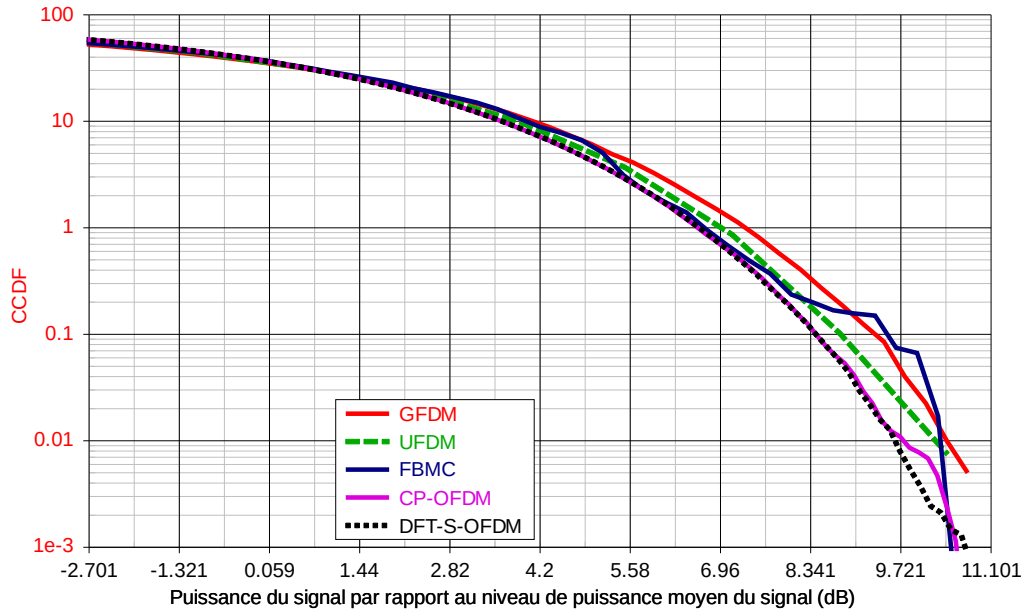

Figure III. 5 : Performances PAPR de différentes formes d'onde pour FR1.

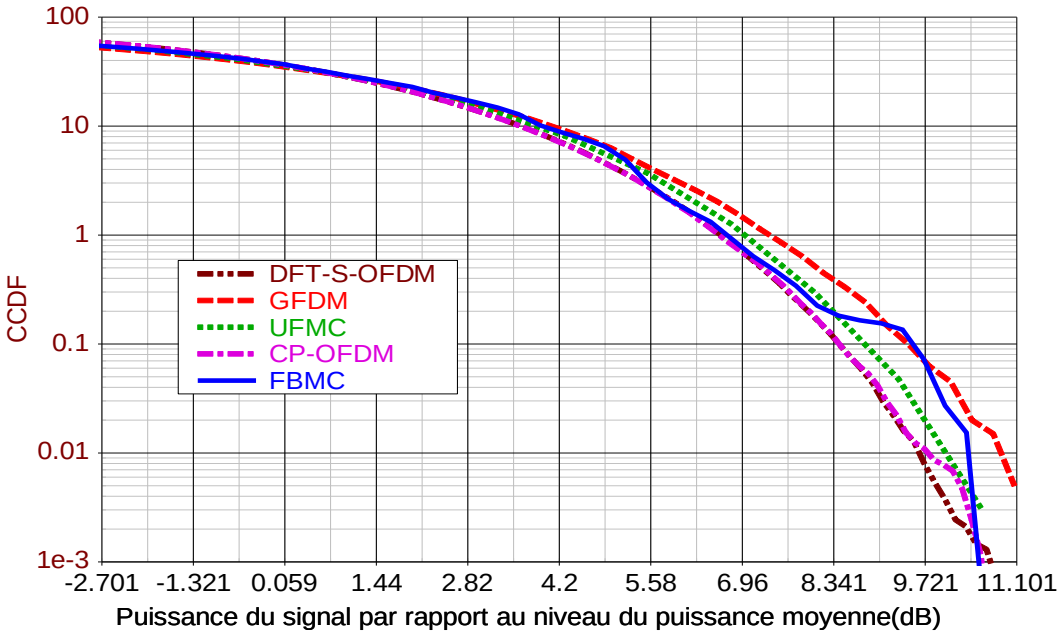

Figure III. 6 : Performances PAPR de différentes formes d'onde pour FR2.

Les **figures III.5 et 6** montrent la fonction de distribution cumulative complémentaire (CCDF) du PAPR des différentes formes d'onde, le graphique montre clairement que :

- La technique DFT-s-OFDM donne des meilleures performances en termes de PAPR, suivi par la technique CP-OFDM, FBMC, UFMC et GFDM.
- On peut voir clairement que la forme d'onde DFT-s-OFDM a mono-porteuse a un PAPR plus faible comparé aux formes d'ondes multi-porteuses, parce que l'énergie demandé pour une technique mono-porteuse est plus faible par rapport à la l'énergie d'une technique multi-porteuse, ceci permet un fonctionnement plus efficace des amplificateurs de puissance situés sur les émetteurs, donc il devient évident qu'un inconvénient commun des formes d'onde multi-porteuses est leurs PAPR élevés.
- Ces résultats expliquent l'utilisation de la technique DFT-s-OFDM dans la liaison montante (Uplink) et l'utilisation du CP-OFDM dans la liaison descendante (Downlink) dans les normes 5G.

Le choix de la technique de modulation a utilisé est basé sur une technique qui a une puissance plus faible (c.-à-d. faible consommation), une technique qui a moins de variations de puissance, et aussi moins de pics de puissance, donc les amplificateurs ne sont pas obligé d'augmenter ou de diminue la puissance à chaque fois. Cela implique un fonctionnement optimal des amplificateurs et aussi une autonomie améliorée pour les terminaux mobiles. A titre de comparaison, les résultats du PAPR obtenues dans cette section sont presque identiques à ceux dans la littérature [36].

2.4. Occupation spectrale :

Dans cette partie, nous avons simulé la densité spectrale de puissance (PSD) des différentes formes d'ondes (OFDM, GFDM, FBMC, UFMC) dans une bande du FR1 (2.5GHz, avec une bande passante de 50MHz) et du FR2 (28GHz, avec une bande passante de 10MHz), pour faire des comparaisons entre ces différentes formes d'ondes et désigner la meilleur en termes de la largueur de bande passante et aussi en terme des émissions hors bande (OOB).

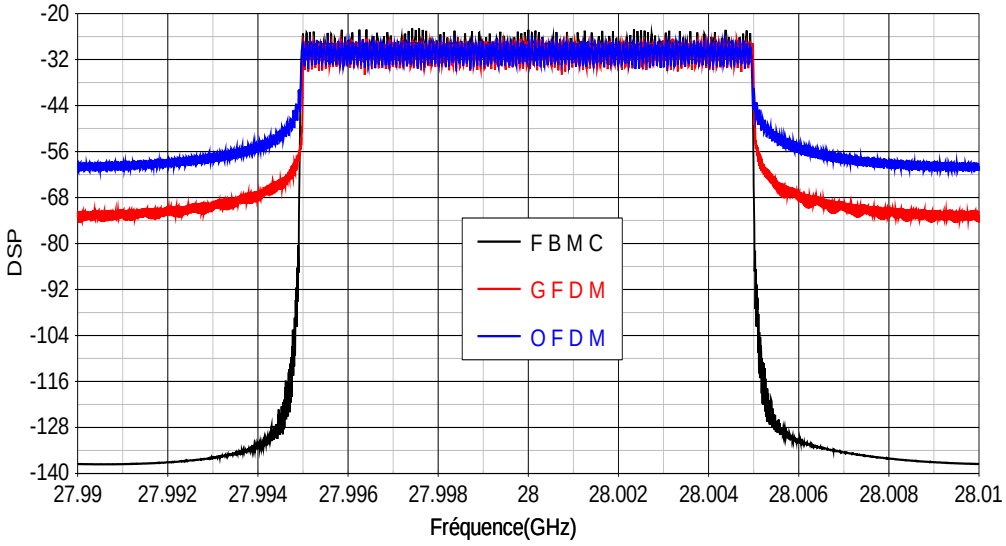

Figure III. 7 : l'occupation spectrale des différentes formes d'onde pour FR2.

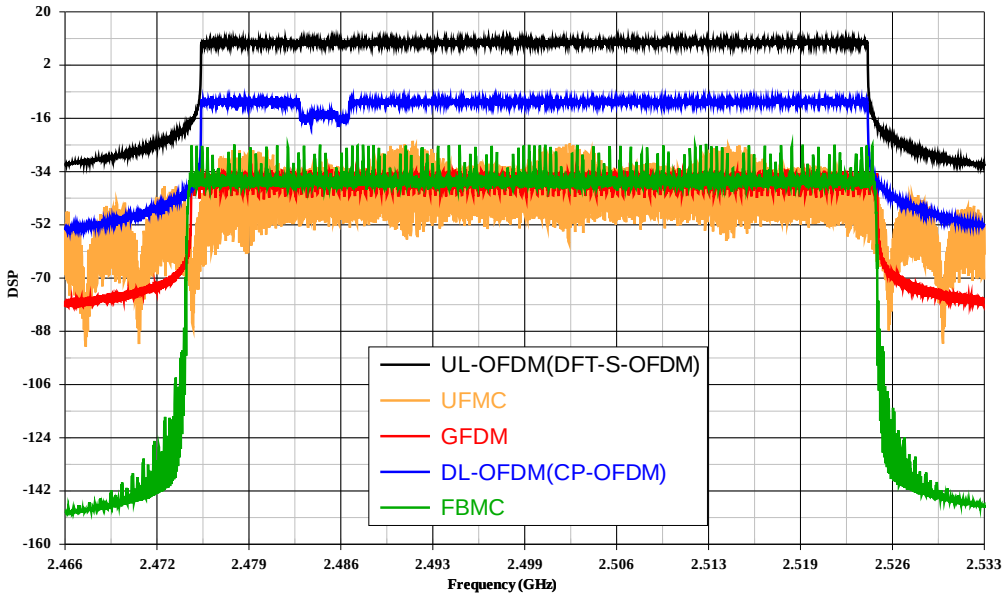

Figure III. 8 : l'occupation spectrale des différentes formes d'onde pour FR1.

Les **figures III. 7** et **III. 8**, montrent la densité spectrale de puissance (PSD) de différentes formes d'onde, les simulations sont faites sans bruit de phase et sans défaillance matériel. On peut voir clairement sur les graphes que la technique FBMC donne des meilleures performances en terme de l'efficacité spectrale, comparée aux autres techniques, puisque on n'est pas obliger d'utiliser un préfix cyclique entre les sous-porteuses, et aussi le filtrage de chaque sous-porteuses pour éviter l'interférence entre eux. De plus, FBMC est caractérisé par des faibles émissions hors bande (OOB-out of band emission), cela donne un large spectre, et minimise le chevauchement entre les sous porteuses. Les formes d'onde UFMC, CP-OFDM et DFT-s-OFDM ont beaucoup plus de fuite de puissance OOB que les autres formes d'onde, et surtout la UFMC

qui est la plus mauvaise technique par rapport aux autres à cause des grands lobes secondaire qui implique plus d'interférences. Pour le cas du CP-OFDM, le spectre est considéré pour deux transmissions en même temps, ou la partie à gauche du spectre située entre la fréquence de 2.4755 GHz et 2.4825 GHz, est une transmission 16QAM, caractérisée par des grands pics de puissance qui implique un PAPR élevé. Pour la partie à droite du spectre située entre les fréquences de 2.487 GHz et 2.524 GHz, est considérée pour une transmission d'ordre inferieur QPSK, caractérisée par des petits piques de puissance qui impliquent un PAPR faible. Nos résultats sont comparables à [36].

2.5. Influence de l'ordre de diversité (nombre d'antennes) :

Afin d'améliorer les performances en terme du BER et débit pour un système MIMO-OFDM, nous avons pensé à augmenter la diversité spatiale en émission et en réception. Pour cela, nous avons opté pour un système MIMO 2×2, 4×4. Pour comparer les performances en termes du BER et débit avec les différents nombre d'antennes d'émission et réception, nous avons utilisé les mêmes paramètres de simulation utilisés précédemment.

Dans les simulations des systèmes MIMO, nous avons choisi :

- Un récepteur MIMO de type **MIMO-STBC-OFDM.**
- Un système MIMO à un seul utilisateur (SU-MIMO-OFDM) dans le cas de la diversité et le multiplexage.

2.5.1. Performances BER en MIMO-OFDM :

Dans cette partie, nous étudions l'influence du nombre d'éléments d'antennes à l'émission et à la réception sur les performances d'un système MIMO-OFDM dont les canaux MIMO sont idéalement orthogonaux avec une synchronisation idéale. Nous exprimons les performances en termes de BER en fonction du SNR.

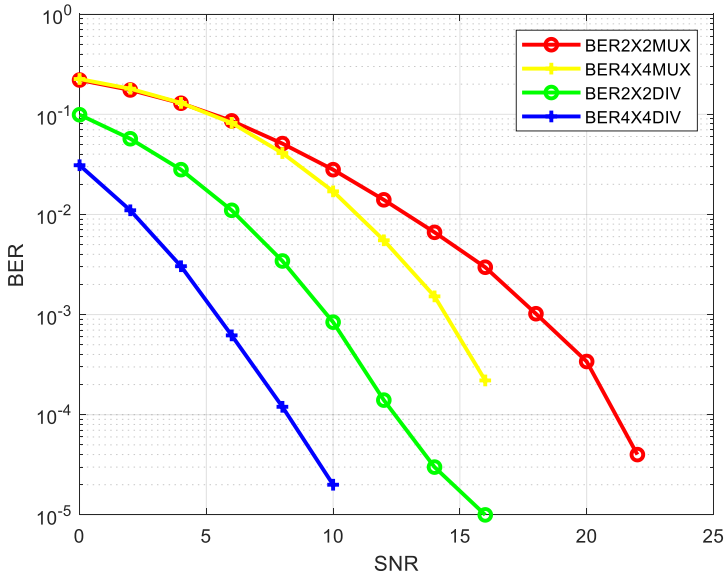

Figure III. 9 : Performances MIMO-BER pour la diversité et le multiplexage.

La **figure III.9** montre clairement que la technique de diversité MIMO est mieux performante que le multiplexage MIMO. De plus, en augmentant le nombre d'antenne, on obtient une très bonne amélioration du BER pour les modes diversités, et marginalement en mode multiplexage ; ceci est dû au fait que dans le cas de la diversité, on transmit le même message dans toutes les antennes d'émission. Le récepteur reçoit tous les signaux identique du l'émetteur, il utilise un seule message qui vient d'une seule des antennes, celle qui reçoit le meilleur signal à un instant donné. Cela permet d'augmenter le SNR (grâce au gain de diversité) de la transmission, par contre le multiplexage découpe le message en sous-messages et transmis chacun sur une antenne, ce qui augmente le débit de la transmission.

2.5.2. MIMO-OFDM simulation Débit :

Dans cette partie de simulation nous étudions l'influence du nombre d'éléments d'antennes à l'émission et à la réception sur les performances du système MIMO-OFDM. Nous exprimons les performances en termes de débit en fonction du SNR.

- Nous avons commencé l'évaluation des performances BLER (bloc error rate) ou FER (Frame Error Rate) pour les différents cas du MIMO-OFDM en MIMO 2×2, MIMO 4×4, après nous avons calculé les valeurs du débit par :

$$D = 2 * Bandwidth * log_2(\mathrm{L}) \qquad \text{III.1}$$

$$\text{Throughput} = D * (1 - FER) \qquad \text{III.2}$$

$$FER = 1 - (1 - BER)^M \qquad \text{III.3}$$

L : ordre de modulation QPSK➔ ou L=4.

D : débit théorique.

M : bits par sous-trame.

Bandwidth (bande passante): 100 MHz.

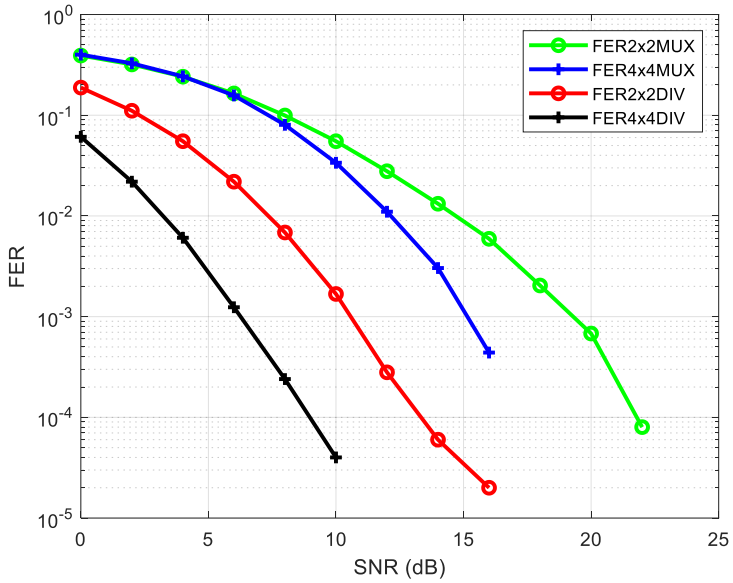

Figure III. 10 : Performances MIMO-FER pour la diversité et le multiplexage.

La **figure III.10** représente une simulation en termes de FER pour le cas du mode diversité et le mode multiplexage, on remarque que les mêmes résultats obtenus par la simulation BER sont obtenue par la simulation FER.

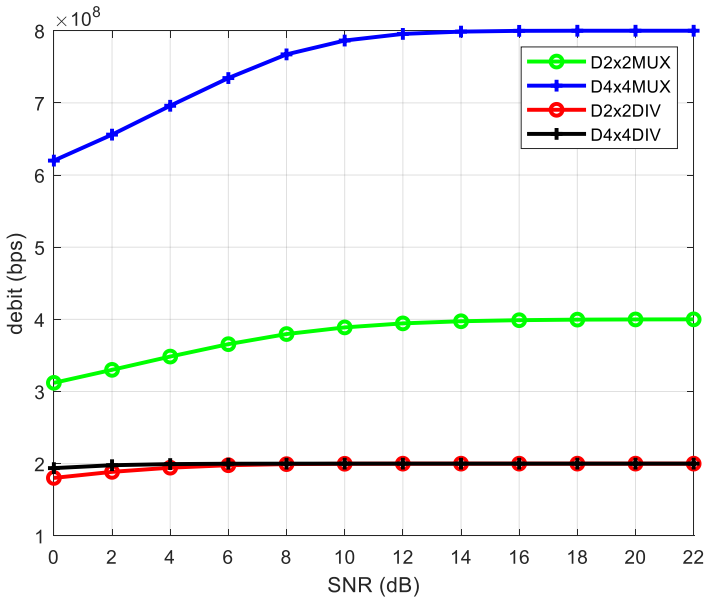

Figure III. 11 : Performances MIMO-DEBIT pour la diversité et le multiplexage.

La **figure III.11** présente les performances en termes de débit dans le cas MIMO-OFDM pour la diversité et le multiplexage dans la bande de fréquence FR1.

Dans ce cas, le système MIMO-OFDM en mode multiplexage présente de meilleurs résultats en termes de débit par rapport au système MIMO-OFDM-Diversité. Pour un rapport *SNR* =12 dB, on a un débit de 8.10^8 bits/s pour le système MIMO-OFDM-MUX 4x4, alors qu'on atteint 2.10^8 en utilisant un système MIMO-OFDM DIV 4x4, parce que le multiplexage consiste a découpé le message en sous-message et envoyé chaque sous-message par une antenne, cela donne un débit de transmission élevé par rapport à la diversité qui consiste à transmettre le même message sur toutes les antennes de l'émission.

Nous remarquons d'après ces résultats que les performances s'améliorent en augmentant le nombre d'antennes à l'émission et à la réception, et les meilleurs résultats sont obtenus pour un système MIMO 4x4. Pour les cas de la diversité, même si on augmente le nombre d'antenne on obtient juste une petite amélioration par rapport au multiplexage. Pour les réseaux 5G et B5G, on utilise du beamforming (antennes intelligentes) qui peut basculer entre le mode diversité et multiplexage selon les conditions de propagation (canal) dans une même cellule, c.à.d. qu'elle peut commuter vers un mode MISO, SIMO ou MIMO massif.

3. Performances NOMA pour les réseaux B5G :

Dans cette partie de simulation, nous allons étudier les performances en termes de BER et capacité de transmission pour un système NOMA qui est une technique candidate pour les réseaux des prochaines générations (B5G, 6G) [37], en plus d'un système OMA déjà utilisé pour les générations actuelles.

3.1. BER de deux utilisateurs :

Le premier utilisateur est le plus éloigné car il est loin de la BS émettrice. Le deuxième utilisateur est l'utilisateur proche. Les paramètres D_f et D_n dénote leurs distances par rapport au BS. Nous avons choisi les puissances : P_f=0.75dBm, P_n=0.25dBm, et les distances : D_f=1000m, D_n=500m, la bande passante =2.4 GHz avec P_f et P_n les puissances de l'utilisateur éloigné et proche, successivement, et D_f et D_n la distance entre la BS et l'utilisateur éloigné et proche, successivement.

Les résultats du BER-NOMA pour deux utilisateurs sont représentés par la **figure III.12**.

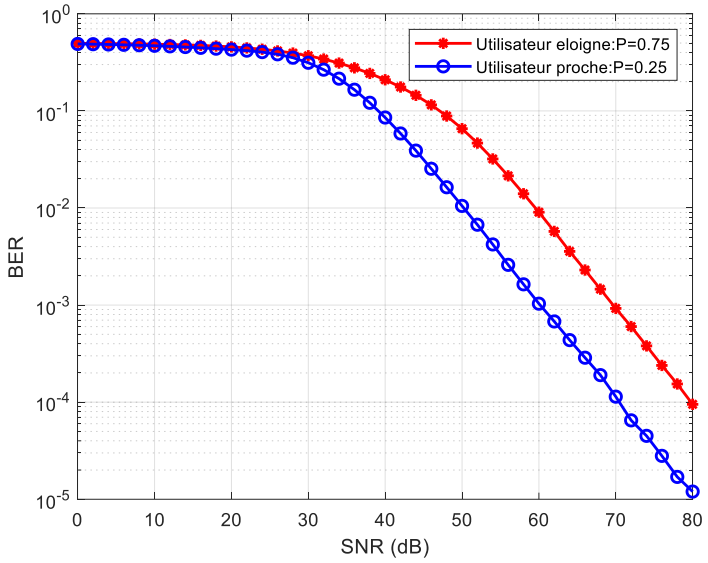

Figure III. 12: Performances BER-NOMA pour deux utilisateurs.

D'après la figure, on voit que si le SNR est inférieur à 20 dB, le BER est le même pour les deux utilisateurs, après un SNR= 28 dB, la courbe du BER de l'utilisateur proche converge plus rapide que la courbe BER de l'utilisateur éloigné. Donc l'utilisateur proche à un BER mieux que l'utilisateur éloigné, parce que l'utilisateur proche reçoit un signal avec un très bon SNR, cela permet de réduit le BER. Aussi, la courte distance permet de diminuer les pertes du trajet par rapport à l'utilisateur éloigné. On utilisant une distribution équitable de puissance entre les deux utilisateurs, nous avons obtenu les résultats de la **figure III.13** suivante :

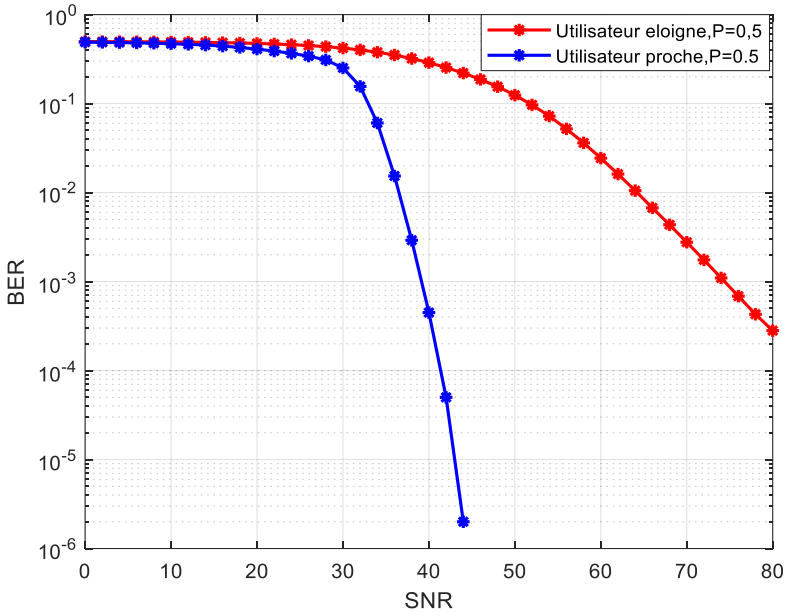

Figure III. 13: Performances BER-NOMA pour deux utilisateurs avec la même puissance.

D'après les deux figures **Figure III. 12** et **III.13**, on remarque que si on adopte une distribution de puissance appropriée entre les deux utilisateurs, on obtient un BER très faible (10^{-}

^{5}) pour les deux utilisateurs, par contre dans le cas d'une distribution de puissance équitable on obtient un meilleur BER (inferieur a 10^{-5}) pour l'utilisateur proche, et un BER plus grand pour l'utilisateur éloigné (supérieur à 10^{-4}). Ce cas d'étude illustre l'avantage de la technique NOMA avec une distribution de puissance différente entre l'utilisateur proche et éloigné.

D'après la **figure III.14** on remarque que si on augmente la bande passante à 7 GHz, le BER aussi augment.

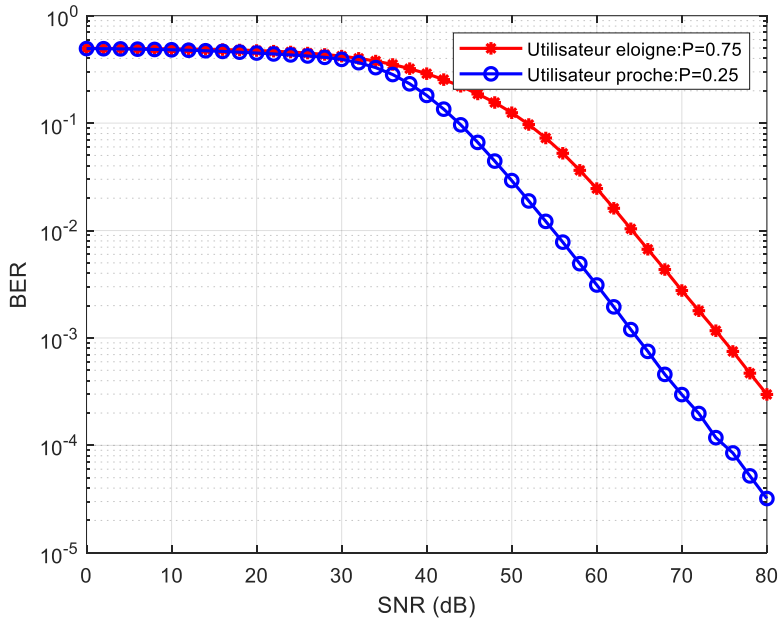

Figure III. 14: Performances BER-NOMA pour deux utilisateurs avec 7GHz de bande passante.

3.2. BER de Trois utilisateurs :

L'utilisateur 1 est le plus éloigné, car il est loin de la BS émettrice. L'utilisateur 3 est l'utilisateur proche. L'utilisateur 2 est entre les deux autres utilisateurs. Prenons D_f, D_n et D_i qui dénotent leurs distances par rapport à la BS. Nous avons choisi P_f=0.8dBm, P_n=0.15dBm, P_i=0.05 dBm et D_f=500m, D_i=200m et D_n=70, bande passante est 2.4 GHz avec P_f, P_n et P_i les puissances de l'utilisateur éloigné, proche et intermédiaire successivement. D_f, D_n et D_i la distance entre la BS et l'utilisateur éloigné, proche et intermédiaire successivement. Les résultats du BER-NOMA pour 3 utilisateurs sont représentés par la **figure III.15**.

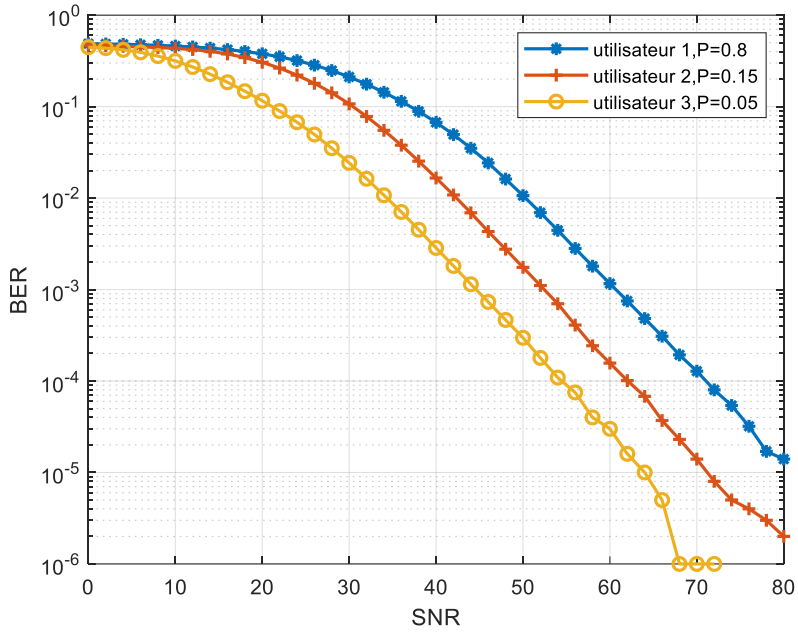

Figure III. 15 : Performances BER-NOMA pour trois utilisateurs.

La **figure III.15** représente une simulation en termes de BER pour un système NOMA à trois utilisateurs, on remarque que l'utilisateur 3 proche a un meilleur BER par rapport à l'utilisateur intermédiaire et éloigne.

3.3. Capacité NOMA :

Dans cette partie de simulation, nous allons étudier la capacité d'un système NOMA avec deux utilisateurs, nous avons choisi les paramètres suivants :

L'utilisateur 1 est le plus éloigné car il est loin de la BS émettrice. L'utilisateur 2 est l'utilisateur proche. Prenons D_f et D_n dénotent leurs distances par rapport au BS. Nous avons choisi P_f=0.75dBm, P_n=0.25 dBm et D_f =1000 m, D_n=500 m, et une bande passante de 2.4 GHz avec P_f et P_n les puissances de l'utilisateur éloigné et proche successivement, D_f et D_n la distance entre la BS et l'utilisateur éloigné et proche successivement. La capacité des deux utilisateurs est [38] :

$$C_n = log_2(1+\gamma 1) = log_2\left(\frac{1+(|h_1|2P_{\alpha 1})}{|h_1|2P_{\alpha 2}+\sigma_2}\right) \quad \text{III.4}$$

$$C_f = log_2(1+\gamma 2) = log_2\left(\frac{1+(|h_2|2P_{\alpha 2})}{\sigma_2}\right) \quad \text{III.5}$$

Ou : P : la puissance d'émission.

h_1 et h_2 : désignent le canal de la BS à l'utilisateur proche et distant respectivement.

α_1 et α_2 sont les facteurs d'allocation de puissance respectivement pour l'utilisateur éloigné et proche.

$\gamma 1$, $\gamma 2$: Le rapport signal sur bruit et interférence pour l'utilisateur éloigné et proche, respectivement.

σ^2 : la variance.

Les résultats de la capacité NOMA sont représentés par la **figure III.16**.

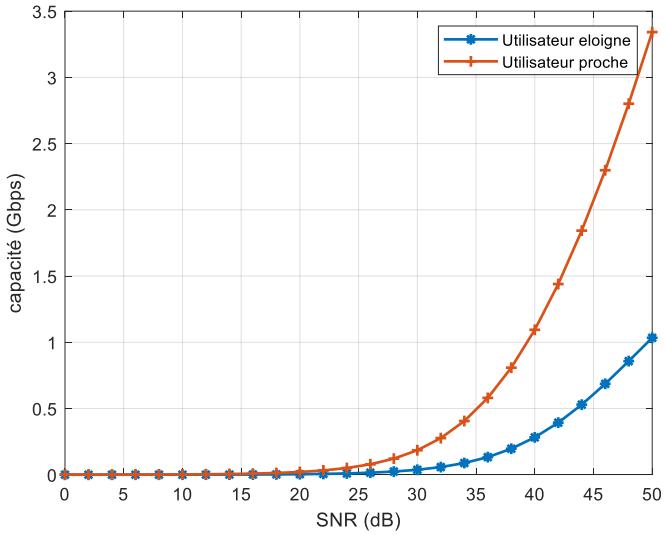

Figure III. 16 : Capacité NOMA deux utilisateurs.

D'après la **figure III.16** on remarque que la capacité des deux utilisateurs commence a augmenté à partir d'un SNR de 20 dB, et l'utilisateur proche a une grande capacité par rapport à l'utilisateur éloigné. L'utilisateur 1 a une capacité réalisable limitée en raison de l'interférence de l'utilisateur 2 (car l'utilisateur éloigné reçoit deux signaux, un de la BS et l'autre de utilisateur proche, cela provoque des interférences chez l'utilisateur éloigné). L'utilisateur 2 n'a pas ce problème parce que l'interférence est supprimée par SIC (successive interference cancellation). Si on utilise une bande passante de 7GHz. Les résultats de la capacité NOMA de deux utilisateurs pour 7GHz de bande passante, sont représentés par la **figure III.17**.

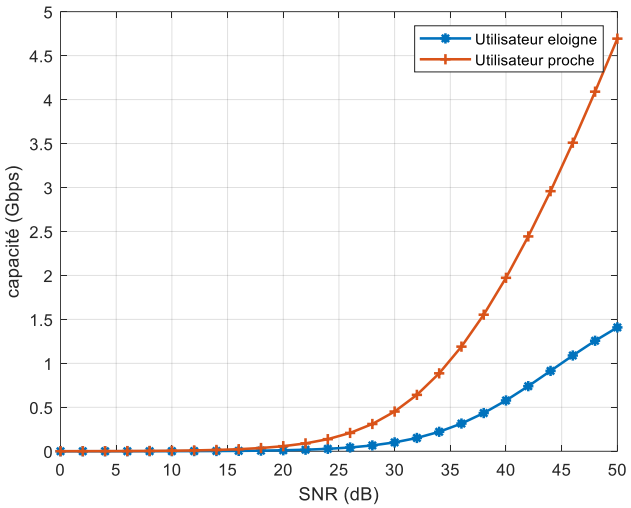

Figure III. 17 : Capacité NOMA de deux utilisateurs pour 7GHZ de bande passante.

4. Modulation OFDM-QAM d'ordre supérieur :

Dans cette partie, nous allons étudier théoriquement l'influence de l'augmentation de l'ordre de modulation QAM sur le BER dans un système OFDM, sans considération des pertes de trajet.

Pour la 6G, et pour avoir des meilleures performances, il faut implémenter des modulations d'ordre supérieur. La contrainte ici sont les dégradations matérielles telle que le bruit de phase, non linéarité des amplificateurs, oscillateurs…etc. dans cette simulation, nous avons choisis l'OFDM à cause des bandes de fréquences larges qui permet de lutter contre la sélectivité en fréquence du canal, mais tout dépend de la fréquence porteuse surtout pour les ondes millimétriques.

Tableau III. 2: paramètre de simulation d'ordre supérieur.

Paramètres	
la fréquence de la porteuse	140 GHz
Bande passante	2,4 GHz
Taille de la trame	10^5 bit
Configuration d'antennes	SISO
Type de Canal	AWGN
Défaillance matériel	Sans
Canal de propagation	Non considéré

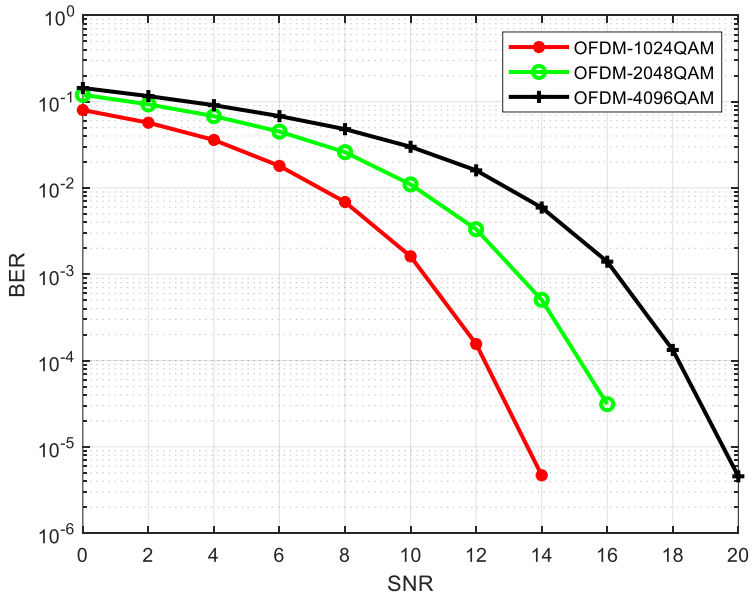

Figure III. 18 : Performance BER pour modulations d'ordre supérieur QAM.

La **figure III.18** montre que, les meilleures performances sont obtenues pour la 1024-QAM, et qu'on augmentant l'ordre de modulation, la qualité de la transmission diminue à cause du BER élevé (la sensibilité des modes d'ordre supérieurs). Les performances des modulations QAM d'ordre supérieur en termes de FER et débit sont illustrées par les **figures III.19 et III.20**.

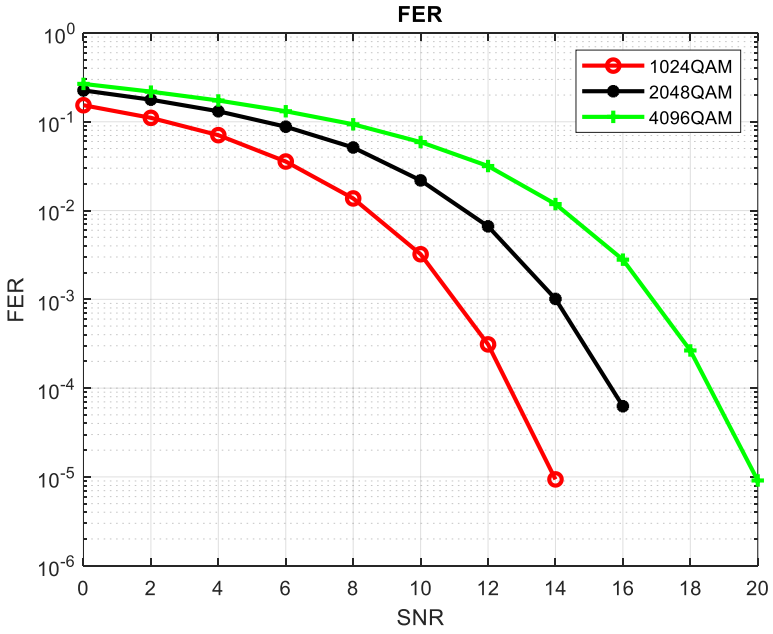

Figure III. 19 : Performance FER pour modulations d'ordre supérieur QAM.

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence de l'augmentation de l'ordre de modulation QAM sur le Débit.

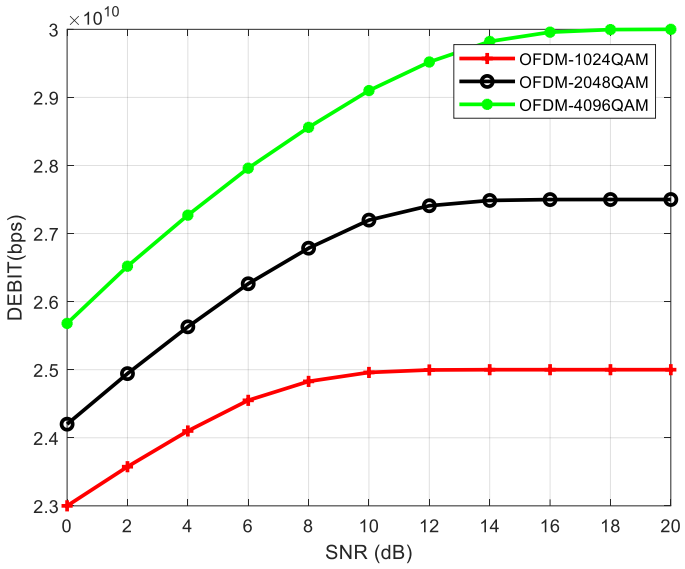

Figure III. 20 : Performance en termes de débit pour les modulations QAM d'ordre supérieur en OFDM.

La **figure III.20** montre que, le meilleur débit est obtenu avec l'ordre de modulation 4096-QAM, c.-à-d. qu'on augmentant l'ordre de modulation, on obtient un débit meilleur (30Gb/s pour 4096-QAM, pour une bande passante de 2,4GHz), par contre la pénalité est l'augmentation de l'influence du bruit sur les différentes sous-porteuses qui augmente le BER et aussi le PAPR (grande consommation de l'énergie).

5. Comparaison entre OMA / NOMA :

5.1. BER OMA/NOMA :

Dans cette partie nous allons effectuer une étude comparative en termes de BER entre les technique OMA (OFDM) et NOMA (nous avons considéré juste l'utilisateur proche). Nous avons choisi la modulation QPSK, et une bande passante de 2.4GHz, et fréquence porteuse de 140GHz [39]. Les résultats de cette simulation sont présentés par la **figure III.21** :

Tableau III. 3: paramètre de simulation OMA/NOMA.

Paramètres	
la fréquence de la porteuse	140 GHz
Bande passante	2,4 GHz
Nombre de sous porteuses	128
Synchronisation	Idéale
Type de canal	AWGN
Nombre d'utilisateurs	2
Puissance allouée à utilisateur proche	0,25 W
Puissance allouée à utilisateur éloigné	0,75 W

A noter que la courbe NOMA est celle l'utilisateur proche.

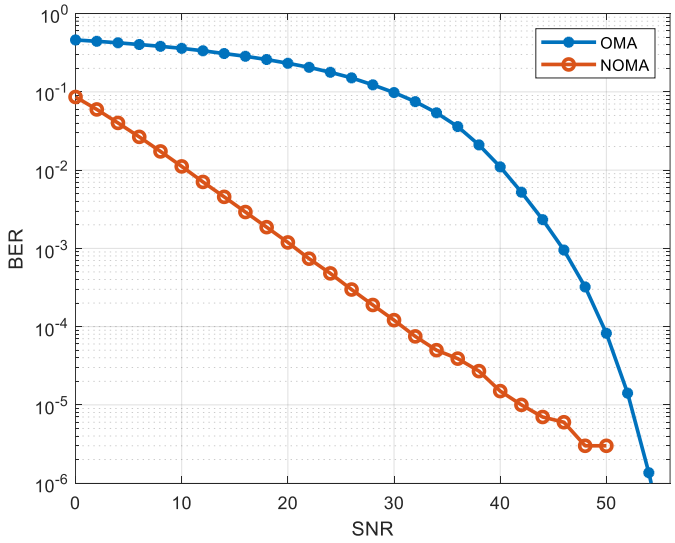

Figure III. 21 : Comparaison BER entre OMA / NOMA.

D'après **la figure III.21,** on voit que la technique NOMA donne des meilleures performances en termes de BER par rapport à la technique OMA, parce que pour la OMA, chaque utilisateur exploite des ressources de communication orthogonales dans un intervalle de temps, une bande de fréquences ou un code spécifique (pour la technique CDMA), afin d'éviter des interférences d'accès multiples. Cela provoque des interférences entre les différents utilisateurs, et un BER élevé. Par contre pour la NOMA, plusieurs utilisateurs peuvent utiliser simultanément des ressources non orthogonales en fournissant une efficacité spectrale élevée (moins d'interférences entre utilisateurs), tout en permettant un certain degré d'interférence d'accès multiple au niveau des récepteurs.

5.2. Capacité OMA/NOMA :

Dans cette partie nous allons fait une étude comparative en termes de la capacité entre les technique OMA et NOMA, avec les mêmes paramètres de l'étape précédente. La capacité d'un système OMA, NOMA est calculée par [38] :

$$C_{OMA} = (1-\beta) * log_2\left(1 + \frac{\alpha_m \rho}{1-\beta} * (|h_m|^2)\right) \quad \text{III.6}$$

$$C_{NOMA} = log_2\left(1 + \frac{\alpha_m \rho\, |h_m|^2}{1 + \alpha_n \rho\, |h_m|^2}\right) \quad \text{III.7}$$

Nous avons obtenu les résultats de **la figure III.22** :

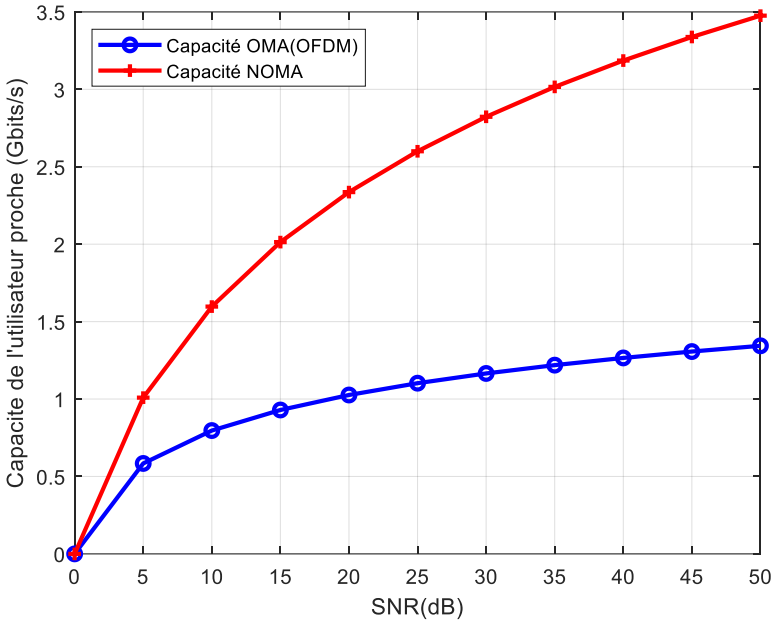

Figure III. 22 : Comparaison BER entre OMA / NOMA.

D'après la **figure III.22,** on peut voir que la capacité de la technique NOMA est plus grande que la capacité OMA (NOMA atteint 3.5 Gbs, par contre la technique OMA a atteint 1.4Gbs), parce que la technique OMA consiste à partager la bande passante ou l'intervalle de temps entre les différents utilisateurs, ce qui implique une petite capacité. Alors que la technique NOMA consiste a utilisé toute la bande passante pour tous les utilisateurs avec un partage de puissance différent, ce qui donne une grande capacité. Les réseaux de communication 6G satisferont les exigences des utilisateurs en matière de haut débit de données sans aucune interruption du réseau. Pour assurer ces performances les chercheurs pensent aux nouvelles améliorations de la technique NOMA, parmi ces améliorations [37] :

- Nouvelle combinaison entre NOMA et les techniques d'antennes multiples.
- Apprentissage automatique pour NOMA.
- Nouvelle étude pour les réseaux NOMA massifs intelligents pour la 6G.

6. Bandes de fréquence de la B5G et 6G :

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence de l'augmentation de la fréquence porteuse et la distance sur les pertes du trajet (path loss). Dans ce cadre, on a évalué les pertes du trajet en espace libre en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur pour des fréquences envisagées pour les prochaines générations (B5G et 6 G). La **figure III. 23,** montre les résultats obtenus.

L'étude en propose d'explorer de nouvelles formes d'onde en bandes de fréquences entre 60 GHz et 300 GHz qui offrent des capacités optimales en termes de bandes passantes. Ces bandes de fréquence sont proposées pour l'utilisation pour les réseaux de nouvelles générations (B5G et 6 G) [39]. Pour une transmission dans l'espace libre, l'atténuation des signaux augmente proportionnellement avec la fréquence.

Perte de trajet en espace libre :

L'affaiblissement sur le trajet en espace libre FSPL (Free-Space Path Loss) est l'atténuation de l'énergie radioélectrique entre les points d'alimentation des deux antennes à travers l'espace libre (généralement de l'air), exprimée sous forme de rapport de puissance. Le FSPL peut être calcule à partir de la formule de 'Friis' pour une transmission en espace libre en visibilité directe. La perte de trajet d'un signal entre deux antennes isotropes en espace libre est donnée par :

$$PL = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \qquad \text{III.8}$$

Ou d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, exprimé en mètre (m), et PL en dB. La **figure III.23** montre les résultats obtenus.

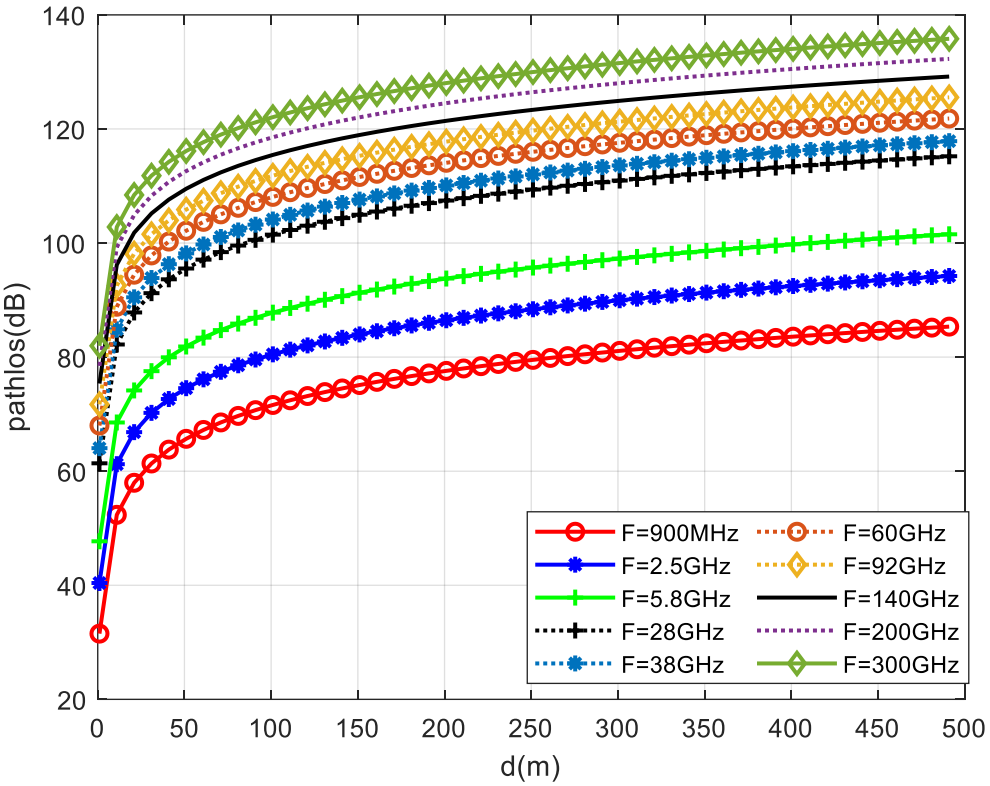

Figure III. 23 les pertes de trajet pour différentes fréquences porteuses.

D'après la **figure III.23,** il est évident que les pertes de trajet augmentent en fonction de la distance ; par exemple pour une fréquence de 140 GHz, nous avons à 250 mètre des pertes de 125 dB ; par contre pour une fréquence de 60 GHz, nous avons à 250 mètre des pertes de 118 dB. Ces pertes sont causé par la fréquence haute qui implique une longueur d'onde très courte, c.-à-d. que l'onde est affectée par n'importe quel obstacle et les différents phénomènes qui existent dans la transmission (réflexion, réfraction, absorption,…).

Dans le contexte de la 6G, les bandes envisagées tels que 90 GHz et 140 GHz ont des pertes de trajet très grande, ce qui les rend idéale pour les communications dans des micros cellules de quelque mètres [39], ou dans des réseaux Peer-to-Peer décentralisées.

7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié les performances des techniques multi-porteuses, leurs points forts et points faible. On conclut que la technique DFT-s-OFDM est la meilleure technique en termes de PAPR et BER suivie par la technique CP-OFDM, ce qui explique l'utilisation de la technique DFT-s-OFDM dans la liaison montante de la 5G (faible consommation d'énergie). Après nous avons étudié la technique NOMA qui est candidate pour les prochaines générations, ainsi qu'une comparaison entre NOMA et OMA. La technique NOMA a plusieurs avantages par rapport à la technique OMA, principalement en termes de capacité et de BER.

L'utilisation d'un ordre d'antenne important afin de maximiser le rapport signal sur bruit, permet de combattre les distorsions et les bruit subis par le signal lors de la transmission, ce qui permet d'améliorer d'une façon très importante les performances d'un tel système.

L'utilisation des ondes millimétriques dans la 6G provoque des pertes de transmission plus importante (perte de trajets), cela oblige l'utilisation des bandes de fréquence inférieure à 6 GHz (FR1) pour couvrir des distances plus grandes que celle couverte par les ondes millimétriques. Et aussi l'utilisation des techniques beamforming, beamstreaming et les antennes intelligentes nous permet de combattre d'une manière efficace les effets des pertes de trajet et aussi les interférences entre les différentes antennes, car le rayonnement des antennes devient très directif, donc on n'a pas besoin d'isolation parfaite entre les antennes.

Conclusion Générale :

Après le travail effectué dans ce mémoire, nous avons réussi à approfondir et améliorer nos connaissances dans le domaine des réseaux mobiles cellulaires en particulier la 5G et B5G, et surtout les modulations multi-porteuses qui sont venu dans le but d'annuler le phénomène de la sélectivité en fréquence causé par les canaux à trajets multiples.

La nécessité de l'amélioration des taux de transmission de données (débits), toujours pousse les chercheurs dans le domaine des communications mobile à améliorer continuellement les performances des systèmes de communication existants, et faire des études approfondies pour des solutions meilleures dans les futures normes.

Dans le premier chapitre, nous avons mis en évidence certains des nouveaux services et leurs catalyseurs technologiques qui devraient représenter le cœur des réseaux de prochaine génération (B5G et 6G), nous avons donc cité quelques techniques et technologies candidates pour la prochaine génération et les objectifs de chercheurs pour améliorer la 5G et proposer de nouveaux services aux utilisateurs.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié plusieurs types de modulation multi-porteuse, en particulier les modulations FBMC qui offrent une résolution spectrale plus élevée ainsi qu'une meilleure efficacité, et exigent seulement une petite augmentation de la complexité de calcul par rapport à l'OFDM. Les signaux DFT-s-OFDM ont les meilleures propriétés du point de vue énergétique, comparé aux signaux OFDMA, c'est la raison principale du choix du DFT-S-OFDM pour les transmissions Uplink (liaisons montantes) en 5G-NR.

La technique NOMA est la technique clé pour les réseaux future, elle est également compatible avec les systèmes de communication actuels et futurs car elle ne nécessite pas de grandes modifications sur l'architecture existante.

BIBLIOGRAPHIES

[1] Dr Slimani, ‘’ Cours de réseau de la 5éme génération, les cinq objectifs de la 5G’’, DEPARTEMENT : Electronique, Université d’Alger, Algérie, Mars 2020.

[2] S.Sébastien, "Les Enjeux De La 5G, " ARCEP, 2017.

[3] Sassan Ahmadi, "5G NR_ Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3gpp New Radio Standards," Academic Press, Elsevier, Paris, France, no. 50-1/2, pp. 86 , 2019.

[4] Dahlman, Erik, Stefan Parkvall, and Johan Skold, "5G NR: The next generation wireless access technology, " Academic Press, Elsevier, Paris, France, 2018.

[5] A. Bazin, "Massive MIMO for 5G Scenarios with OFDM and FBMC/OQAM Waveforms," INSA de Rennes, France, 2018.

[6] P. Banelli, et al., "Modulation Formats and Waveforms for 5G Networks: Who Will Be the Heir of OFDM?: An overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency," in IEEE Signal Processing Magazine, vol. 31, no. 6, pp. 80-93, Nov 2014.

[7] Maha, Ben Zid, and Raoof Kosai. "Multi User MIMO Communication: Basic Aspects, Benefits and Challenges," Proceedings of Recent Trends in Multi-user MIMO Communications, Algérie, 2013.

[8] Khouloud Issiali, "Study of smart antennas and MU-MIMO techniques for indoor radio engineering and planning tools," Electronics. INSA de Rennes, France, 2015.

[9] “Contributeurs de Wikipédia’’, MIMO (télécommunications), Wikipédia, L'encyclopédie libre, 29 juillet 2020. Web. 29 juillet 2020.

[10] Jean-Yves Chouinard. "Théorie et pratique des codes correcteurs, " Département de génie électrique et de génie informatique, Université de Laval, Canada, 2013.

[11] E. Calvanese Strinati et al., "6G: The Next Frontier: From Holographic Messaging to Artificial Intelligence Using Subterahertz and Visible Light Communication," in IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 14, no. 3, pp. 42-50, Sept 2019.

[12] K. David and H. Berndt, "6G Vision and Requirements: Is There Any Need for Beyond 5G?," in IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 13, no. 3, pp. 72-80, Sept 2018.

[13] Ratliff, M. John, "5G Evolution and 6G," NTT DoCoMo, January 2020.

[14] Korichi Khaled et Moussaoui Salah Eddine, "Analyse des performances de FBMC dans un système de transmission sans fil, " Mémoire de Master, Département Electronique, Université d’El oued, Algérie, 2019.

[15] Bendahmane Amira Meriem et Ghermoul Rania," Etude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC," Mémoire de Master, Département Electronique, Université de Tlemcen, Algérie, 2018.

[16] Rapport technique : National instruments, New Radio, URL : https : //www.ni.com/en-lb/innovations/wireless/5g/new-radio.html, Consulté le 14 Avril 2020.

[17] D. Shah, B. Rindhe, and S. Narayankhedkar, "Effects of cyclic prefix on OFDM system," in Proceedings of the International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology, pp. 420-424, 2010.

[18] Rapport technique : Ericsson, URL : https://www.ericsson.com/en/blog/2017/5/in-the-race-to-5g-cp-ofdm-triumphs, consulté le 12 Avril 2020.

[19] Geneviève Baudoin, et al, "Radiocommunications Numériques - Principe, Modélisation et Simulation," Tome 1. Dunod, Radiocommunications Numériques, ISBN : 978-2-10-059513-6, Paris, France, 2002.

[20] P. KADIONIK, J. ENSEIRB, R. Bordeaux, "BASES DE TRANSMISSIONS NUMERIQUES Les modulations numériques," Paris, France, 2000.

[21] Yvon Sosthène YAMEOGO, " Etudes de nouvelles techniques d'estimation et d'égalisation de canal adaptées au système SC-FDMA. Traitement du signal et de l'image, " Université Rennes 1, France, 2011.

[22] J. Mendeiros, "Identification des signatures des signaux radiomobiles,", Conservatoire National Des Arts & Metiers Paris, France, 2017.

[23] M. BOUDAA, Y. MEHDAOUI, and LAKHLAI, "L'efficacité des Techniques de Transmissions des Données A Très Haut Débits pour la 5G,", REVUE DE L'ENTREPRENEURIAT ET DE L'INNOVATION , vol. 2, no. 6 , 2019.

[24] Xiang, Wei Zheng, Kan Shen, Xuemin Sherman,'' 5G mobile communications'' ,Springer, ISBN 978-3-319-34208-5, Berlin, Allemagne, 2016.

[25]بوجلخة الدين ع., et al " Analyse des performances de F-OFDM,", Mémoire de Master, Département Électronique, Université d'El oued, Algérie, 2019.

[26] Abdullah Ahmed Nadji, et al, "Anlysis of out of band emission reduction for 5G wireless communications," Soutenu à TAIZ, Universite de TAIZ-Yemen, 2017.

[27] Nicola Michailow, Maximilian Matthé, Ivan Gaspar, "Generalized frequency divisionmultiplexing for 5th generation cellular networks," IEEE transactions on communications, 2014.

[28] Iftikhar Rachid, Meisam Khalil Armandi, Moneeb Gohar, "Opportunities in 5G Networks," Fei Hu, Première édition, ISBN 978-1-49873954-2, University of Alabama, USA, 2016.

[29] Kansal, Lavish and Gaba, Gurjot, "Survey of Filter Bank Multicarrier (FBMC) as an efficient waveform for 5G," International Journal of Pure and Applied Mathematics, vol. 5, no. 2, pp. 22-27, 2018.

[30] Parnika Kansal, Ashok Kumar Shankhwar," FBMC vs OFDM Waveform Contenders for 5G Wireless Communication System," Department of Electronics, School of Engineering, Harcourt Butler Technical University (HBTU), Kanpur, India , 23 October 2017.

[31] Rapport technique : Share Technote, URL : http://www.sharetechnote.com/, consulté le 20 Mai 2020.

[32] P. Kansal, A. Shankhwar, "FBMC vs OFDM waveform contenders for 5G wireless communication system,", Wireless Engineering and Technology, vol. 8, no. 4, pp. 59-70, 2017.

[33] O. OUASSIM and D. SALAHDINE, "Etude des performances de modulation UFMC Pour le réseaux 5G", Mémoire de Master, Département Electronique, Université d'El oued, Algérie, 2019.

[34] L. Zhu, Z. Xiao, X. Xia and D. Oliver Wu, "Millimeter-Wave Communications With Non-Orthogonal Multiple Access for B5G/6G," in IEEE Access, vol. 7, pp. 116123-116132, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935169, 2019.

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

[36] I. Van Bolo, and All, "Performance evaluation of spread spectrum-based multiple access combined with 5G filter-based multi-carrier waveforms," in IEEE Access, 11th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), Gold Coast, QLD, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSPCS.2017.8270475, 2017.

[37] O. Maraqa, and All, "A Survey of Rate-optimal Power Domain NOMA with Enabling Technologies of Future Wireless Networks," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, doi: 10.1109/COMST.2020.3013514, 2019.

[38] Rapport technique : Electronics and Communication, URL : https://ecewireless.blogspot.com/2020/04/how-to-simulate-ber-capacity-and-outage.html. Consulté le 5 août 2020.

[39] H. Tataria, and All, "6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities," proceedings of IEEE, arXiv preprint arXiv: 2008.03213, Vol.43, No. 5, pp.5-10, 2020.