REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : télécommunication Spécialité

Système de Télécommunication

Thème

Etude et analyse la performance des systèmes de communication ZP-OTFS pour le réseau mobile 5G

Présentés par :

- Melle. ROUBEHIE FISSA Nihad
- Melle. ZOULIKHA Loubna

Soutenance publiquement le : 24/06 /2025. Devant le jury composé de :

. Mr. GUEDMANI Mohamed	Président
. Mr. LACHENANI Sid-Ahmed	Examinateur
. Mr. KROBBA Ahmed	Promoteur

Année universitaire 2024/2025

Remerciement

Avant toute chose, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous souhaitons remercier chaleureusement notre encadrant Dr ***A. KROBBA*** *pour son accompagnement précieux, sa disponibilité, ses conseils éclairés, ainsi que pour la confiance qu'il nous a accordée tout au long de cette recherche.*

Nous adressons également nos remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font d'évaluer ce mémoire, et pour leurs observations constructives.

Nous sommes infiniment reconnaissants envers nos familles, en particulier nos parents, pour leur amour, leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants. Leur présence a été une source de motivation inestimable dans les moments difficiles.

À nos amies et collègues, merci pour votre aide, vos mots d'encouragement, et les moments de détente partagés, qui ont rendu ce parcours plus agréable.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

*Je remercie **Allah**, Le Tout-Puissant, pour m'avoir donné la force, la patience et la santé pour accomplir ce travail.*

Je dédie ce modeste travail à

Mon père RABAH, et ma mère HAKIMA, pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices silencieux, votre patience et votre soutien dans toutes les étapes de ma vie. Que Dieu vous protège et vous accorde santé et bonheur.

Mes frères RIYAD, AMINE, WAIL. Bien plus que des frères, ils ont rempli ma vie de protection, de tendresse et de réconfort.

Par leur présence et leur soutien, l'absence d'une sœur ne s'est jamais fait sentir.

À celui que je garde dans un coin secret de mon cœur, pour son soutien invisible.

Je dédie également ce travail à ma précieuse binôme Loubna, pour sa patience et tous les moments partagés durant ce parcours. Merci pour ton engagement et ta belle amitié.

Mon encadreur Mr KROBBA, pour *sa disponibilité, ses conseils tout au long de ce travail.*

Et enfin à tous ceux qui me sont chers et qui m'ont aidé de près et de loin.

Nihad

Dédicace

À moi-même,

Pour avoir tenu bon malgré les doutes, le stress, les moments de découragement et les longues nuits sans sommeil.
Pour chaque étape franchie, chaque erreur surmontée, chaque larme essuyée en silence.
Tu t'es battue, tu n'as rien lâché, et aujourd'hui tu arrives au bout. Sois fière de toi.

À mes parents,

Merci pour votre amour inconditionnel mes chères parents MOHAMED et YAMINA, vos sacrifices que personne ne voit, vos prières qui m'ont accompagnée dans chaque étape. Vous êtes ma plus grande force, ma sécurité, mon repère, Que dieu vous protège.

À ma famille,

Merci pour votre soutien, vos encouragements et votre confiance mes sœurs d'amours « MAHDJOUBA », « NABILA », « SABRINA », « FELLA et FAIROUZ » et ma petite « AYA » et mes tentes « DJAMILA » et « FARIDA ». Vous avez toujours cru en moi, même quand je doutais.

À mes amies sincères,

Merci pour votre présence, vos mots simples mais puissants, vos « t'inquiète, ça va passer ».
À ma binôme et sœur de cœur ***« NIHAD »*** *Merci d'avoir été à mes côtés dans chaque étape, dans chaque doute, chaque sourire, chaque stress.*

À mon encadrant et à tous mes enseignants,

Un merci du cœur à monsieur « krobba » pour sa bienveillance, sa patience et son soutien tout au long de cette belle aventure. Votre accompagnement a compté plus que vous ne l'imaginez.

Loubna

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude approfondie du système ZP-OTFS (Zero-Padding Orthogonal Time Frequency Space), une technique de modulation émergente conçue pour faire face aux limitations des systèmes conventionnels dans des environnements de propagation hautement dispersifs. L'objectif principal est d'analyser les performances de ce système dans le contexte exigeant des réseaux 5G, en mettant l'accent sur sa robustesse face aux canaux à fading sélectif tels que Rayleigh et Rician. À travers des modélisations mathématiques rigoureuses et des simulations numériques, nous démontrons que le ZP-OTFS offre une amélioration significative du taux d'erreur binaire (BER) et garantit une transmission plus fiable, ce qui en fait une solution prometteuse pour les futures générations de communications sans fil.

Mot clé : ZP-OTFS, BER, canal AWGN, Canal Rayleigh, Canal Rician

Abstract.

This thesis focuses on the in-depth study of the ZP-OTFS (Zero-Padding Orthogonal Time Frequency Space) system, a novel modulation technique designed to address the limitations of conventional systems in highly dispersive propagation environments. The primary goal is to analyze the performance of this system in the challenging 5G network context, with a particular focus on its robustness against selective fading channels such as Rayleigh and Rician. Through rigorous mathematical modeling and numerical simulations, the results demonstrate that the ZP-OTFS system significantly improves the bit error rate (BER) and ensures more reliable transmission, making it a promising solution for next-generation wireless communication systems.

Keyword: ZP-OTFS, BER, AWGN channel, Rayleigh channel, Rician channel

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل أداء أنظمة ZP-OTFS (Zero-Padding Orthogonal Time Frequency Space) OTFS ، التي تتميز بمتطلبات صارمة من حيث السرعة، الكفاءة، والموثوقية. يُعد نظامGضمن بيئة شبكات الجيل الخامس 5 من بين الحلول الحديثة والواعدة لمواجهة التحديات الناتجة عن القنوات اللاخطية وسريعة التغيّر، حيث يُمكّن من إرسال البيانات في نطاق الزمن-التردد بطريقة فعّالة. تم في هذه الدراسة التركيز على استخدام تقنية الحشو الصفري (Zero Padding) ، مع تحليل شامل لمختلف خصائص القناة، خاصة في البيئات ذات التغير الزمني OTFS لتحسين أداء نظام وأنظمة تقليدية أخرى من حيث معدل الخطأ ZP-OTFS الكبير. كما تم إجراء محاكاة عددية لمقارنة الأداء بين نظام يقدم أداءً متفوقًا من حيث مقاومة التداخل الزمني والتردد، مما يجعله ZP-OTFS واحتمالية الإرسال. أظهرت النتائج أن وما بعدها Gمرشحًا قويًا لتطبيقات الاتصالات المستقبلية في 5.

لكلمات الرئيسية: ZP-OTFS، قناةBER ، قناةAWGN ، Rayleigh،

Tables des matières

Remerciements.
Dédicace
Tables des matières
Listes des Abréviations
Liste des Figures
Liste des Tableaux

Introduction Générale ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre 1 : Généralité sur le système mobile

1.1 Introduction 3

1.2 Evolution de réseaux mobiles 3

1.2.1 Première Génération (1G) 4

1.2.2 Deuxième Génération (2G) 4

1.2.3. La norme GPRS (2.5G) ..... **Erreur ! Signet non défini.**

1.2.4 La norme EDGE (2.75G) 6

1.2.5 Troisième Génération (3G) 7

1.2.5.1 La norme UMTS 7

1.2.5.2 La norme HSPA (3.5G) 8

1.3 La quatrième génération (4G) 10

1.3.1.1 La norme LTE 11

1.3.1.2 La norme LTE-Advanced : 12

1.4 La cinquième génération (5G) 12

1.4.1 La normalisation du réseau 5G ..... **Erreur ! Signet non défini.**

1.4.2. Objectifs et caractéristiques de la 5G ..... **Erreur ! Signet non défini.**

1.4.3 Architecture du réseau 5G ..... **Erreur ! Signet non défini.**

1.4.4 Le réseau d'accès 5G……18

1.4.5 Le réseau cœur 5G……18

1.5 Conclusion……..19

Chapitre 2 Canaux de transmssion et techniques d'acces..... Erreur ! Signet non défini.

2.1 Introduction……..21
2.2 Les systèmes de transmission……21
2.3 Modèles de propagation dans les réseaux mobiles…….22
2.3.1 Propagation des Ondes Radio……..…….23
2.3.2 Atténuation de Parcours……23
2.3.3 Canal de Rayleigh……..……. 24
2.3.4 Le canal de transmission avec bruit blanc additif gaussien (AWGN)……..25
2.4 L'effet Doppler…….. …..25
2.4.1 Effet Doppler fréquentiel (changement de fréquence)…….25
2.4.2 : Retard Doppler (dans le temps, pour les signaux)……..…….……..26
2.5 Canaux de transmission 5G……..…….26
2.6 Techniques d'accès……..…… ….27
2.6.1 FDMA (Frequency Division Multiple Access)……28
2.6.2 TDMA (Time Division Multiple Access)…….29
2.6.3 CDMA (Code Division Multiple Access)……..……..30
2.6.4 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)……..…….31
2.6.5 SDMA (Space Division Multiple Access)……..……...32
2.6.6 Comparaison des techniques d'accès…….…… …..33
2.7 Variations des signaux SNR et BLR……..…….35
2.7.1 SNR (Signal to Noise Ratio)……..……35
2.7.2 BLR (Bit Loss Rate) ou aussi BER (Bit Error Rate)…….36
2.8 Limitations des systèmes de transmission dans les réseaux 5G……36
2.9 Conclusion…….……37

Chapitre.3 les techniques OTFS et ZP-OTFS……..38

3.1 Introduction……. 38
3.2 Format de Modulation OFDM…….……. 38
3.2.1 Notion d'Orthogonalité…….……..39
3.2.2Modulateur OFDM……..……40
3.2.3 Démodulateur OFDM……. 45
3.2.4 Limites de l'OFDM face aux canaux à variation rapide…….. 46
3.3 Présentation de la modulation OTFS…….…….47
3.3.1Format de Modulation OTFS…….…….. 48
3.3.2 Principe de fonctionnement de l'OTFS……..…….48
3.3.3Modulation des symboles dans le domaine retard-Doppler…….……50
3.3.4 Démodulation du signal……..…….51

3.3.5 Amélioration de l'OTFS par Zero Padding : la ZP-OTFs…… 52
3.3.5.1 Modulation ZP-OTFS……52
3.3.5.2. Transmission sur le canal……..……53
3.3.5.3 Démodulation ZP-OTFS……..……..53
3.3.5.4. Détection des symboles……....54
3.4 Architecture MIMO (Multiple Input Multiple Output)……54
3.4.1 Présentation de la technique MIMO…… ……55
3.4.2 Diversité Spatial MIMO……..…….55
3.4.3 Multiplexage Spatial MIMO ……56
3.4.4 Beamforming……56
3.4.5. Intégration de MIMO avec ZP-OTFS……57
3.5. Comparaison entre OFDM, OTFS et ZP-OTFS……57
3.6 Conclusion……..….58

Chapitre.4 Simulation et résultats…….59
4.1 Introduction……59
4.2 Langage utilisé……59
4.3 Objectifs de l'analyse……59
4.4 Méthodes d'analyse……60
4.5 Détails sur la simulation……60
4.6 Evaluation des résultats……61
4.6.1 La technique ZP-OTFS et effet des modulations PSK/QAM dans un canal AWGN…61
4.6.2 La performance de ZP-OTFS en canal Rayleigh avec modulations PSK……62
4.6.3 La performance de ZP-OTFS en canal Rayleigh avec modulations QAM……63
4.6.4 La performance de ZP-OTFS en canal Rician avec modulations PSK……64
4.6.5 La performance de ZP-OTFS en canal Rician avec modulations QAM……65
4.7 Conclusion……..….66
Conclusion Generale……...…… 70
Bibliographie

Liste des abréviations

1G : Première génération – Réseau mobile analogique.

2G : Deuxième génération – Numérique, avec SMS et appels.

3G : Troisième génération – Internet mobile et visiophonie.

4G : Quatrième génération – Haut débit mobile (LTE).

5G : Cinquième génération – Très haut débit, faible latence, IoT.

AMPS : Advanced Mobile Phone System – Système mobile analogique (1G).

NMT : Nordic Mobile Telephone – Ancien système nordique analogique (1G).

GSM : Global System for Mobile Communications – Norme mondiale pour les réseaux 2G.

CDMA : Code Division Multiple Access – Accès multiple par répartition en code.

UMTS : Universal Mobile Telecommunications System – Norme 3G en Europe.

HSPA : High Speed Packet Access – Accès haut débit par paquets.

HSUPA : High Speed Uplink Packet Access – Montée en liaison haut débit.

DC-HSPA : Dual Carrier HSPA – HSPA à double porteuse (meilleur débit).

LTE : Long Term Evolution – Évolution vers la 4G.

RAN : Radio Access Network – Réseau d'accès radio.

NG RAN : Next Generation RAN – Réseau radio de nouvelle génération (5G).

GNB : gNodeB – Station de base dans la 5G (équivalent d'eNodeB pour LTE).

SMS : Short Message Service – Message texte court.

MMS : Multimedia Messaging Service – Message multimédia.

GPRS : General Packet Radio Service – Transmission de données sur 2G/3G.

VoIP : Voice over IP – Voix sur IP (ex : WhatsApp call).

IMS : IP Multimedia Subsystem – Plateforme pour les services multimédias sur IP.

PDU : Protocol Data Unit – Unité de données de protocole.

UE : User Equipment – Équipement utilisateur (ex : smartphone).

MME : Mobility Management Entity – Gestion de la mobilité (4G).

HSS : Home Subscriber Server – Base de données d'abonnés.

PCEF : Policy and Charging Enforcement Function – Fonction de gestion de la politique et des frais.

5GC : 5G Core – Cœur du réseau 5G.

SBA : Service-Based Architecture – Architecture orientée services (5G Core).

API : Application Programming Interface – Interface de programmation.

NFV : Network Function Virtualization – Virtualisation des fonctions réseau.

SDN : Software Defined Networking – Réseau défini par logiciel.

LOS : Line of Sight – Ligne de visée (communication directe sans obstacle).

AWGN : Additive White Gaussian Noise – Bruit blanc gaussien additif.

FDMA : Frequency Division Multiple Access – Accès multiple par division de fréquence.

TDMA : Time Division Multiple Access – Accès multiple par division temporelle.

OFDMA : Orthogonal Frequency Division Multiple Access – Accès multiple par répartition orthogonale en fréquence.

SDMA : Space Division Multiple Access – Accès multiple par séparation spatiale.

SNR : Signal to Noise Ratio – Rapport signal/bruit.

BLR : Bit Loss Rate – Taux de perte de bits.

BER : Bit Error Rate – Taux d'erreur binaire

QPSK : Quadrature Phase Shift Keying – Modulation de phase en quadrature.

QAM : Quadrature Amplitude Modulation – Modulation en amplitude et phase.

16QAM : Modulation QAM avec 16 états – Débit plus élevé.

DFT : Discrete Fourier Transform – Transformée de Fourier discrète.

IDFT : Inverse DFT – Transformée inverse.

FFT : Fast Fourier Transform – Version rapide de la DFT.

IFFT : Inverse FFT – Transformée de Fourier inverse rapide.

CP : Cyclic Prefix – Préfixe cyclique (utilisé pour éviter les interférences).

ZP : Zero Padding – Remplissage par zéros.

COFDM : Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM avec codage.

ICI : Inter-Carrier Interference – Interférence entre sous-porteuses.

SFFT : Symplectic Finite Fourier Transform – Variante de la FFT utilisée dans OTFS.

OTFS : Orthogonal Time Frequency Space – Modulation pour canaux très dynamiques.

ZP-OTFS : OTFS avec Zero Padding – Variante d'OTFS avec padding pour amélioration.

ZP-OFDM : OFDM avec Zero Padding – Alternative au CP pour certaines applications.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers – Organisme de normalisation.

3GPP : 3rd Generation Partnership Project – Groupe de standardisation pour 3G, 4G, 5G.

TF : Time-Frequency – Temps-fréquence (espace de transmission en OTFS/MIMO).

Liste des Figures

Fig.1.1 : Evolution des systèmes de communications mobiles

Fig.2.2 : Architecture du réseau 2G

Fig.1.3 : Schéma d'architecture du réseau UMTS

Fig.1.4 : Architecture générale d'un réseau 4G

Fig.1.5 : Planification du processus de standardisation de la 5G

Fig.1.6 : Les exigences de la cinquième génération

Fig.1.7 : Architecture du réseau 5G

Fig.1.8 : distinction fonctionnelle entre NG-RAN et 5GC

Fig.1.9 : Pile protocolaire du NG-RAN

Fig.1.10 : Architecture du réseau 5G Core

Fig.2.1 : La différence entre un canal de transmission et un canal de propagation

Fig.2.2 : Schéma simplifié d'un système de transmission numérique

Fig2.3 : Propagation par Trajets multiples dans un Canal Radio Mobile

Fig.2.4 : Schéma illustrant l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA)

Fig.2.5 : Schéma illustrant l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA)

Fig.2.6 : Schéma illustrant l'accès multiple par répartition en code (CDMA)

Fig.2.7 : Schéma illustrant l'accès multiple par répartition orthogonale en fréquence (OFDMA)

Fig.2.8 : Schéma illustrant l'accès multiple par répartition spatiale (SDMA)

Fig.3.1 : Base Orthogonale en Temps

Fig.3.2 : Base Orthogonale en Fréquence

Fig.3.3 : Diagramme Fonctionnel d'un Modulateur OFDM

Fig.3.4 : Techniques d'Insertion de l'Intervalle de Garde (GI)

Fig.3.5 : Diagramme Fonctionnel d'un Démodulateur OFDM

Fig.3.6 : Chaine de transmission OTFS

Fig.3.7 : Passage du domaine temps\fréquence en Delai\Doppler

Fig.3.8 : Diagramme Fonctionnel d'un Modulateur OTFS

Fig.3.9 : Diagramme Fonctionnel d'un Démodulateur OTFS

Fig.3.10 : Utilisation de la transformée de Zak discrète

Fig.3.11 : L'équivalence entre transformée inverse de Zak et l'OTFS

Fig.3.12 : Diagramme fonctionnel d'un Modulateur ZP-OTFS

Fig.3.13 : Diagramme fonctionnel d'un Démodulateur ZP-OTFS

Fig.3.14 : Modèle MIMO

Fig.3.15 : Beamforming de l'UE

Fig. 4.1 : La technique ZP-OTFS et les modulations PSK/QAM dans un canal AWGN

Fig.4.2 : La technique OTFS et le canal Rayleigh avec modulations PSK

Fig.4.3 : La technique OTFS et le canal Rayleigh avec modulations QAM

Fig.4.4 : La technique OTFS et le canal Rician avec modulations PSK

Fig.4.5 : La technique OTFS et la performance du canal Rician avec modulations QAM

Listes des Tableaux

Tab.l.1 : L’évolution des différentes releases

Tab.1.2 : Les performances ciblées pour la 5G

Tab.2.1 : Comparatif des techniques d’accès multiple

Tab.3.1 : Longueur du CP pour différentes numérologies

Tab.3.2 : Comparaison entre OFDM, OTFS et ZP-OTFS

Introduction Générale

L'évolution rapide des technologies de communication sans fil a conduit à l'émergence de la cinquième génération de réseaux mobiles (5G), laquelle ambitionne de répondre à des exigences toujours plus élevées en matière de débit, de latence ultra-faible, de fiabilité accrue et de connectivité massive. Pour atteindre ces objectifs ambitieux, les schémas de modulation traditionnels tels que l'OFDM montrent certaines limites, notamment dans les environnements à forte mobilité où la variation rapide du canal nuit à la qualité de transmission. Dans cette optique, une nouvelle forme de modulation, connue sous le nom d'Orthogonal Time Frequency Space (OTFS), a récemment suscité un intérêt croissant. Contrairement aux approches classiques opérant dans les domaines du temps ou de la fréquence, OTFS effectue la modulation dans le domaine retard-Doppler, ce qui permet de mieux capter de manière plus efficace les caractéristiques du canal mobile. Cette approche innovante permet ainsi d'améliorer la résilience aux effets Doppler et à la sélectivité en fréquence, offrant une meilleure performance globale dans les environnements dynamiques. Afin d'optimiser davantage cette technique par l'intégration d'un préfixe nul (Zero Padding - ZP) dans les systèmes OTFS, désignée par ZP-OTFS, permet d'améliorer la structure du canal et donner une solution efficace pour éviter les interférences entre symboles et améliorer la structure des blocs de transmission. En intégrant un bourrage de zéros aux extrémités des blocs OTFS, il devient possible de simplifier la modélisation du canal et de réduire les effets de bord lors de la démodulation.

Ce travail s'inscrit dans ce contexte technologique plus avancé. Il vise à étudier et analyser les performances des systèmes ZP-OTFS dans un environnement 5G en mettant en évidence leur efficacité face aux limitations des techniques conventionnelles. Objectif principal de travail est de modéliser et évaluer les performances du ZP-OTFS en dans différents canaux de transmission tels que AWGN (White Gaussian Noise), Rayleigh et Rician. L'analyse portera notamment sur des critères tels que la robustesse au canal en fonction différents valeurs (SNR), le taux d'erreur binaire (BER), la complexité de traitement et l'adaptabilité aux canaux de transmission.

Ce mémoire sera décomposé en quatre chapitres.

- Le premier chapitre, comportera sur l'évolution des réseaux de communications mobiles et des généralités sur la technologie 5G,
- Le second chapitre mettant en lumière sa diversité de canaux physiques et de signaux, et leur rôle crucial dans la transmission optimale des données.
- . Le troisième chapitre, introduit en détail la technique OTFS, en expliquant son principe de fonctionnement, ses avantagés, et en approfondissant la version améliorée de ZP-OTFS.
- Le dernier chapitre, présente les simulations effectuées, accompagnées des résultats obtenus et d'une discussion sur les performances des systèmes étudiés.

Chapitre 1

Généralités sur les systèmes mobiles

1.1 Introduction

Les systèmes de communication mobiles ont profondément transformé notre manière de communiquer, d'échanger des informations et d'accéder aux services numériques. Depuis l'apparition des premières générations de réseaux cellulaires, ces systèmes n'ont cessé d'évoluer pour répondre à une demande toujours croissante en matière de débit, de couverture, de qualité de service. Dans ce contexte, la première partie de ce chapitre sera consacré à une présentation générale sur les différentes générations de réseaux mobiles, depuis les débuts de la 1G jusqu'aux promesses et aux défis de la 5G. La seconde partie portera sur les avancées technologiques clés des réseaux 5G.

1.2 Evolution de réseaux mobiles

L'histoire des réseaux de communication mobile a évolué à travers plusieurs générations, marquant des avancées technologiques majeures comme le montre la Figure 1.1. Initialement, la première génération (1G) utilisait des signaux radio analogiques, offrant des capacités de transmission vocale limitées. Vient ensuite la deuxième génération (2G) qui a introduit la transmission numérique via des normes comme le GSM, permettant des appels de meilleure qualité et l'émergence de services comme les SMS et l'itinérance internationale. La troisième génération (3G) a par la suite représenté un saut significatif avec des normes telles que l'UMTS et le CDMA2000, offrant des vitesses de transmission plus élevées et un support multimédia. Ultérieurement, la quatrième génération (4G) a consolidé ces progrès avec des réseaux entièrement IP, permettant des vitesses encore plus rapides et une explosion des services basés sur Internet. Ainsi, ces évolutions ont préparé le terrain pour la cinquième génération de réseaux mobiles, la 5G, promettant des avancées révolutionnaires en termes de vitesse et de fiabilité [1].

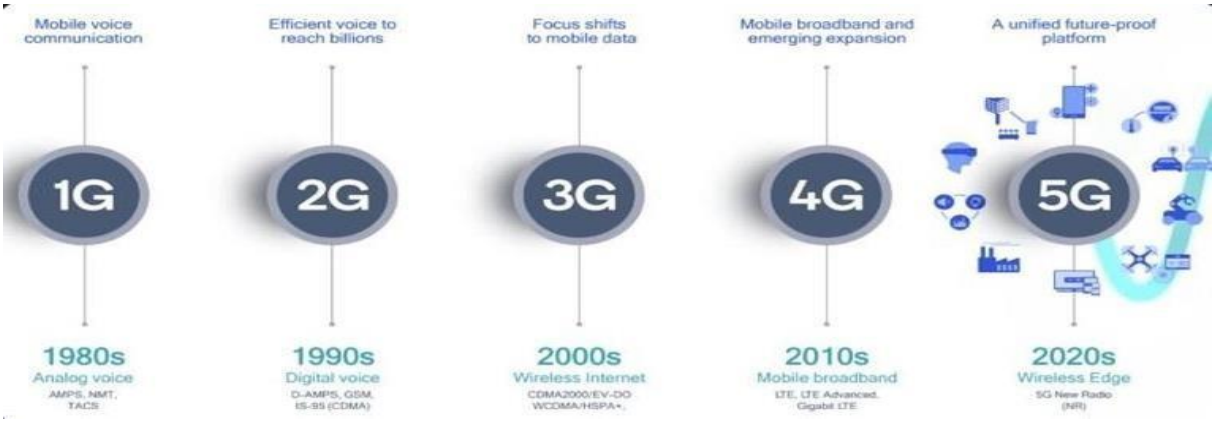


Fig.1.1 : Evolution des systèmes de communications mobiles

Avec des débits plus élevés et une connectivité ultra-fiable, la 5G ouvre la voie à de nouveaux cas d'utilisation comme l'Internet des objets et la réalité augmentée.

1.2.1 Première Génération (1G)

La première génération de réseaux mobiles, désignée par le terme 1G, a été introduite au début des années 1980 et reposait sur une technologie analogique. Elle permettait la transmission de signaux vocaux sous forme d'ondes continues, et était exclusivement dédiée aux communications téléphoniques. Les vitesses de transmission étaient très limitées, ne dépassant pas quelques kilobits par seconde, ce qui rendait impossible l'échange de données numériques.

Parmi les premiers systèmes 1G, on peut citer l'Advanced Mobile Phone Service (AMPS), lancé aux États-Unis en 1983, et le Nordic Mobile Téléphone (NMT), mis en service dès 1981 en Scandinavie. Ces réseaux ont constitué les premières infrastructures cellulaires commerciales, posant les bases de la téléphonie mobile moderne. Le système NMT, en particulier, se distinguait par sa volonté d'assurer l'interopérabilité entre plusieurs pays nordiques.

Malgré des performances limitées — notamment en termes de qualité audio, de sécurité des communications et de couverture réseau —, la 1G a marqué un tournant décisif. Elle a permis aux utilisateurs de communiquer en mobilité, sans recourir à une ligne fixe, et a ainsi amorcé la transition vers une nouvelle ère des télécommunications. Cette première étape a ouvert la voie aux générations suivantes, orientées vers la numérisation et l'enrichissement des services mobiles [2].

1.2.2 Deuxième Génération (2G)

La deuxième génération de réseaux mobiles, connue sous le nom de 2G, a été introduite au début des années 1990. Contrairement à la 1G, qui reposait sur une transmission analogique, la 2G a marqué le passage à la technologie numérique, permettant une amélioration significative de la qualité des communications, de la sécurité des transmissions et de l'efficacité du spectre radio.

Le premier système 2G à grande échelle fut le GSM (Global System for Mobile Communications), déployé initialement en Europe en 1991. Ce standard a rapidement été

adopté à l'échelle mondiale, grâce à son architecture ouverte, sa compatibilité entre pays et son support de l'itinérance internationale. D'autres standards numériques comme le CDMA (Code Division Multiple Access) ont également été développés, notamment en Amérique du Nord et en Asie. Outre l'amélioration de la communication vocale, la 2G a introduit des services de messagerie texte (SMS), permettant aux utilisateurs d'envoyer et de recevoir de courts messages écrits, ce qui a profondément transformé les usages des téléphones mobiles. Elle a également permis la transmission de données de faible débit, ouvrant la voie à des services tels que les MMS (messages multimédias), les sonneries personnalisées, ou encore les jeux mobiles simples. En termes de performances, la 2G offrait des vitesses de transmission allant jusqu'à 64 kb/s, suffisantes pour des communications vocales stables et des échanges de données élémentaires. Elle a également permis une meilleure gestion de l'énergie, prolongeant ainsi la durée de vie des batteries des téléphones portables, tout en permettant une miniaturisation plus poussée des appareils.

La généralisation de la 2G a marqué une étape majeure dans l'évolution des réseaux mobiles, en démocratisant leur usage et en les rendant accessibles à une population plus large. Ce tournant numérique a non seulement amélioré l'expérience utilisateur, mais a aussi posé les bases techniques nécessaires au développement des générations ultérieures, orientées vers l'Internet mobile et les applications multimédias [4].

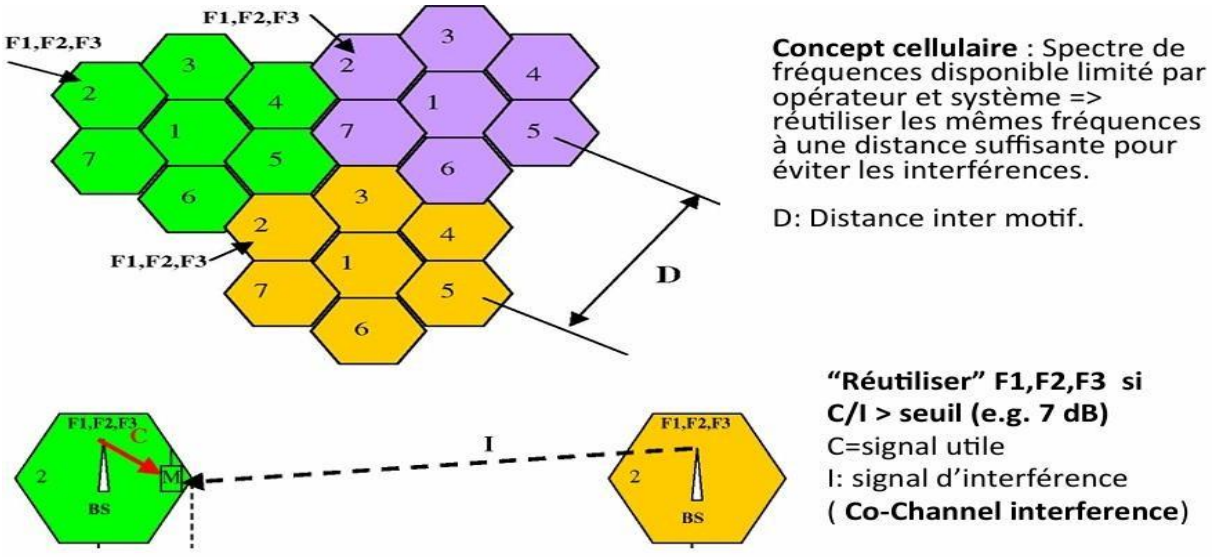


Fig.1.2 Architecture du réseau 2G

1.2.3 La norme GPRS (2.5G)

Le General Packet Radio Service (GPRS), souvent désigné comme la 2.5G, est une technologie de communication sans fil introduite en 2000. Reposant sur l'infrastructure des réseaux GSM, cette norme a marqué une étape intermédiaire entre la deuxième et la troisième génération de réseaux mobiles, en introduisant une capacité significative de transmission de données. Contrairement aux systèmes antérieurs fondés sur la commutation de circuits, GPRS adopte une commutation par paquets, une méthode qui consiste à diviser les données en unités appelées *paquets*. Ceux-ci sont ensuite envoyés séparément à travers le réseau et réassemblés à leur arrivée. Ce mode de transmission permet une utilisation plus rationnelle et dynamique de la bande passante, en allouant les ressources réseau uniquement lorsque des données sont transmises, ce qui améliore l'efficacité globale. La technologie GPRS permettait des vitesses théoriques allant jusqu'à 114 kbps, bien supérieures à celles de la 2G, bien que les débits réels observés dans les usages quotidiens étaient souvent inférieurs. Cette amélioration a ouvert la voie à une connectivité mobile plus riche, permettant l'émergence de nouveaux services tels que la navigation Internet, la messagerie instantanée et l'accès aux courriels depuis les téléphones portables. Ainsi, GPRS a constitué une avancée majeure en offrant aux utilisateurs une première expérience d'Internet mobile en continu, tout en préparant les fondations techniques et fonctionnelles à l'arrivée de la 3G [2].

1.2.4 La norme EDGE (2.75G)

La norme EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), souvent désignée comme 2.75G, représente une évolution du GPRS et constitue une étape intermédiaire vers la troisième génération (3G) des réseaux mobiles. Elle s'appuie sur l'architecture existante du réseau GSM, tout en apportant des améliorations notables en matière de transmission de données. Tout comme le GPRS, EDGE repose sur le principe de la commutation par paquets, mais elle introduit une modulation de phase plus performante, notamment la modulation 8PSK (8 Phase Shift Keying). Cette technique permet de transmettre un plus grand nombre de bits par symbole, ce qui se traduit par une capacité de transmission pouvant être jusqu'à trois fois supérieure à celle du GPRS. Grâce à ces améliorations, EDGE permet d'atteindre des débits théoriques allant jusqu'à 384 kbps, ouvrant la voie à des services multimédias avancés, tels que la navigation Internet, le streaming audio et vidéo, la messagerie

multimédia (MMS), ainsi que diverses applications nécessitant un débit plus élevé. En définitive, EDGE a joué un rôle clé dans l'évolution des réseaux mobiles, en renforçant les performances du GSM tout en préparant le terrain pour l'introduction de la 3G, orientée vers une connectivité mobile encore plus rapide et plus riche [5].

1.2.5 Troisième Génération (3G)

La troisième génération de réseaux mobiles, communément appelée 3G, marque une étape décisive dans l'évolution des technologies de communication sans fil. Introduite à la fin des années 1990, elle visait à dépasser les limitations de la 2G en proposant des débits de transmission de données nettement supérieurs, tout en ouvrant la voie à de nouveaux usages multimédias. La 3G a permis l'émergence de services innovants, tels que la vidéoconférence, la diffusion en continu de contenus audio et vidéo (streaming), ainsi que la navigation Internet fluide sur les appareils mobiles. Ces évolutions ont profondément transformé l'usage des téléphones portables, qui sont devenus de véritables plateformes numériques. Sur le plan technique, la 3G repose sur la commutation par paquets, une méthode qui segmente les données en petits blocs indépendants transmis sur le réseau de manière optimisée. Ce mode de transmission permet une gestion plus efficiente du spectre de fréquences, tout en facilitant le partage des ressources réseau entre plusieurs utilisateurs, ce qui contribue à réduire les coûts d'exploitation. Le terme « 3G » englobe un ensemble de technologies évolutives, parmi lesquelles on retrouve le UMTS (Universal Mobile Télécommunications System), le HSPA (High Speed Packet Access), ainsi que son amélioration HSPA+, qui ont progressivement amélioré les performances du réseau en termes de débit et de latence. En résumé, la 3G représente une avancée majeure en matière de mobilité, de connectivité et de services numériques, préparant le terrain pour les générations futures axées sur des expériences mobiles toujours plus riches et interactives [6].

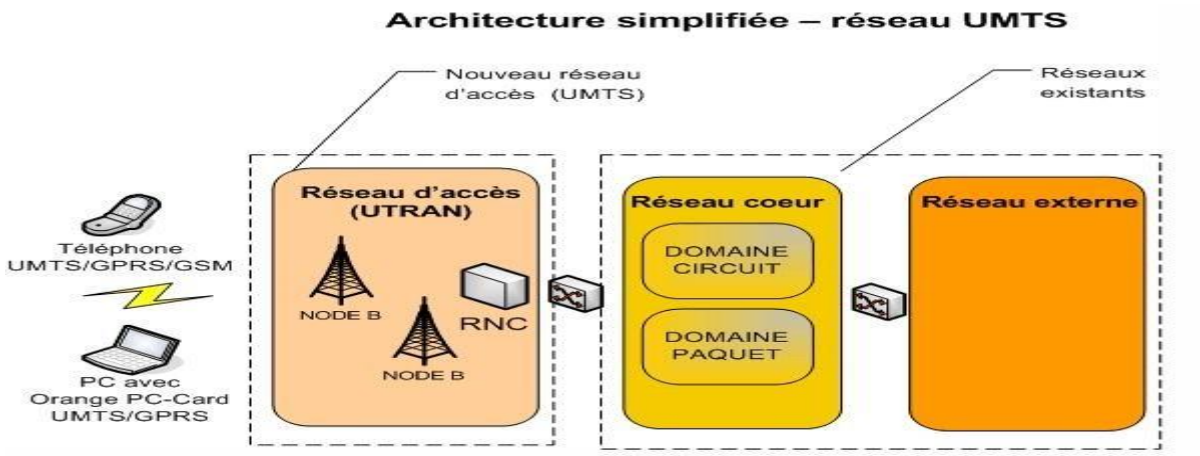


Fig.1.3 Schéma d'architecture du réseau UMTS (3G/3G+).

1.2.5 La norme UMTS

L'UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) constitue l'une des principales normes de la troisième génération (3G) de réseaux mobiles. Développée en Europe par le Groupe Spécial Mobile (GSM) dans le cadre de projets de recherche et de développement, cette norme s'est progressivement imposée à l'échelle mondiale. L'UMTS repose sur une technologie de commutation par paquets, permettant une transmission optimisée des données numériques sur le réseau. Il propose des vitesses de transfert pouvant atteindre 384 kbps en mobilité et jusqu'à 2 Mbps en position stationnaire, ouvrant ainsi la voie à des applications avancées telles que la vidéoconférence, la navigation Internet haut débit, le streaming vidéo ou encore la messagerie instantanée sur les terminaux mobiles. Contrairement aux réseaux 2G, l'UMTS est qualifié de réseau large bande, car il exploite des fréquences radio spécifiques, distinctes de celles utilisées par le GSM. Il utilise également une technique de modulation appelée étalement de spectre par séquence directe (DSSS). Cette méthode repose sur l'utilisation d'une large bande passante, de l'ordre de plusieurs mégahertz, pour transmettre des signaux de faible puissance, ce qui améliore la robustesse des communications face aux interférences et permet une meilleure qualité de service. En résumé, la norme UMTS a constitué un jalon technologique majeur dans l'évolution des réseaux mobiles, en introduisant une connectivité plus rapide, plus fiable et mieux adaptée aux usages multimédias modernes.

1.2.6 La norme HSPA (3.5G)

La norme HSPA (*High Speed Packet Access*) représente une amélioration significative de la technologie UMTS, et est souvent désignée sous les appellations 3.5G ou 3G+. Cette évolution a pour objectif principal d'augmenter les débits de transmission de données, tant

en téléchargement qu'en envoi, afin de répondre aux besoins croissants en bande passante des utilisateurs mobiles.

HSPA repose sur une modulation adaptative, ajustée dynamiquement en fonction de la qualité du canal radio. Cette adaptabilité permet une utilisation plus efficiente du spectre et une optimisation de la bande passante, ce qui se traduit par de meilleures performances globales du réseau.

La norme HSPA se compose de deux volets complémentaires :

- HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*), dédié à la liaison descendante, utilise la modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) et permet d'atteindre des débits allant jusqu'à 14,4 Mbps.
- HSUPA (*High-Speed Uplink Packet Access*), orienté vers la liaison montante, repose sur la modulation 16QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation) et offre des vitesses pouvant atteindre 5,76 Mbps.

Grâce à ces avancées, HSPA a considérablement amélioré l'expérience utilisateur en matière de navigation web, diffusion de contenu multimédia, et applications en temps réel, constituant ainsi une étape charnière vers les réseaux de quatrième génération (4G).

a) - La norme HSPA+ (3.75G)

La norme HSPA+ (*High-Speed Packet Access Plus*), également désignée sous les appellations 3.75G ou 3G++, représente une évolution avancée de la technologie HSPA. Elle a été développée dans le but d'offrir des débits de données encore plus élevés et une qualité de service optimisée, en repoussant les limites des performances du réseau 3G. L'une des principales innovations techniques introduites par HSPA+ est l'adoption de la modulation 64QAM (64 Quadrature Amplitude Modulation), qui permet de transmettre un plus grand nombre de bits par symbole par rapport à la modulation 16QAM utilisée dans HSUPA. Cette amélioration contribue à augmenter significativement le débit de données sur la liaison montante et descendante. Par ailleurs, HSPA+ intègre des technologies avancées telles que le MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), qui consiste à utiliser plusieurs antennes à l'émission et à la réception afin d'améliorer la capacité du réseau et la fiabilité des transmissions. [10] Grâce à ces améliorations, HSPA+ est capable d'offrir des vitesses de téléchargement allant jusqu'à 42 Mbps, et des vitesses d'envoi pouvant atteindre 11 Mbps. Ces performances accrues en font une technologie particulièrement adaptée aux applications

gourmandes en bande passante, comme le streaming haute définition, les jeux en ligne ou encore les services cloud mobiles. En somme, HSPA+ a permis de prolonger la durée de vie des réseaux 3G, tout en assurant une transition fluide vers la quatrième génération (4G), caractérisée par des performances encore supérieures et une connectivité plus étendue.

b) - La norme DC-HSPA+

La norme DC-HSPA+ (*Dual-Carrier High-Speed Packet Access Plus*) constitue une amélioration supplémentaire de la technologie HSPA+, visant à accroître significativement les débits de transmission de données dans les réseaux mobiles de troisième génération évolués. L'innovation majeure introduite par DC-HSPA+ réside dans la technique d'agrégation de porteuses (*Carrier Aggregation*), qui consiste à combiner deux porteuses HSPA+ distinctes pour la transmission simultanée des données. Cette agrégation permet ainsi de doubler la bande passante disponible, et par conséquent, d'augmenter considérablement la capacité de transmission sans modifier l'infrastructure de base du réseau.

En tirant parti de cette double porteuse, DC-HSPA+ est capable d'offrir des débits de téléchargement théoriques pouvant atteindre 84 Mbps, ce qui en fait l'une des solutions les plus performantes parmi les technologies pré-4G. Cette évolution répond aux exigences croissantes en matière de consommation de données, notamment pour les services multimédias, la vidéoconférence et les applications interactives. Par son efficacité et sa compatibilité avec les infrastructures existantes, DC-HSPA+ a représenté une solution transitoire efficace entre les réseaux 3G et les technologies de quatrième génération (4G), en améliorant considérablement l'expérience utilisateur tout en prolongeant la durée de vie des réseaux UMTS.

1.2.7 La quatrième génération (4G)

La quatrième génération (4G) désigne une avancée majeure dans l'évolution des technologies de réseaux mobiles, visant à répondre à la demande croissante en débit, en qualité de service et en connectivité universelle. Introduite à la fin des années 2000, la 4G se distingue principalement par ses performances nettement supérieures à celles des générations précédentes, en particulier en comparaison avec les réseaux 3G et 3G+. Conçue pour offrir des vitesses de transmission de données significativement plus élevées, la 4G permet des taux de téléchargement pouvant atteindre plusieurs centaines de mégabits par seconde, ainsi que des vitesses d'envoi de données accrues, facilitant l'utilisation

d'applications multimédias avancées, de services de streaming haute définition, de vidéoconférences en temps réel et de jeux en ligne. En plus de ses performances en matière de débit, la 4G se caractérise par une latence réduite, ce qui améliore considérablement la réactivité des services interactifs, et par une capacité réseau accrue, capable de gérer un plus grand nombre de connexions simultanées, même dans des environnements à forte densité d'utilisateurs. Par ailleurs, la 4G repose sur une architecture entièrement basée sur la commutation par paquets, permettant une intégration fluide des services voix, données et vidéo sur une seule infrastructure IP. Elle assure ainsi une meilleure qualité de voix (VoIP) et une optimisation de l'utilisation du spectre radio. En somme, la 4G marque une étape déterminante dans l'évolution des réseaux mobiles, en offrant aux utilisateurs une expérience enrichie et plus fluide, tout en préparant le terrain pour les technologies encore plus avancées de la cinquième génération (5G).

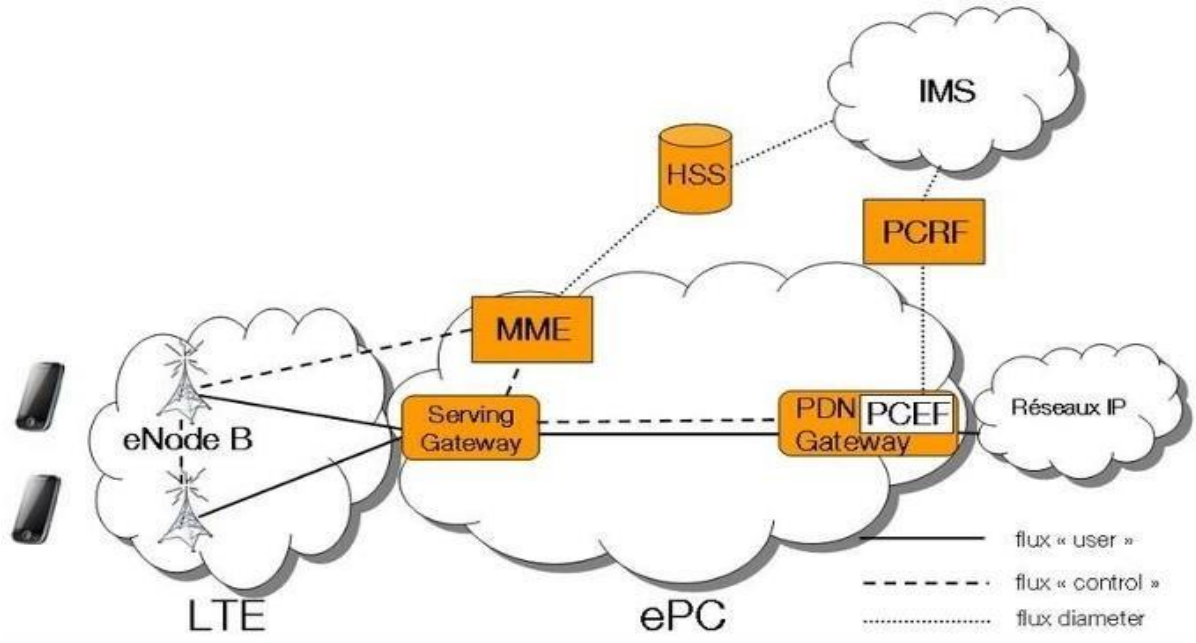


Fig.1.4 Architecture générale d'un réseau 4G

1.2.8 La norme LTE

La norme LTE (*Long Term Evolution*) représente la technologie clé des réseaux mobiles 4G, visant à offrir des débits de données beaucoup plus élevés et une qualité de service optimisée par rapport aux technologies précédentes, notamment celles de la 3G.

LTE repose sur l'utilisation de la modulation OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), une technique de transmission qui divise le signal en plusieurs sous-porteuses de fréquence, permettant ainsi une transmission simultanée sur plusieurs canaux, ce qui accroît l'efficacité spectrale et réduit les risques d'interférences.

Grâce à cette architecture, LTE permet d'atteindre des vitesses de téléchargement pouvant dépasser plusieurs centaines de Mbps, et offre une latence réduite, ce qui améliore considérablement les expériences utilisateur pour des activités telles que le téléchargement rapide de fichiers volumineux, le streaming de vidéos haute définition en temps réel et les jeux en ligne sans latence significative.

De plus, LTE a intégré la possibilité d'assurer des services voix via la technologie VoIP (*Voice over IP*) et des communications vidéo, telles que la vidéoconférence, garantissant ainsi une qualité de communication plus fiable et claire. Cette technologie est conçue pour répondre aux exigences croissantes des utilisateurs en matière de multimédia et de connectivité haut débit, tout en soutenant un grand nombre de connexions simultanées. En somme, LTE constitue un pilier fondamental de la 4G, permettant de réaliser une véritable révolution numérique en matière de télécommunication mobile, tout en ouvrant la voie à l'émergence de la technologie 5G.

1.2.9 La norme LTE-Advanced

LTE-Advanced (Long-Term Evolution-Advanced) représente une évolution significative de la technologie 4G LTE, introduite dans la Release 10 des spécifications du 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Bien qu'elle soit une extension de LTE, elle offre des performances améliorées en termes de débits de données, de capacité réseau, de couverture et de fiabilité, répondant ainsi aux besoins croissants des utilisateurs en matière de services multimédias et de haute vitesse.

Parmi les principales innovations de LTE-Advanced figurent l'agrégation de porteuses, qui permet d'augmenter la bande passante disponible, ainsi que le MIMO de haut ordre (Multiple- Input Multiple-Output), qui améliore l'efficacité de la transmission des données. En outre, la norme intègre des techniques telles que la coordination d'interférences entre cellules et la mise en réseau hétérogène, optimisant ainsi la gestion des ressources réseau et réduisant les pertes de signal.

En résumé, LTE-Advanced constitue une amélioration notable de la 4G LTE, en offrant

une expérience utilisateur plus fluide et plus rapide, tout en jetant les bases pour une transition vers la technologie 5G.

1.3 La cinquième génération (5G)

La 5G représente la cinquième génération des réseaux mobiles, et marque une avancée technologique majeure par rapport à la 4G LTE. Elle a été développée pour répondre aux besoins croissants en matière de connectivité et de transmission de données, en offrant des vitesses de téléchargement beaucoup plus rapides, une latence extrêmement faible, ainsi qu'une capacité de réseau considérablement améliorée. La 5G permet ainsi de connecter un nombre massif d'appareils tout en garantissant une performance de réseau optimale, même dans des environnements très denses.

La technologie 5G repose sur des innovations telles que l'utilisation des ondes millimétriques, qui permettent de transporter une plus grande quantité de données sur des fréquences plus élevées, mais aussi sur des techniques comme le Massive MIMO (Multiple-Input Multiple- Output) et la network slicing (partitionnement du réseau), qui permettent de gérer plus efficacement les ressources et d'offrir des services personnalisés et adaptés à différents types d'utilisateurs.

Outre les améliorations en termes de vitesse et de latence, la 5G permet également le déploiement de nouvelles applications dans des secteurs tels que l'automobile, l'industrie 4.0, la télémédecine et les villes intelligentes, offrant ainsi des possibilités presque illimitées pour l'Internet des objets (IoT) et les technologies émergentes. En résumé, la 5G constitue un pas décisif vers l'avenir de la connectivité mondiale, offrant des performances sans précédent pour la transmission de données et ouvrant la voie à des innovations révolutionnaires.

1.3.1 La normalisation du réseau 5G

a) - Le rôle de l'UIT-R : L'UIT-R assure l'utilisation équitable du spectre des fréquences radioélectriques, en évitant les brouillages, et élabore des normes techniques.

b) - Activités de standardisation : 3GPP est responsable de la normalisation des technologies mobiles (2G à 5G), en coordonnant les spécifications regroupées en releases. Release 14 et 15 pour la première phase de la 5G, Release 16 pour les marchés industriels, suivies des releases

17 (2021) et 18 (2022). Décisions techniques incluent : formes d'onde **(OFDM, SC-FDMA),** canaux de propagation (500 MHz à 100 GHz), codages (LDPC, polaire), espacement variable des porteuses.

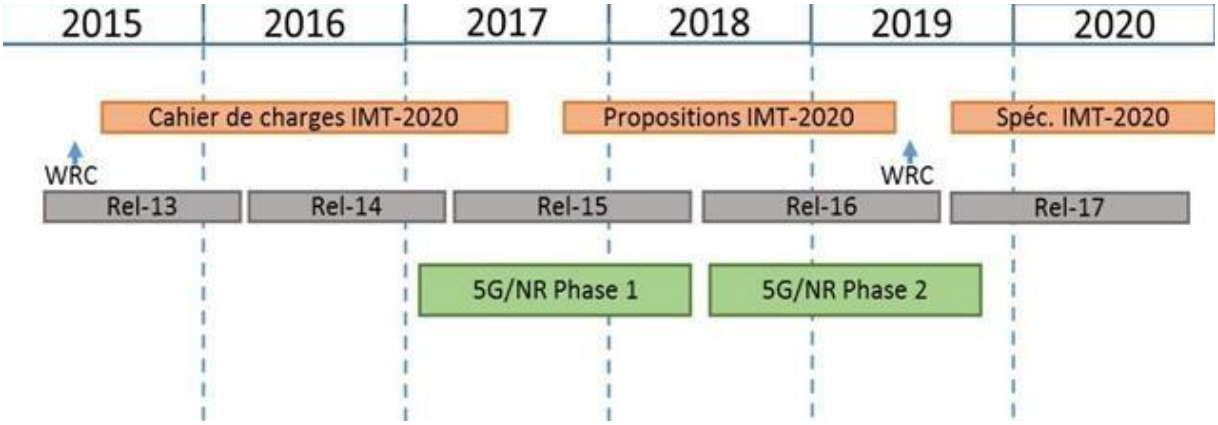


Fig.1.5 : Planification du processus de standardisation de la 5G

1.3.2 L'évolution de la 4G à la 5G

La transition de la 4G à la 5G ne se limite donc pas à une simple amélioration des performances : elle représente un changement de paradigme vers un réseau plus intelligent, plus réactif et mieux adapté aux exigences de la société numérique moderne. Elle ouvre la voie à de nouveaux cas d'usage dans des domaines aussi variés que la santé, l'automobile, ou encore les villes intelligentes. Dans le cas de la **4G (LTE)**, plusieurs releases ont été introduites à partir de la **Release 8**, considérée comme la première version stable de la 4G. Par la suite, les **Releases 9 à 14** ont permis des évolutions notables telles que l'agrégation de porteuses, le LTE-Advanced, la VoLTE (voix sur LTE), et des améliorations de latence et de débit. Ces releases ont également préparé le terrain pour une transition plus souple vers la 5G en introduisant des éléments de virtualisation et de gestion intelligente des ressources radio. La **5G**, quant à elle, a été initialement définie dans la **Release 15**, qui représente la première version des spécifications 5G NR (New Radio). Cette release a posé les bases de la 5G non autonome, où la 5G s'appuie sur le cœur de réseau 4G. La **Release 16** a ensuite introduit la 5G autonome, permettant un fonctionnement complet sur un cœur de réseau 5G. Les releases suivantes (**Release 17 et au-**

delà) continuent d'enrichir la 5G avec des améliorations sur le plan de l'efficacité spectrale, du support de l'IoT massif, de la communication ultra-fiable à faible latence (URLLC), et de l'intégration avec les réseaux industriels (5G pour l'industrie 4.0). Chaque release est donc bien plus qu'une simple mise à jour : elle reflète une stratégie d'évolution progressive et modulaire des réseaux mobiles, en intégrant des innovations technologiques tout en assurant la compatibilité avec les générations précédentes. L'évolution des différentes releases de la 4G et la 5G est présentée dans le Tableau 1.1.

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 a 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 de 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 (cout 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, Elévation 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 risques d'être retardées. Cela est dû au passage des réunions physiques aux réunions électroniques.

Tabl.1 : L'évolution des différentes releases

1.3.2 Objectifs et caractéristiques de la 5G

Le système de communication 5G nouvellement développé offre la promesse d'un accès illimité à l'information, de prendre en charge des technologies sans fil hautement performantes, et d'introduire des services commerciaux innovants. Les performances ciblées par ce nouveau standard, telles que définies dans le projet IMT-2020, sont détaillées dans le Tableau 1.2.

Paramètres	**Valeurs**
Débit maximum descendant	20 Gbits/s
Débit maximum ascendant	10 Gbits/s
Efficacité spectrale maximale dans le sens descendant	30Gbit /s/Hz
Efficacité spectrale maximale dans le sens descendant	15 bit/s/Hz
Trafic par unité de surface	10Mbit/s/m2
Temps de latence	1-4 ms
Densité de terminaux connectés	1 million/km2
Largeur de bande	100 Mhz-1 Ghz

Tableau 1.2 : Les performances ciblées pour la 5G

L'objectif majeur de cette technologie est la convergence des réseaux existants. Le réseau 5G est conçu comme un réseau hétérogène capable de prendre en charge une variété de standards, facilitant ainsi la configuration et la gestion automatique de nouveaux services. Un autre objectif essentiel de ce standard est la réduction de la consommation énergétique du système global. Cette diminution découlera de l'utilisation intensive d'outils logiciels pour mettre en œuvre les fonctions réseau et pour la création et la gestion des services applicatifs. La technologie 5G repose sur huit exigences techniques fondamentales comme le montre la Figure 1.3, qui définissent ses performances exceptionnelles. Avec un débit de données atteignant jusqu'à 10 Gbit/s, la 5G surpasse les réseaux 4G et 4.5G de 10 à 100 fois. La latence minimale d'une milliseconde garantit des temps de réponse rapides, tandis que la

bande passante vise à être 1 000 fois supérieure par unité de surface par rapport aux générations précédentes. La 5G aspire à accueillir jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface, comparé à la 4G LTE, et à assurer une disponibilité extrêmement élevée de 99,999 %. Cette technologie ambitionne également une couverture totale de 100 %, éliminant les zones non couvertes, et cherche à réduire la consommation énergétique du réseau de manière significative, jusqu'à 90 %. Enfin, pour les appareils IoT à faible consommation, la 5G vise une durée de vie de la batterie prolongée, allant jusqu'à 10 ans. Ces exigences définissent les bases nécessaires pour atteindre les performances exceptionnelles et les avantages annoncés de la 5G, créant ainsi un écosystème technologique avancé et efficace.



Fig.1.6 : Les exigences de la cinquième génération

1.3.3 Architecture du réseau 5G

La 5G repousse les limites de la communication mobile en introduisant une architecture réseau plus flexible et évolutive, conçue pour prendre en charge une multitude de services et d'applications.

Cette dernière repose sur plusieurs concepts clés ainsi que des technologies innovantes qui transforment la façon dont les réseaux sans fil sont conçus, déployés et gérés. Comme la montre la.

Figure 1.5, le réseau 5G se compose de deux principaux sous-systèmes : le réseau d'accès radio RAN (radio access network) et le réseau de base 5G (5G Core Network). Le RAN gère le spectre radio en s'assurant qu'il est utilisé efficacement et répond aux exigences de qualité de service de chaque utilisateur. Il correspond à un ensemble distribué de stations de base, celles-ci sont nommés gNB. Quant au 5G Core Network, c'est est un ensemble de fonctionnalités qui sert à plusieurs fins :

- Fournit une connectivité Internet (IP) pour les utilisateurs.
- Garantit que cette connectivité répond aux exigences de QoS (Quality of Service) promises.
- Suit la mobilité des utilisateurs pour assurer un service ininterrompu.
- Suit l'utilisation des abonnés pour la facturation.

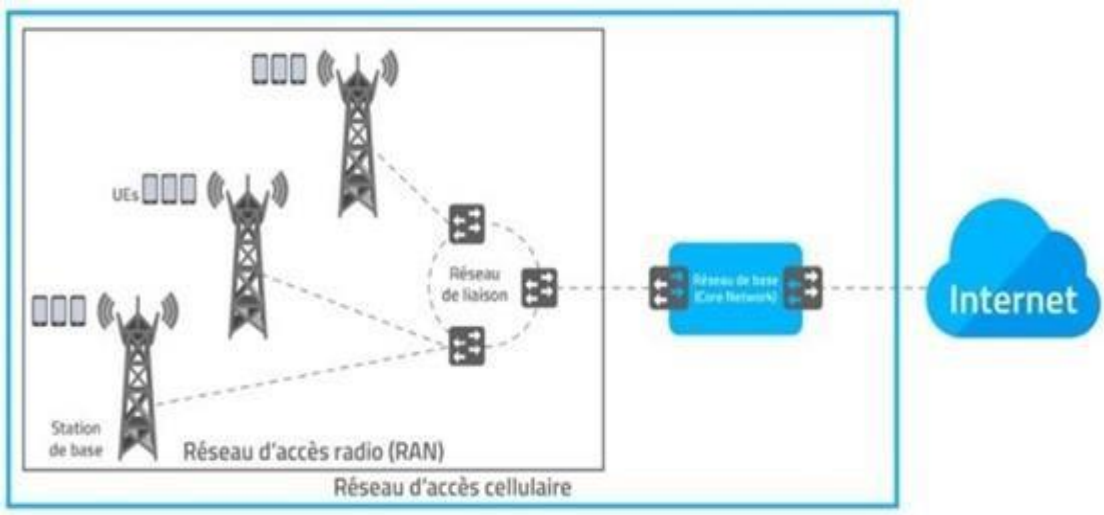


Fig. 1.7 : Architecture du réseau 5G

Les principes généraux qui ont guidé la définition du réseau d'accès radio 5G du 3GPP (NG- RAN) et de l'architecture du réseau 5GC, ainsi que des interfaces réseau, reposent sur une séparation logique des réseaux de signalisation et de transport de données, ainsi que sur la séparation des fonctions NG RAN et 5GC des fonctions de transport. En conséquence, les schémas d'adressage utilisés dans le NG-RAN et le 5GC sont dissociés des schémas d'adressage des fonctions de transport. Les protocoles sur l'interface radio et les interfaces NG sont divisés en protocoles de plan utilisateur, qui sont des protocoles mettant en œuvre le service réel de session d'unité de données du

protocole (PDU), transportant les données utilisateur à travers le stratum d'accès (AS) ; et les protocoles de plan de contrôle, qui sont les protocoles de contrôle des sessions PDU et de la connexion entre l'équipement utilisateur.

(UE) et le réseau sous différents aspects, notamment la demande de service, le contrôle des différentes ressources de transmission, le transfert, etc. Le NG-RAN assume la responsabilité de l'établissement, de la maintenance et de la libération des parties des sessions PDU qui traversent l'interface radio. Il fait face à des défis tels que les contraintes physiques tels que les interférences, économie d'énergie, etc, les handovers inter-gNB et le multiplexage de la session (planification). Les fonctions du 5GC prennent en charge les parties restantes des sessions PDU ainsi que tous les autres processus non liés à l'accès radio, tels que la gestion de la mobilité, la sécurité des adresses IP, l'allocation, etc. La Figure 1.8 illustre les distinctions entre les fonctions 5G exécutées dans le NG-RAN et le cœur 5G.

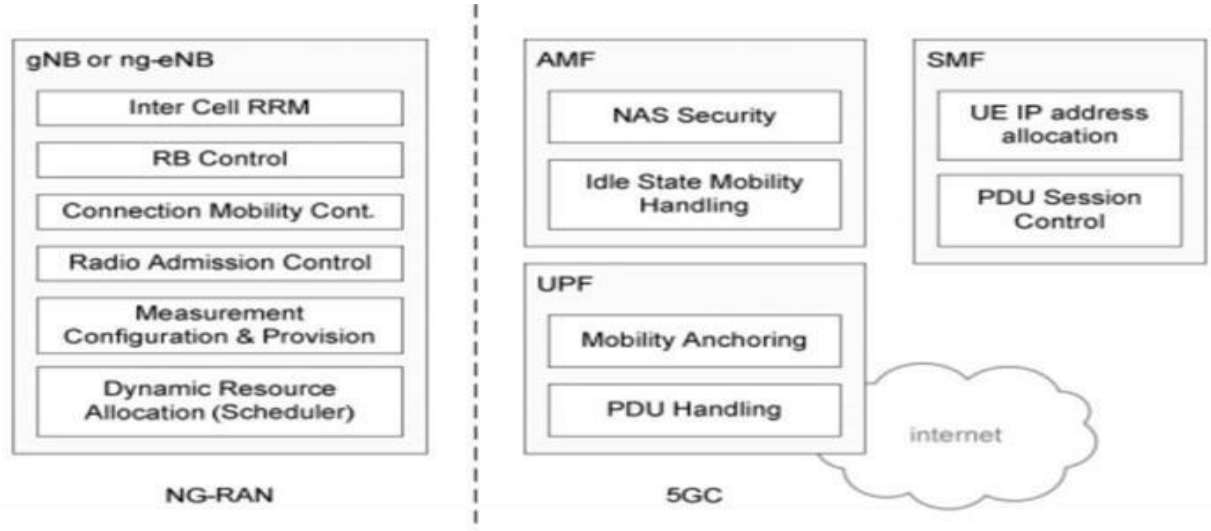


Fig. 1.8 : Distinction fonctionnelle entre NG-RAN et 5GC

1.3.4 Le réseau d'accès 5G

Le NG-RAN est formé de stations de bases distribuées de nouvelle génération gNB qui sont Connectées au 5GC à travers des interfaces logiques. Comme en LTE les gNBs peuvent être Interconnectées à travers l'interface Xn pour améliorer les fonctions de mobilité (handover) et de gestion (coordination d'interférences intercellulaires). Les gNBs peuvent êtres interconnectés à travers l'interface Xn pour améliorer les fonctions de mobilité (handover) et de gestion (coordination d'interférences intercellulaires). Le fonctionnement de la gNB peut également être réparti. Dans ce cas, l'architecture résultante est (gNB- CU) formée par une

unité centrale CU (Central Unit) qui est utilisée pour gérer les services non temps réel. Celle-ci contrôle une ou plusieurs (gNB-DU), unités distribuées DU (Distributed Unit) qui gère les données en temps réel à travers l'interface F1. L'unité de distribution est quant à elle connectée à une carte radio distante (RRH). L'unité centrale est par la suite divisée en deux parties, une pour les fonctions de plan de contrôle (gNB-CU-CP) et l'autre pour les fonctions de plan d'utilisateur (gNB- CU-UP). Les fonctions du gNB sont réparties en couches selon le modèle représenté sur la Figure 1.9. Cette pile protocolaire supporte les fonctions attribuées au gNB :

- Gestion des ressources radio.
- Compression, cryptage et protection de l'intégrité des données utilisateur.
- Routage des données du plan de contrôle et du plan utilisateur vers l'UPF et l'AMF.
- Etablissement et terminaison de connexions.
- Gestion des sessions.
- Le Network Slicing.
- Distribution des messages NAS (Non-Access Stratum).
- Partage du RAN entre operateurs.
- Gestion de la double connectivité.
- Gestion de QoS et cartographie des flux aux porteurs de radio de données.
- Planification et transmission de messages de pagination

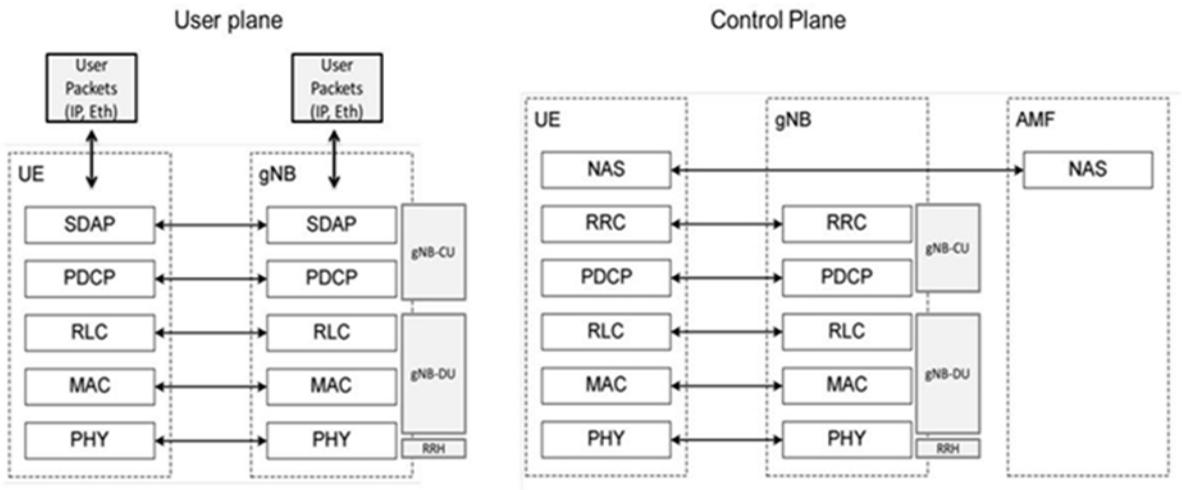


Fig.1.9 : Pile protocolaire du NG-RAN

1.3.5 Le réseau cœur 5G

Le système 5G prend en charge une architecture orientée services. Le réseau central 5G orienté services (5GC) est construit sur le principe selon lequel les systèmes 5G doivent prendre en

charge une large gamme de services aux caractéristiques et exigences de performance différentes. L'architecture orientée services et les interfaces dans les systèmes 5G rendent les réseaux futurs flexibles, personnalisables et évolutifs. Le cœur 5G, tel que défini par la norme 3GPP, se base sur une structure dite Service Base Architecture (SBA) qui couvre toutes les fonctions et interactions de la 5G, y compris l'authentification, la sécurité, la gestion de sessions et l'agrégation du trafic en provenance des appareils terminaux. La principale différence dans l'architecture basée sur les services réside dans le plan de contrôle, où, au lieu d'interfaces prédéfinies entre les entités, un modèle de service est utilisé [16]. Dans ce modèle, les composants demandent une nouvelle entité réseau pour découvrir et communiquer avec d'autres entités via des interfaces de programmation d'applications (API) [13]. Il se constitue d'un plan de donnée séparé du plan de contrôle et met en avant la NFV (fonctions de réseau virtuel) [16]. Au cœur de l'architecture de la 5G se trouve une approche basée sur la virtualisation, la flexibilité et la segmentation du réseau en exploitant des technologies de virtualisation telles que NFV (Network Functions Virtualization) et SDN (Software-Defined Networking), ainsi que des concepts comme le slicing (découpage de réseau) et l'orchestration des services. Il se constitue de diverses entités fonctionnelles, la Figure 1.10 présente l'architecture du réseau 5G core.

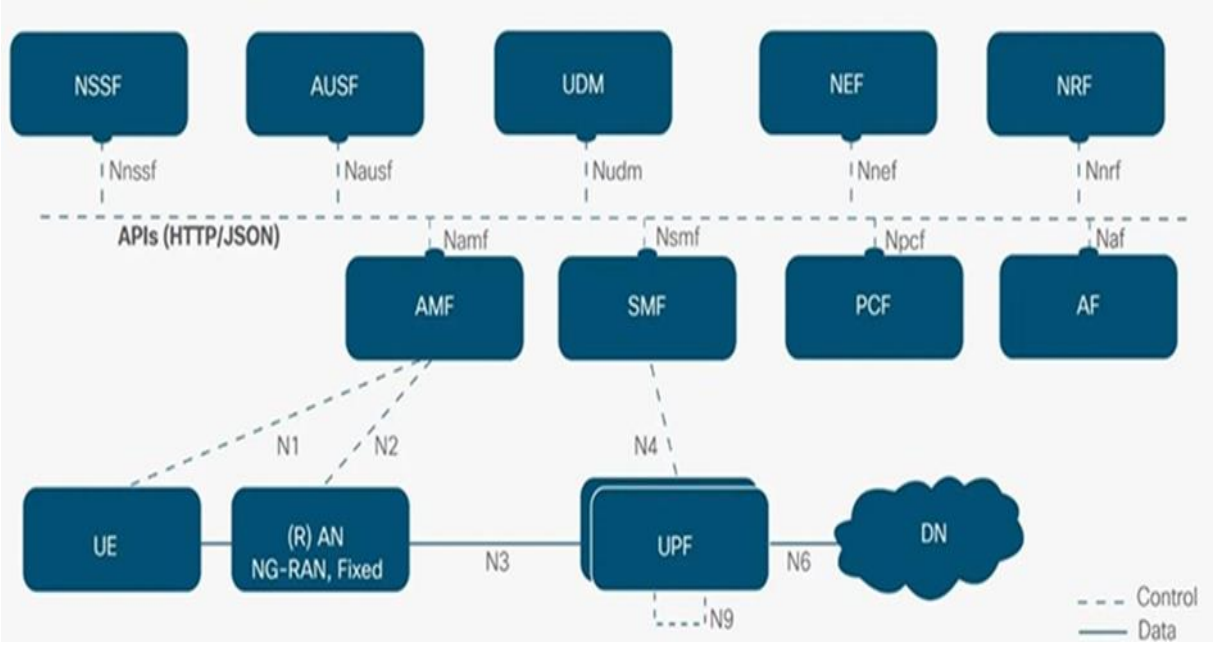


Figure 1.10 : Architecture du réseau 5G Core

1.4 Conclusion

Pour conclure, dans ce chapitre, nous avons entrepris un voyage à travers l'histoire des réseaux de communications mobiles, depuis leurs débuts modestes avec la 1G jusqu'à l'arrivée

spectaculaire de la 5G. En nous concentrant sur cette dernière génération, nous avons exploré ses différents services et applications, son architecture. La 5G incarne une avancée majeure, promettant des niveaux de connectivité et de performances. Elle ouvre la voie à une multitude de services et applications innovants, allant des villes intelligentes à la réalité virtuelle immersive.

Chapitre 2

Canaux de transmission et les techniques d’accès

2.1 Introduction

Dans les réseaux 5G NR (New Radio), la transmission des données repose sur une structure hiérarchique de canaux, conçue pour assurer une communication efficace entre les différents niveaux de la pile protocolaire. Ces canaux, répartis entre la liaison montante (uplink) et la liaison descendante (downlink), permettent de transporter les données de manière progressive, en les encapsulant depuis les couches supérieures jusqu'au niveau physique. Cette organisation favorise une gestion rigoureuse des ressources radio et garantit la cohérence du flux d'information. Afin de mieux comprendre le fonctionnement global du système de transmission 5G, ce chapitre présente les différents types de canaux utilisés, leur classification (logiques, de transport et physiques), ainsi que les rôles spécifiques qu'ils jouent dans l'architecture du réseau.



Fig.2.1 : La différence entre un canal de transmission et un canal de propagation

2.2 Les systèmes de transmission

Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique appelé canal de transmission. La source émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires, ensuite le codeur applique deux fonction la première appelée codage en ligne associe un support physique adéquat aux éléments abstraits émis par la source. Le second appelée codage correcteur d'erreurs elle introduit de la redondance dans le signal émis pour le protéger contre le bruit et les parasites présents sur le canal de transmission. Enfin du coté récepteur les fonctions de démodulation et de décodage sont les inverses respectifs des fonctions de modulation et de codage situées du côté émetteur. Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique est donné à la Figure (2.1) où l'on se limite aux fonctions de base [6].

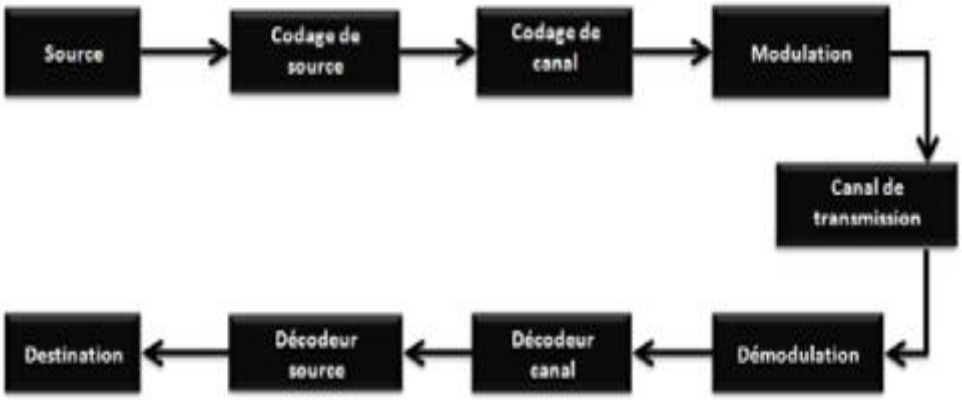


Fig 2.2 : Schéma simplifié d'un système de transmission numérique.

2.3 Modèles de propagation dans les réseaux mobiles

Dans le domaine des réseaux mobiles, la transmission des ondes électromagnétiques joue un rôle essentiel en assurant la communication entre les émetteurs et les récepteurs. Cependant, cette propagation n'est pas uniforme et peut être influencée par divers facteurs tels que la distance, les obstacles (bâtiments, reliefs, végétation) ainsi que les conditions atmosphériques. Ces éléments peuvent entraîner une atténuation du signal, des interférences ou des pertes de communication, ce qui impacte directement la qualité du service offert aux utilisateurs.

Afin d'anticiper et de surmonter ces défis, il est indispensable d'utiliser des modèles de propagation permettant de prédire le comportement des ondes dans différents environnements. Ces modèles aident les ingénieurs à optimiser la couverture du réseau, à minimiser les interférences et à améliorer la performance globale des systèmes de télécommunication.

Dans ce contexte, nous allons explorer les principaux modèles de propagation utilisés dans les réseaux mobiles, en mettant en lumière leurs caractéristiques, leurs domaines d'application ainsi que leurs avantages et limites. Grâce à ces modèles, les ingénieurs en télécommunications peuvent concevoir et optimiser les infrastructures des réseaux mobiles (2G, 3G, 4G, 5G) afin d'assurer une connectivité efficace et fiable. Leur application s'étend également aux réseaux Wi-Fi, aux communications par satellite et aux systèmes de navigation. Dans ce contexte, l'étude des modèles de propagation est essentielle pour anticiper les pertes de signal, améliorer la qualité de service et garantir une couverture optimale des réseaux mobiles [7].

2.3.1 Propagation des Ondes Radio

La propagation d'une onde radioélectrique est un processus complexe et moins prévisible régi par la réflexion, la diffraction et la diffusion, dont l'intensité varie selon les environnements et les instances. De plus, le canal radio mobile est caractérisé par un autre phénomène appelé évanouissement (Fading en anglais). Il s'agit de la variation de l'amplitude du signal en fonction du temps et de la fréquence. Contrairement au bruit additif en tant que source la plus courante de dégradation du signal, l'évanouissement est une autre source de dégradation du signal qui se caractérise par une perturbation non additive au signal dans le canal radio. Généralement, l'évanouissement peut être dû aux différents effets : affaiblissement de parcours, masquage par des objets, propagation par trajets multiples, et propagation Doppler [9].

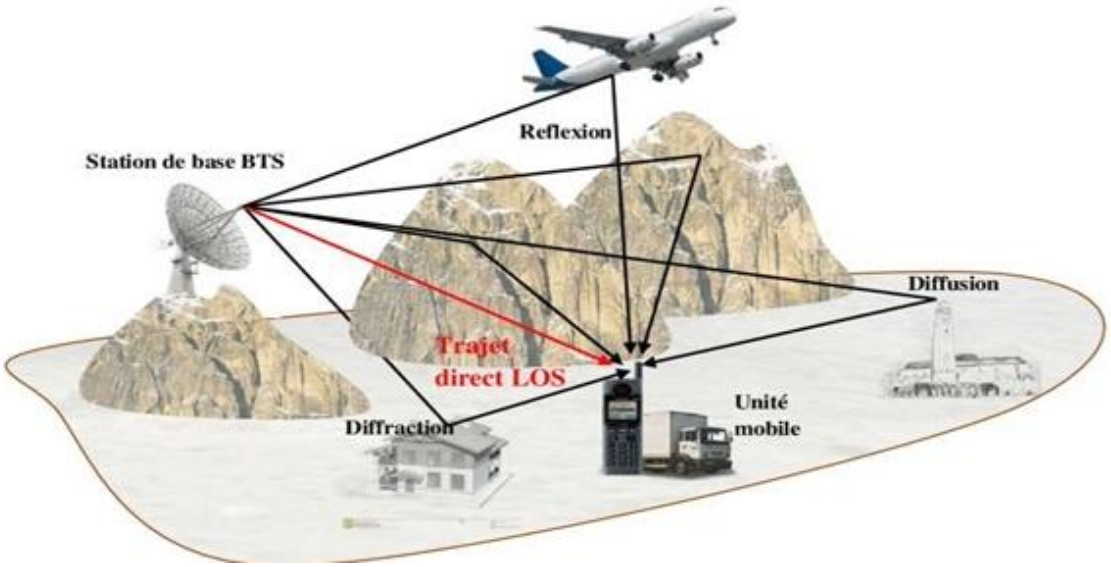


Fig2.3 : Propagation par Trajets multiples dans un Canal Radio Mobile

2.3.2 Atténuation de Parcours

L'atténuation de parcours indique comment la puissance moyenne du signal diminue avec la distance entre l'émetteur et le récepteur. Dans une ligne directe LOS (Line-of-Sight) en espace libre, la puissance moyenne du signal décroît avec le carré de la distance entre les antennes émettrice et réceptrice, de sorte que la puissance reçue, à une distance d et pour une longueur d'onde λ, diminue exponentiellement avec (λ 4πd). Ainsi, un canal radio en espace libre qui est caractérisé uniquement par l'affaiblissement du parcours peut être exprimé par l'équation suivant

$$A_p[db] = 10log\left(\frac{P_e}{P_r}\right) = 10\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (2.1)$$

Où Pe, Pr sont la puissance émise et la puissance reçue, respectivement. Dans un canal où il n'y a souvent aucune ligne directe NLOS (Non-Line-Of-Sight), la puissance du signal décroît avec une puissance n supérieure au cas du LOS. L'expression (I.1) peut donc être généralisée par

$$A_{p1}(d)[db] = A_p(d_0) + 10\log\left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (2.2)$$

Avec, $d0$ est une distance de référence à laquelle on a calculé Ap par l'équation (I.1). On peut facilement remarquer que la valeur particulière $n = 2$ correspond à l'affaiblissement en espace libre [9].

2.3.3 Canal de Rayleigh

La diffusion Rayleigh est un mode de diffusion des ondes, par exemple électromagnétiques ou sonores. Elle opère lorsque la longueur d'onde est beaucoup plus grande que la taille des particules diffusantes. On parle de diffusion élastique, car cela se fait sans variation d'énergie, autrement dit l'onde conserve la même longueur d'onde. Elle est nommée d'après John William Struts Rayleigh, qui en a fait la découverte. Lorsque les particules ont une taille suffisamment grande devant la longueur d'onde incidente, il faut utiliser d'autres théories comme la théorie de Mie qui fournit une solution exacte à la diffusion par des particules sphériques de taille quelconque (la diffusion Rayleigh est un cas limite de la théorie de Mie) [8].

Le modèle d'évanouissement de Rayleigh est un modèle statistique qui suppose que le signal est composé de nombreux composants aléatoires ayant une amplitude et une phase égales. Ces composants sont le résultat de multiples réflexions et de la diffusion du signal par divers obstacles, tels que des bâtiments, des arbres, des collines, etc. L'intensité du signal suit une distribution de Rayleigh, ce qui signifie qu'elle peut varier de valeurs très faibles à très élevées, avec une probabilité plus élevée d'être proche de zéro. Le modèle d'évanouissement de Rayleigh convient aux environnements où il n'y a pas de ligne de visée dominante (LOS) , tels que les zones urbaines ou intérieures.

Dans ce cas on a :

$$z(t) = |r(t)| = \sqrt{r_1^2(t) + r_Q^2(t)} \quad (2.3)$$

Et z(t) suit une distribution de Rayleigh :

$$P_z(z) = \frac{2z}{Pr} exp\left(\frac{z^2}{P_r}\right) = \frac{z}{\sigma^2}\exp(-\frac{z^2}{2\sigma^2})), z \geq 0 \quad (2.4)$$

2.3.4 Le canal de transmission avec bruit blanc additif gaussien (AWGN)

Pour le cas de l'effet Doppler entre une source en mouvement et un récepteur fixe, le modèle de données à bande étroite est utilisé pour modéliser le signal reçu au niveau des réseaux d'antennes. Il présume que le support du front d'onde de signal inséminant à travers le réseau d'antennes reste nécessairement constant. Ce modèle est valable pour les signaux ayant une bande passante beaucoup plus petite que la fréquence porteuse. Selon l'hypothèse ci-dessus, le signal reçu peut être écrit comme :

$$H(t)= A(\theta)+N(t) \quad (2.5)$$

Où, A (ɵ) est le vecteur de la matrice et N (t) est AWGN avec densité spectrale de puissance moyenne et bilatérale nulle donnée par N0/ 2.

2.4 L'effet Doppler

r est un phénomène qui se produit lorsque l'émetteur et/ou le récepteur se déplace ou bien lorsqu'un obstacle qui se trouve dans le parcours de l'onde électromagnétique émise est en mouvement. Ce jugement engendre alors une variation du canal de propagation dans le temps ou la puissance reçue subit des évanouissements variables dans le temps appelés évanouissements temporels. Ceci se traduit également par un décalage de fréquence en réception. Donc, dans le cas de propagation en mobilité, on parle de dispersions fréquentielles ou canal dispersif en fréquence. Considérons un récepteur en mouvement aune vitesse v ; ce décalage fréquentiel fd, appelé décalage Doppler, s'exprime comme suit :

$$f_d= fr - fe = fe\ v\ c\ fd\ max = v\ \lambda \cos a \quad (2.6)$$

Avec fe la fréquence du signal transmis, fr la fréquence du signal reçu, c la vitesse de la lumière, v la vitesse de déplacement du mobile, α l'angle entre la direction d'arrivée du trajet de propagation et la direction de déplacement [0 2π] [11].

2.4.1 Effet Doppler fréquentiel (changement de fréquence) :

. Pour les ondes **acoustiques** (non relativistes) :

$$f_r = f_e \cdot \frac{v+v_r}{v+v_r} \tag{2.7}$$

. Pour les ondes **électromagnétiques relativistes :**

$$f_r = f_e \cdot \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}\ avec\ \beta = \frac{v}{c} \tag{2.8}$$

2.4.2 : Retard Doppler (dans le temps, pour les signaux) :

Dans les communications sans fil ou en traitement du signal, on parle aussi de retard Doppler (ou « Doppler delay ») pour désigner le décalage temporel d'un signal du au mouvement, notamment dans des canaux a trajets multiples (multipath).

Dans ce cas :

$$\tau(t) = \frac{d(t)}{c} \tag{2.9}$$

Où :

τ(t): Retard temporel

d(t): Distance instantanée entre émetteur et récepteur (fonction du temps)

c : Vitesse de propagation (ex : lumière ou son)

Et si la distance varie à cause du mouvement :

$$\tau(t) = \tau_0 - \frac{v \cdot t}{c} \tag{2.10}$$

2.5 Canaux de transmission 5G

Les canaux de transmission 5G jouent un rôle crucial dans la fourniture de débits de données ultra-rapides et d'une connectivité fiable dans les réseaux sans fil de nouvelle génération. Pour vous offrir une compréhension complète de ce sujet, je vais détailler les principaux types de canaux de liaison descendante 5G, leurs caractéristiques essentielles et les références pertinentes pour une exploration plus approfondie [8].

Il existe trois principaux types de canaux de données utilisés dans les systèmes de communications mobiles. Cela est vrai pour les systèmes 5G et, par conséquent, la hiérarchie est indiquée ci-dessous.

- **Canal logique** : les canaux logiques peuvent être l'un des deux groupes suivants : canaux de contrôle et canaux de trafic :
- **Canaux de contrôle** : les canaux de contrôle sont utilisés pour le transfert de données depuis le plan de contrôle.
- Canaux de trafic : les canaux logiques de trafic sont utilisés pour le transfert des données du plan utilisateur.
- **Canal de transport** : Il s'agit du multiplexage des données logiques à transporter par la couche physique et ses canaux via l'interface radio.
- **Canal physique** : Les canaux physiques sont ceux qui se rapprochent le plus de la transmission réelle des données sur le réseau d'accès radio / signal RF 5G. Ils sont utilisés pour transporter les données via l'interface radio. Les canaux physiques sont souvent dotés de canaux de niveau supérieur qui fournissent un service spécifique. De plus, les canaux physiques transportent des données utiles ou des détails sur des caractéristiques spécifiques de transmission de données telles que la modulation le multiplexage du signal de référence, la puissance de transmission, les ressources RF, etc.

Les noms des canaux, tant pour la liaison montante que descendante, sont pratiquement les mêmes que ceux utilisés pour la 4G LTE. Cependant, les noms et descriptions des canaux utilisés pour le système de communication 5G sont indiqués ci-dessous, en l'occurrence pour la liaison descendante [12].

2.6 Techniques d'accès

Dans les réseaux de télécommunications, plusieurs utilisateurs doivent partager les ressources disponibles pour échanger des données sans interférences. Pour cela, différentes techniques d'accès ont été développées afin d'optimiser l'utilisation du spectre radio et garantir une communication efficace. Ces techniques permettent de répartir les utilisateurs selon trois dimensions principales : la fréquence (FDMA), le temps (TDMA), et les codes (CDMA). Avec l'évolution des technologies, des méthodes plus avancées comme OFDMA (utilisé en 4G/5G) et SDMA (basé sur les antennes intelligentes) ont été introduites pour améliorer la capacité et la qualité du réseau.

Dans cette présentation, nous explorerons les différentes techniques d'accès, leur fonctionnement, leurs avantages et leurs applications dans les réseaux mobiles et autres systèmes de communication.

2.6.1 FDMA (Frequency Division Multiple Access)

a) - Principe

Chaque utilisateur est assigné à une bande de fréquence distincte et peut transmettre en continu sans interférer avec les autres. Les bandes sont séparées par des garde-fréquences pour éviter les chevauchements.

b) -Fonctionnement

Le spectre est divisé en plusieurs sous-bandes de fréquences.
Chaque utilisateur occupe une sous-bande fixe et ne peut pas partager sa fréquence avec d'autres. Un filtrage est appliqué pour éviter les interférences.

c)-Avantages

- Facile à implémenter.
- Compatible avec les transmissions analogiques et numériques.
- Bonne isolation entre utilisateurs.

d)-Inconvénients

- Utilisation inefficace du spectre (fréquences inutilisées si un utilisateur est inactif).
- Peu évolutif avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs.

e) -Applications

- Réseaux mobiles 1G (AMPS, TACS).
- Communications radio et télévision.
- Réseaux satellites.

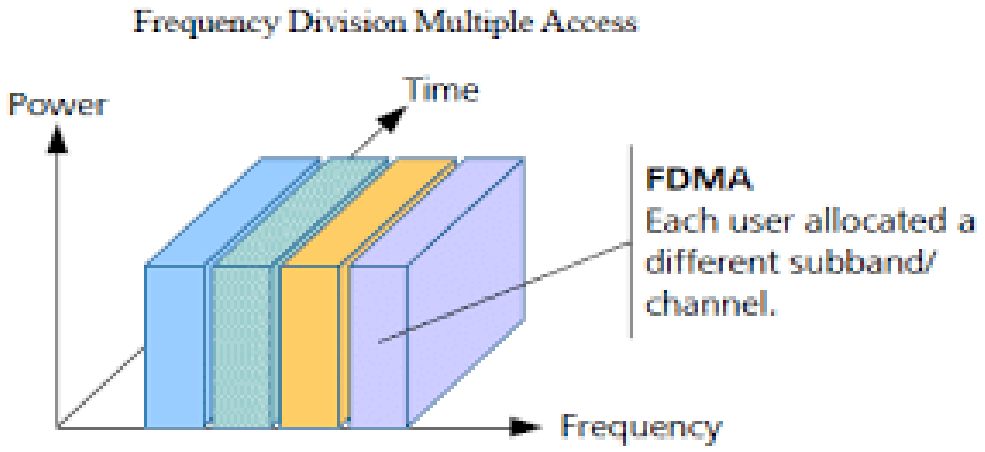


Fig.2.4 : Schéma illustrant l'accès multiple par répartition en fréquence(FDMA)

2.6.2 TDMA (Time Division Multiple Access)

a) -Principe

Chaque utilisateur partage la même fréquence mais à des instants différents. Le canal est divisé en créneaux temporels (time slots), où chaque utilisateur envoie ses données à tour de rôle.

b) -Fonctionnement

Le canal est découpé en tranches de temps fixes. Chaque utilisateur se voit attribuer un créneau spécifique. La transmission est synchronisée pour éviter les collisions.

c)-Avantages

- Meilleure utilisation du spectre par rapport au FDMA.
- Possibilité d'attribuer plusieurs créneaux à un même utilisateur pour augmenter le débit.
- Moins sensible aux interférences.

d)-Inconvénients

- Nécessite une synchronisation précise.
- Délais introduits par l'attente du créneau temporel.
- Sensible à la distance et à la propagation du signal.

e) -Applications

- Réseaux mobiles 2G (GSM, IS-136)
- Systèmes de communication par satellite.
- Réseaux privés de radiocommunication.

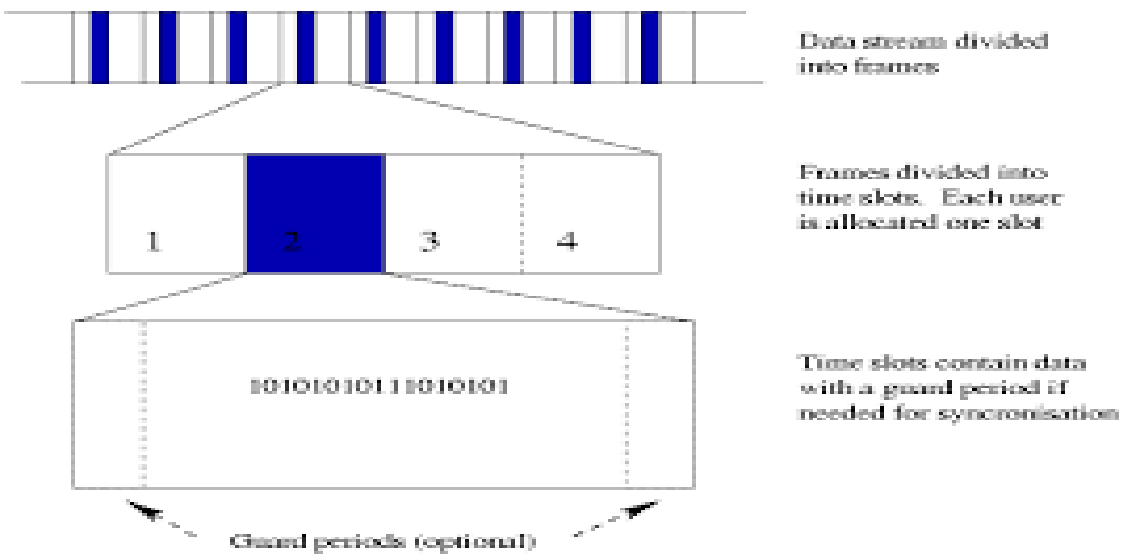


Fig 2.5 : Schéma illustrant l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA)

2.6.3 CDMA (Code Division Multiple Access)

a) -principe

Dans le CDMA, chaque utilisateur est identifié par un code unique (appelé séquence pseudo-aléatoire ou code d'étalement). Tous les signaux sont transmis en même temps sur la même fréquence, mais grâce à ces codes, le récepteur peut isoler le signal qui lui est destiné.

Exemple : Imagine un restaurant bruyant où plusieurs conversations ont lieu en même temps. Si chaque personne parle une langue différente, tu peux comprendre ton interlocuteur en te concentrant uniquement sur la langue que vous partagez. Le CDMA fonctionne de manière similaire avec des codes d'étalement au lieu des langues [9].

b) - **Fonctionnement du CDMA**

Le CDMA repose sur un procédé appelé étalement de spectre :

-Codage : Chaque signal est multiplié par un code pseudo-aléatoire à large bande passante.

- Transmission : Tous les signaux codés sont envoyés sur le même canal de fréquence.

-Décodage : Le récepteur utilise le même code pour extraire l'information qui lui est destinée.

c)-**Avantages du CDMA :**

- Meilleure utilisation du spectre : Plusieurs utilisateurs peuvent utiliser le même canal sans interférences importantes.

- Sécurité accrue : Les signaux sont plus difficiles à intercepter sans connaître les codes.
- Réduction des interférences : Grâce à l'étalement du spectre, les interférences sont minimisées.
- Efficacité en environnement mobile : Bonne performance même en présence de mouvements rapides (ex. : téléphonie mobile 3G).

d)-Inconvénients du CDMA :

- Complexité de mise en œuvre : Nécessite un traitement numérique avancé.
- Effet de brouillage multiple : Trop d'utilisateurs peuvent provoquer une dégradation des performances.

e) -Applications du CDMA

- Réseaux mobiles : Utilisé dans les technologies 3G (UMTS, CDMA2000). Systèmes de communication militaire : Résistance aux brouillages et meilleure confidentialité.

GPS (Global Positioning System) : Utilise des signaux CDMA pour la localisation. Le CDMA a été une avancée majeure dans les télécommunications mobiles, mais il a été progressivement remplacé par OFDMA dans les réseaux 4G et 5G pour une meilleure efficacité spectrale [13].

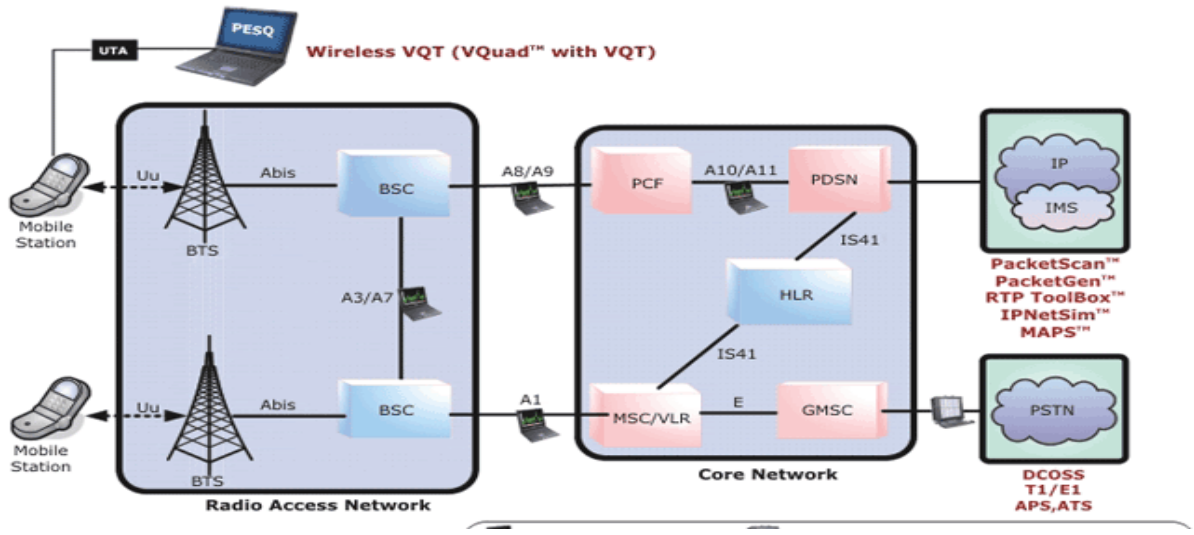


Fig.2.6 : Schéma illustrant l'accès multiple par répartition en code (CDMA)

2.6.4 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

a) -Principe

Extension du OFDMA, où le spectre est divisé en sous-porteuses orthogonales, permettant d'attribuer dynamiquement des ressources aux utilisateurs.

Chaque utilisateur peut avoir plusieurs sous-porteuses en fonction de ses besoins en bande passante.

b) -Fonctionnement

- . Le spectre est divisé en plusieurs sous-porteuses orthogonales.
- Chaque utilisateur reçoit un ensemble de sous-porteuses pour transmettre ses données.
- L'allocation des sous-porteuses est dynamique et peut varier selon la charge du réseau.

c)-Avantages

- Utilisation efficace du spectre.
- Moins de brouillage et d'interférences inter-utilisateurs.
- Supporte une grande quantité d'utilisateurs simultanés.

d)-Inconvénients

- Complexité de mise en œuvre élevée.
- Sensible aux problèmes de synchronisation.

e) -Applications

- 4G (LTE), 5G.
- Wi-Fi (802.11a/g/n/ac).
- Réseaux WiMAX.

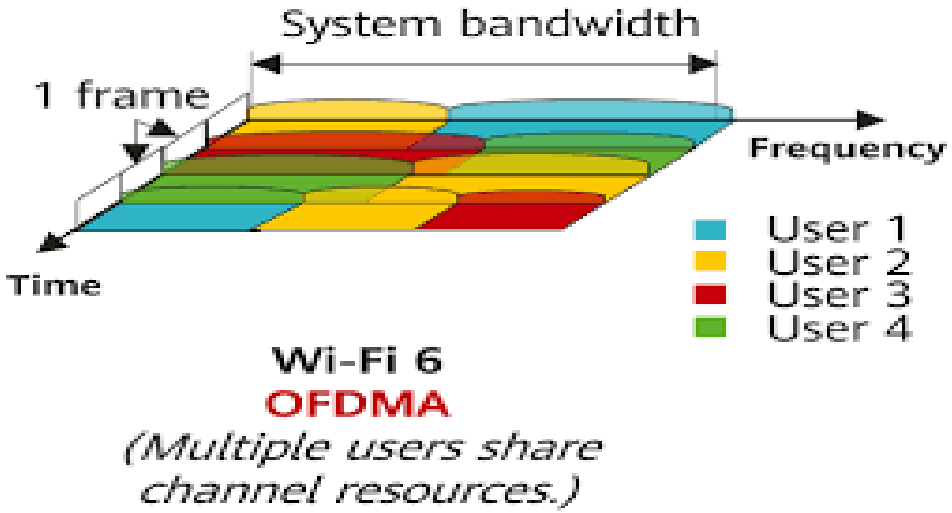


Fig2.7 : Schéma illustrant l'accès multiple par répartition orthogonale en fréquence (OFDMA)

2.6.5 SDMA (Space Division Multiple Access)

a) -Principe

Utilise des antennes intelligentes pour diriger les signaux vers des zones spécifiques, permettant de réutiliser les fréquences dans différentes zones géographiques.

Exploite la direction spatiale des signaux pour maximiser la capacité du réseau.

b) -Fonctionnement

. Plusieurs antennes dirigent les signaux vers des zones distinctes.

. Un même canal peut être réutilisé dans différentes directions sans interférences.

. L'antenne adapte sa directivité pour optimiser la réception.

c)-Avantages

- Augmente la capacité du réseau sans nécessiter plus de fréquences.
- Réduit les interférences entre utilisateurs.
- Améliore la qualité du signal.

d)-**Inconvénients**

- Technologie coûteuse et complexe.
- Nécessite des antennes et des algorithmes avancés.

e) -**Applications**

5G avec Massive MIMO (utilisation de plusieurs antennes pour gérer de nombreux utilisateurs).

Réseaux satellites. Wi-Fi avec formation de faisceaux (beamforming).

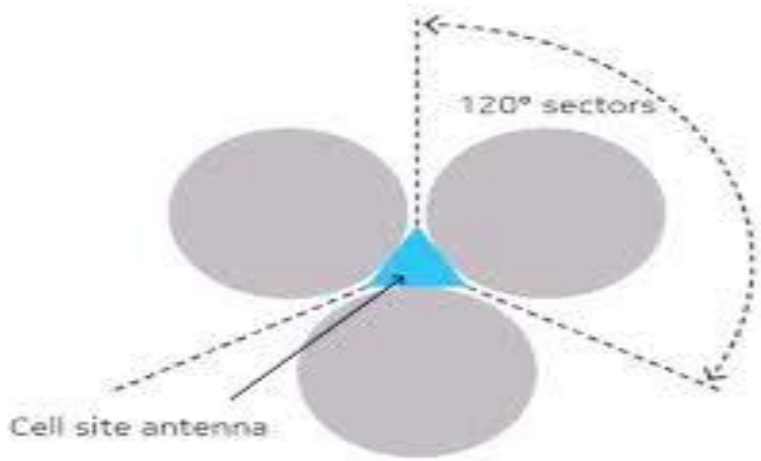


Fig.2.8 : Schéma illustrant l'accès multiple par répartition spatiale(SDMA)

2.6.6 Comparaison des techniques d'accès

Technique	Principe de fonctionnement	Avantages	Inconvénients	Applications typiques
FDMA	Chaque utilisateur a une bande de fréquence dédiée.	- Simple - Pas besoin de synchronisation	- Faible efficacité spectrale - Sensible au bruit	Réseaux 1G, systèmes analogiques
TDMA	Le temps est divisé en slots, un par utilisateur.	- Meilleure efficacité que FDMA - Moins de bruit	- Besoin de synchronisation - Risque de latence	2G (GSM), communications militaires
CDMA	Tous les utilisateurs partagent la même bande avec des codes uniques.	- Haute capacité - Résistant au brouillage	- Complexité élevée - Interferences multiples	3G (UMTS), GPS
OFDMA	Bande divisée en sous-porteuses orthogonales réparties entre les utilisateurs.	- Haute efficacité spectrale - Flexibilité - Moins d'interférence	- Sensible au décalage de synchronisation - Complexe	4G (LTE), 5G, Wi-Fi 6

NOMA	Partage non-orthogonal avec allocation d'énergie et décodage successif.	- Plus de connexions - Excellente efficacité spectrale	- Décodage complexe (SIC) - Gestion du brouillage	5G avancée, IoT, réseaux denses
SDMA	Séparation des utilisateurs dans l'espace avec antennes directionnelles.	- Moins d'interférences - Exploite la dimension spatiale	- Besoin d'antennes intelligentes - Suivi difficile en mobilité	MIMO, 5G, satellites

Tableau.2.1 Comparatif des techniques d'accès multiple

2.7 Variations des signaux SNR et BLR

2.7.1 SNR (Signal to Noise Ratio) : C'est le rapport entre la puissance du signal utile (celui qu'on veut transmettre) et la puissance de bruit 'interférence, parasites, etc.).

- **Quand le SNR est élevé** : el signal est clair, on peut le détecter facilement.
- **Quand le SNR est faible :** le signal est noyé dans le bruit, donc difficile à reconnaitre.

Le rapport signal à bruit (RSB) ou (SNR) (pour *signal to noise ratio* en anglais) est la façon dont nous allons mesurer les différences d'intensité entre le signal et le bruit. Il s'agit d'un rapport, donc sans unité. Le SNR est presque toujours exprimé en dB dans la pratique. Souvent, en simulation, nous codons de manière à ce que nos signaux soient d'une puissance unitaire (puissance = 1). Ainsi, nous pouvons créer un rapport signal à bruit de 10 dB en produisant un bruit d'une puissance de -10 dB en ajustant la variance lorsque nous générons le bruit [10].

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \tag{2.12}$$

$$SNR_{db} = P_{signal_db} - P_{signal-noise} \tag{2.13}$$

Si quelqu'un dit "SNR = 0 dB", cela signifie que la puissance du signal et du bruit est la même. Un SNR positif signifie que notre signal est plus puissant que le bruit, tandis qu'un SNR négatif

signifie que le bruit est plus puissant. La détection de signaux à un SNR négatif est généralement assez difficile. Le rapport signal à interférence plus bruit (SINR pour *signal to interference and noise ration* en anglais) est essentiellement le même que le SNR, sauf que vous incluez l'interférence avec le bruit dans le dénominateur.

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{interference} + P_{noise}} \tag{2.14}$$

La définition de l'interférence dépend de l'application/de la situation, mais il s'agit généralement d'un autre signal qui interfère avec le signal d'intérêt, qui l'empiète sur lui dans le domaine fréquentiel, et/ou qui ne peut pas être filtré pour une raison quelconque.

2.7.2 BLR (Bit Loss Rate) ou aussi BER (Bit Error Rate) : C'est le taux d'erreurs dans la transmission. Il mesure combien de bits ont été reçus incorrectement par rapport au total transmis.

- S'il y a beaucoup de bruit ou que la qualité du canal est mauvaise, alors que de bits sont reçus avec des erreurs (BLR élevé).
- Si le canal est bon et que le SNR est haut, BLR est faible, donc moins d'erreurs.

2.8 Limitations des systèmes de transmission dans les réseaux 5G

Avec l'augmentation de la demande en débit, la mobilité des utilisateurs et la densité des connexions dans les réseaux 5G, les systèmes de transmission traditionnels montrent leurs limites. Plusieurs problèmes techniques deviennent de plus en plus critiques et affectent directement la qualité de service [7].

a) - Sélectivité fréquentielle du canal

Dans les environnements 5G, les canaux sont souvent sélectifs en fréquence, ce qui signifie que certaines sous-porteuses peuvent subir un affaiblissement important. Cela réduit l'efficacité des techniques multi porteuses comme l'OFDM.

b) - Effet Doppler et fading rapide :

La haute mobilité des utilisateurs provoque un décalage Doppler qui rend le canal très variable dans le temps. Cela complique l'estimation de canal et augmente le taux d'erreurs de transmission.

c)-Taux d'erreurs élevé (BLR) dans les environnements hostiles :

Lorsque le SNR diminue en raison des interférences ou du bruit, le BLR augmente, ce qui impacte directement la fiabilité du système.

d)-Gestion complexe des ressources radio :

Avec un grand nombre d'utilisateurs, la planification dynamique des ressources devient difficile, ce qui peut causer de la congestion et des conflits d'accès.

e) -Sensibilité des techniques classiques à la variation du canal

Les techniques comme OFDM supposent un canal quasi-stationnaire pendant un symbole. Ce n'est plus vrai en 5G, ce qui limite leur performance. Ces limitations techniques montrent clairement que les solutions traditionnelles ne suffisent plus à garantir une transmission fiable et efficace dans les réseaux 5G. Une nouvelle approche devient nécessaire, capable d'exploiter intelligemment les variations du canal. C'est dans ce contexte que les techniques OTFS et ZP-OTFS trouvent toute leur pertinence.

2.9 Conclusion

Les canaux de transmission et les techniques d'accès sont au cœur des performances des systèmes de communication. Leur maîtrise permet d'assurer une transmission efficace et fiable, même dans des environnements complexes. Cependant, avec l'évolution rapide des réseaux et l'apparition de nouvelles exigences, notamment en 5G, les approches classiques montrent certaines limites. D'où la nécessité de se tourner vers des solutions plus avancées, comme la modulation OTFS associée au Zero Padding (ZP), capable de mieux s'adapter aux canaux fortement variables. C'est dans cette perspective que s'inscrit la suite de chapitre 3, consacrée à l'étude du système ZP-OTFS.

Chapitre 3

Les techniques OTFS et ZP-OTFS

3.1 Introduction

L'OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) est une technique novatrice de modulation et de démodulation qui vise à améliorer les performances des communications sans fil dans des environnements présentant des conditions de propagation difficiles. Cette approche, introduite par Y. Eldar et ses collaborateurs, repose sur une transformation mathématique basée sur l'espace-temps-fréquence pour représenter les signaux et surmonter les obstacles couramment rencontrés dans les systèmes de communication OFDM. L'une des publications fondamentales qui a introduit l'OTFS est l'article intitulé "Orthogonal Time Frequency Space Modulation" publié par C. Rusu, Y. C. Eldar, et A. J. Goldsmith dans le journal IEEE Transactions on Communications en 2018 [14]. Cet article décrit les principes fondamentaux de l'OTFS et présente les avantages potentiels de cette technique, notamment la résistance améliorée aux effets du canal et l'augmentation de la capacité du système de communication. Une autre référence clé dans ce domaine est l'article "Orthogonal Time-Frequency Signaling for Fading Multipath Channels" publié par E. Basar et Y. C. Eldar dans le journal IEEE Transactions on Wireless Communications en 2017 [15]. Cette publication explore en détail les aspects théoriques de l'OTFS, en mettant l'accent sur la modélisation mathématique et les avantages de cette approche dans les canaux présentant des conditions de propagation difficiles. En outre, l'article "Orthogonal Time-Frequency Space Modulation" par Y. C. Eldar et G. Caire, publié dans le journal Fondations and Trends in Communications and Information Theory en 2020 [16] fournit une revue exhaustive de l'OTFS, couvrant les aspects théoriques, les algorithmes de modulation et de démodulation, ainsi que les applications potentielles dans les systèmes de communication sans fil. Ces références fournissent une base solide pour comprendre les principes et les applications de l'OTFS dans les communications sans fil. Cependant, il convient de noter que le domaine de l'OTFS est en constante évolution, et de nouvelles recherches et développements sont encore nécessaires pour réaliser pleinement son potentiel dans les systèmes de communication réels. L'objectif de ce chapitre est la présentation de la modulation de base OFDM ainsi que la forme d'ondes multi-porteuses ZP-OTFS proposée pour la future génération des réseaux de communication sans fil.

3.2 Format de Modulation OFDM

Le concept de modulation multi porteuses à multiplexage orthogonal a suscité un grand intérêt. Il est devenu inévitable de résoudre le problème des échos causés par les trajets multiples. Ce

Procédé de modulation permet de diviser un flux d'informations à haut débit en N-flux à bas débit qui modulent respectivement et simultanément N sous-porteuses étroites et mutuellement orthogonales. Par la suite, nous expliquerons le concept de base orthogonale en termes de temps et de fréquence, et nous présenterons le modulateur/démodulateur OFDM [17].

3.2.1 Notion d'Orthogonalité

La Figure 3.1 présente des fonctions de forme rectangulaire qui sont espacées avec un intervalle de garde Δ sur un intervalle de temps t allant de a à b.

Ces fonctions sont mutuellement linéairement indépendantes.

Il est clair que

$$\int_a^b \boldsymbol{f(t)g(t)dt = 0} \tag{3.1}$$

Et que

$$\int_a^b \boldsymbol{g(t)h(t)dt = 0} \tag{3.2}$$

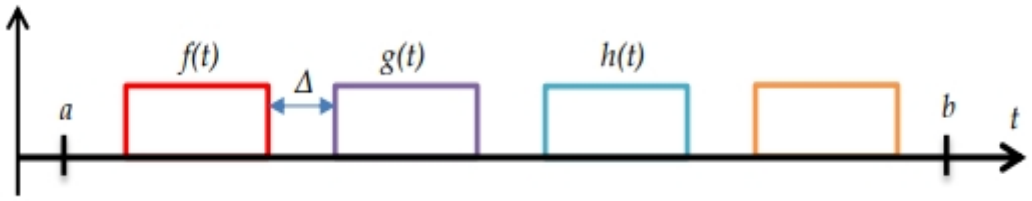


Fig. 3.1 : Base Orthogonale en Temps

Ainsi, ces fonctions constituent une "base orthogonale" dans un espace fonctionnel à N dimensions, paramétré en temps sur un support $\{a, b\}$. Cette base comprend autant de fonctions qu'il y a de points sur le segment temporel $\{a, b\}$. L'équation suivante représente la transformée de Fourier (TF) d'une fonction rectangulaire ou porte ΠTU(t) avec une amplitude A et une largeur TU. Elle est donnée par un sinus cardinal :

$$\boldsymbol{TF\{A\prod_{Tu}\} = A\frac{\sin(\pi f T_u)}{\pi f} = AT_u Sinc(fT_U)} \tag{3.3}$$

Ainsi, en effectuant la transformation de Fourier sur chaque fonction porte ΠTU (t), d'une base orthogonale temporelle, il est possible d'obtenir une base orthogonale fréquentielle de sinus

cardinaux. La Figure 3.2 illustre un exemple de cette base orthogonale en fréquence, dérivée de la base orthogonale en temps décrite précédemment.

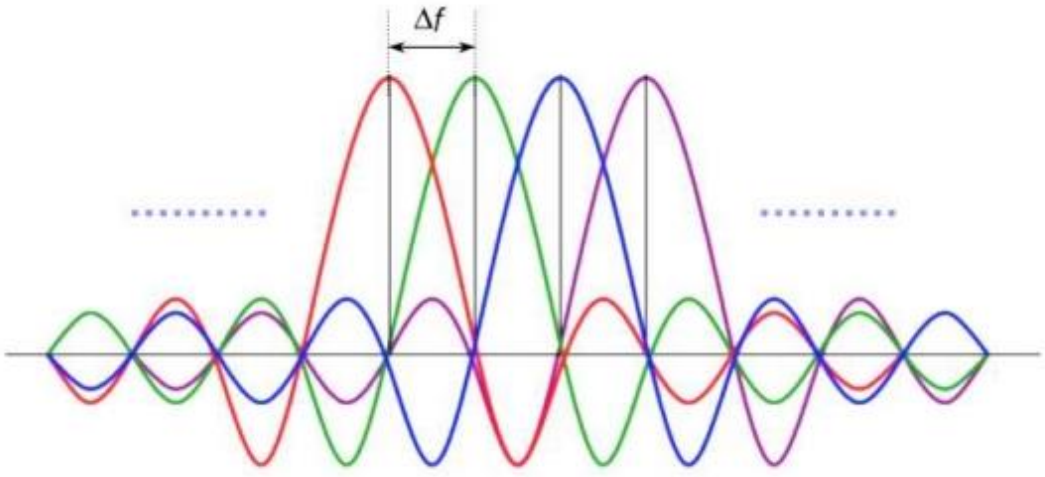


Fig.3.2 : Base Orthogonale en Fréquence

La distance entre les N- sinus cardinaux (sous-porteuses) de la base orthogonale fréquentielle est déterminée par :

$$\Delta F = 1/T \tag{3.4}$$

3.2.2Modulateur OFDM

Contrairement aux systèmes conventionnels qui transmettent les symboles en série, occupant ainsi toute la bande passante disponible, un modulateur OFDM répartit les symboles sur un grand nombre de sous-porteuses à bas débit. Afin de répartir les données à transmettre sur ces N sous-porteuses, les bits de l'information binaire sont transformés en symboles à l'aide de constellations telles que QPSK, QAM, 16-QAM, 64-QAM, etc. Cette opération, appelée "Mapping", qui génère des symboles complexes de la forme :

$$XK = ak + jbk \tag{3.5}$$

Les symboles XK sont groupés en paquets de longueur N. Chaque séquence de N-symboles $X0$, $X1$, $X2$, …, $XN-1$ forme un symbole OFDM. La Figure 3.3 illustre un schéma synoptique qui explique le principe de fonctionnement d'un Modulateur OFDM.

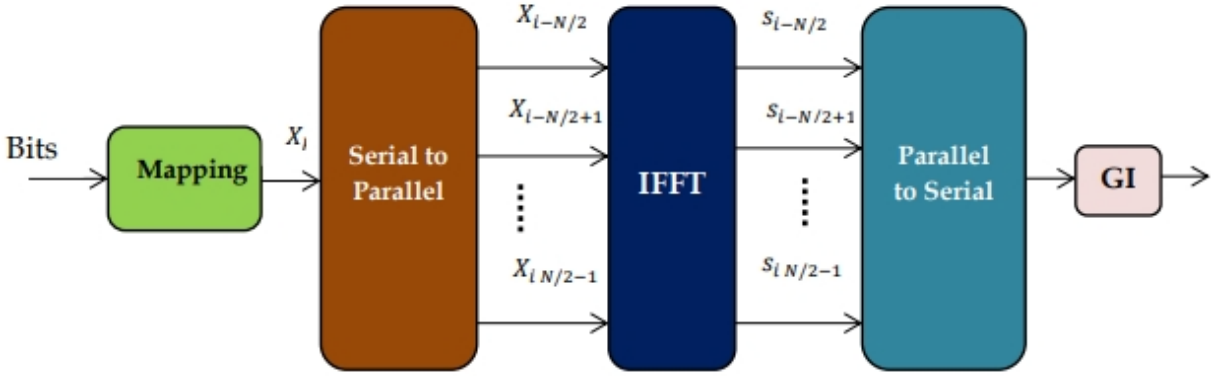


Fig.3.3 : Diagramme Fonctionnel d'un Modulateur OFDM

La réalisation d'un modulateur analogique pour les paquets de symboles est extrêmement complexe car elle nécessite l'utilisation d'un ensemble de modulateurs/démodulateurs synchronisés ainsi que d'un ensemble de filtres de mise en forme adaptés avec un grand nombre de voies. Cependant, ce problème a été simplifié grâce au traitement numérique du signal, en particulier l'utilisation des transformées de Fourier directe et inverse (DFT et IDFT), ce qui a conduit à la mise en œuvre de la technique OFDM [18]. Après l'opération de la IDFT basée sur l'algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier inverse (IFFT), le ième OFDM symbole obtenu pour le ième paquet de longueur N est donné par :

$$s_i(k) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} X_{i,n} e^{\frac{j2\pi nt}{T}} \quad \text{, k=-N/2… N/2-1} \tag{3.6}$$

Où T est la durée du symbole OFDM (fenêtre rectangulaire temporelle de durée T) et N est le nombre de sous-porteuses orthogonales de fréquences :

$$fn = n/\mathrm{T} \tag{3.7}$$

Les fréquences de sous-porteuses sont dites orthogonales si l'espace entre deux fréquences adjacentes est 1/T (c.-à-d.) :

$$fk = f0 + \mathrm{K/T},\ k = 0,1,\ \ldots,\ N-1 \tag{3.8}$$

Où $f0$ représente la première fréquence de la bande du signal. Ainsi, lorsque l'échantillonnage est effectué précisément à la fréquence fk d'une sous-porteuse, il n'y a aucune interférence

avec les autres sous-porteuses. Dans le but de minimiser les interférences entre les symboles OFDM (Inter-Symbol Interference, ISI), on introduit un intervalle de garde (Guard Interval, GI) entre chaque paire de symboles OFDM. La durée de cet intervalle de garde doit être supérieure au retard maximal de propagation dû aux trajets multiples. Cependant, l'ajout d'un intervalle de garde entraîne une diminution du débit [19]. Deux techniques couramment utilisées pour insérer l'intervalle de garde sont les suivantes :

- Le CP (Cyclic-Prefix) : Au début de chaque symbole OFDM, on insère une répétition des derniers échantillons de ce symbole. Cela est réalisé en utilisant ce qu'on appelle un préfixe cyclique (Cyclic Prefix, CP). L'intervalle de garde contient ainsi une partie copiée de la fin du bloc de symbole, qui est ensuite ajoutée au début de celui-ci.

$$N_{CP,l}^{\mu}\begin{cases} 512k\cdot 2^{-\mu} & extended\ cylic\ prefix \\ 144k\cdot 2^{-\mu}+16k & normal\ cylic\ prefix, l=0\ or\ l=7\cdot 2^{\mu} \\ 144k\cdot 2^{-\mu} & normal\ cylic\ prefix\ , l\neq 0\ or\ l\neq 7\cdot 2^{\mu} \end{cases} \quad (3.9)$$

La durée du préfixe cylique peut être calculée à l'aide de la formule (3.10)

$$T_{cp} = N_{cp}\cdot T_c \quad (3.10)$$

$\boldsymbol{\mu}$: représente la numérologie.

$\boldsymbol{l}$: est l'indice du symbole.

$\boldsymbol{k}$: est une constante qui relie l'unité de temps de base de NR et l'unité de temps de base de LTE, et peut être représenté par l'équation. (3.11)

$$k = \frac{T_s}{T_c} = 64 \quad (3.11)$$

T_s : Unité de temps de base de LTE.

T_c : Unité de temps de base de NR.

Le Tableau 3.1, résume la durée du préfixe cyclique en se basant sur les formules précédentes.

Numérologie (μ)	SCS (khz)	CP pour un symbole long	CP pour les autres symboles
0	15KHZ	1=0 ou 7, NCP=5.2μs	NCP=4.69μs
1	30KHZ	1=0 ou 14, NCP=2.86μs	NCP= 2.34μs
2	60KHZ	1=0 ou 28, NCP=1.69μs ECP=4.17μs	NCP=1.17μs NCP=4.17μs
3	120KHZ	1=0 ou 56, NCP=1.11μs	NCP=0.59μs
4	240KHZ	1=0 ou 112, NCP=0.81Sμs	NCP=0.29μs

Tab.3.1 : Longueur du CP pour différentes numérologies [16]

- Le ZP (Zero-Padded) : Dans le cas du ZP-OFDM (Zero Padding-OFDM), des zéros sont ajoutés aux symboles après l'IFFT pour chaque bloc de transmission. Contrairement au CP-OFDM, aucun signal réel n'est transmis dans le ZP-OFDM, ce qui signifie que l'intervalle de garde n'entraîne pas de perte de puissance. Cependant, lors de la réception, au lieu d'utiliser une seule FFT comme dans le cas du CP-OFDM, un filtrage FIR (Finite Impulse Response) ou une technique de zéro forcing est utilisé, ce qui augmente la complexité du récepteur [22].

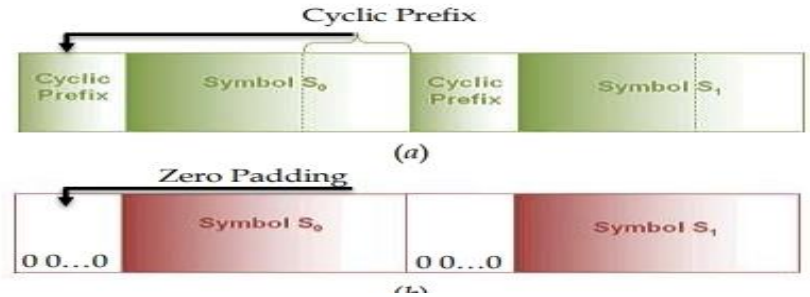


Fig. 3.4 : Techniques d'Insertion de l'Intervalle de Garde (GI), (a)-La technique CP, (b)- La technique ZP

3.2.3 Démodulateur OFDM

A la réception, les opérations inverses sont mises en œuvre. La démodulation OFDM consiste à éliminer l'intervalle de garde, puis à effectuer une transformation de Fourier discrète directe des symboles reçus en utilisant l'algorithme de la FFT.

Le processus est illustré dans la Figure II.6, qui représente le schéma fonctionnel d'un démodulateur OFDM [19].

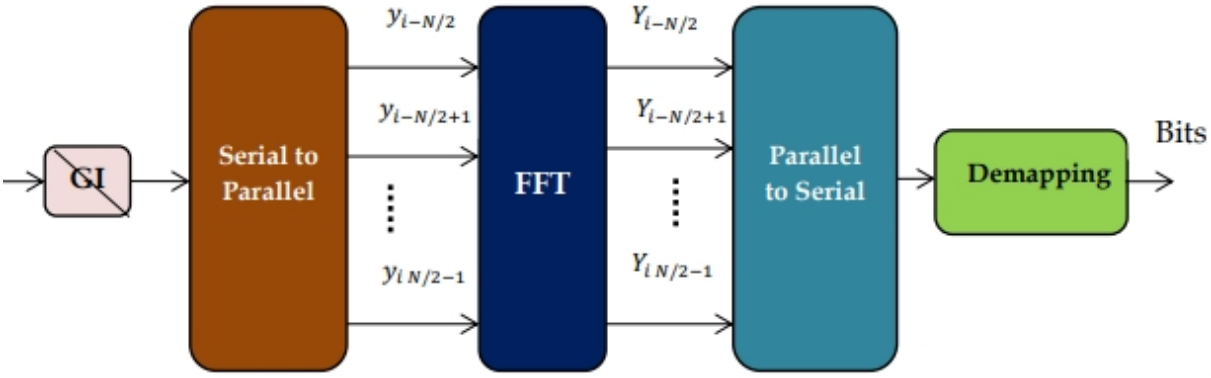


Fig. 3.5 : Diagramme Fonctionnel d'un Démodulateur OFDM

Il convient de noter que, dans les communications à haut débit, les débits sont contraints par des limitations physiques. Les imperfections des systèmes et les caractéristiques physiques des composants ont un impact sur la transmission du signal émis, créant ainsi du bruit. Dans de tels cas, il est essentiel d'incorporer un codeur/décodeur de correction d'erreurs dans le modulateur/démodulateur. Dans la pratique, les schémas OFDM codés, connus sous le nom de COFDM (Coded OFDM), sont couramment utilisés. Lorsqu'une transmission a lieu sur un canal multi-trajets, il est crucial de connaître la réponse impulsionnelle du canal, car elle caractérise les propriétés du canal. Cette connaissance est essentielle pour égaliser le canal au niveau du démodulateur. Le processus de détermination des paramètres du canal, tels que les atténuations et les retards, est appelé estimation du canal. L'égalisation du canal peut être réalisée dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel. L'objectif de cette opération est de réduire au minimum les effets indésirables des canaux multi-trajets, tels que les interférences entre trajets et les interférences entre symboles [23].

3.2.4 Limites de l'OFDM face aux canaux à variation rapide

L'OFDM est l'une des techniques de modulation multivoies les plus répandues dans les systèmes de communication modernes, notamment dans la 4G LTE et le Wi-Fi. Elle est appréciée pour sa simplicité de mise en œuvre, sa robustesse contre la sélectivité en fréquence, et sa capacité à gérer efficacement les canaux à trajets multiples grâce à l'utilisation d'un préfixe cyclique. Cependant, dans des environnements à haute mobilité — typiques des réseaux 5G (par exemple les communications dans les trains à grande vitesse ou les véhicules autonomes), l'OFDM révèle plusieurs limitations majeures [22].

a) - Perte d'orthogonalité due à l'effet Doppler

- Les canaux à variation rapide engendrent un élargissement Doppler qui détruit l'orthogonalité entre les sous-porteuses OFDM, provoquant ainsi :
- Inter-Carrier Interference (ICI),
- Une augmentation du taux d'erreur binaire (BER),
- Une difficulté accrue d'estimation du canal.

b) -Efficacité réduite du préfixe cyclique (CP)

- Le préfixe cyclique est censé absorber l'effet des trajets multiples. Or, lorsque le canal varie rapidement :
- Le CP devient inefficace pour compenser la variation Doppler,
- Son ajout consomme inutilement de la bande passante sans gain réel,
- L'effet du canal n'est plus « constant » durant un symbole OFDM.

c)-Dégradation des performances en milieu très dynamique

- Dans les environnements urbains denses ou à forte mobilité :
- Le canal subit des variations rapides dans le temps,
- Les estimations de canal deviennent rapidement obsolètes,
- La complexité de l'adaptation dynamique du système augmente considérablement.

d)-Faible exploitation de la diversité du canal

OFDM traite les symboles indépendamment sur chaque sous-porteuse. Cela limite sa capacité à exploiter la diversité Doppler et la structure du canal dans le domaine délai-Doppler, ce qui représente une opportunité perdue pour des performances plus robustes.

3.3 Présentation de la modulation OTFS

L'OTFS est une technique de modulation récemment proposée, conçue pour mieux faire face aux défis posés par les canaux fortement sélectifs en temps et en fréquence, comme ceux rencontrés dans les systèmes de communication sans fil de cinquième génération (5G) et au-delà. Contrairement à l'OFDM, qui transmet les données dans le domaine temps-fréquence, l'OTFS opère dans le domaine délai-Doppler. Ce changement de représentation permet d'exploiter la diversité inhérente du canal, en répartissant les symboles de manière globale sur tout le plan délai-Doppler. En raison des limitations de l'OFDM face aux canaux à variation rapide, notamment la perte d'orthogonalité entre les sous-porteuses, la sensibilité accrue à l'effet Doppler, et la faible exploitation de la diversité du canal, une nouvelle approche de modulation a vu le jour : l'OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) [22].

Cette technique repose sur une représentation des signaux dans le domaine délai-Doppler plutôt que dans le domaine temps-fréquence, ce qui permet une meilleure adaptation aux environnements mobiles, une estimation plus stable du canal, et une réduction significative des interférences. OTFS se positionne ainsi comme une solution prometteuse pour les communications sans fil de nouvelle génération.

3.3.1Format de Modulation OTFS

Le format de modulation OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) peut être considéré comme une amélioration de la modulation OFDM. La transition d'OFDM à l'OTFS nécessite un prétraitement au niveau de l'émetteur et récepteur [24].

3.3.2 Principe de fonctionnement de l'OTFS

L'OTFS utilise le domaine retard-Doppler pour la transmission des données, offrant plusieurs avantages :

- Représentation plus naturelle du canal radio mobile
- Meilleure gestion de l'effet Doppler
- Exploitation de la diversité temps-fréquence
- Performance supérieure dans les canaux à foret mobilité

a) - Fonctionnement

Le schéma de transmission de la chaine OTFS (issu du site MATLAB) est le suivant :

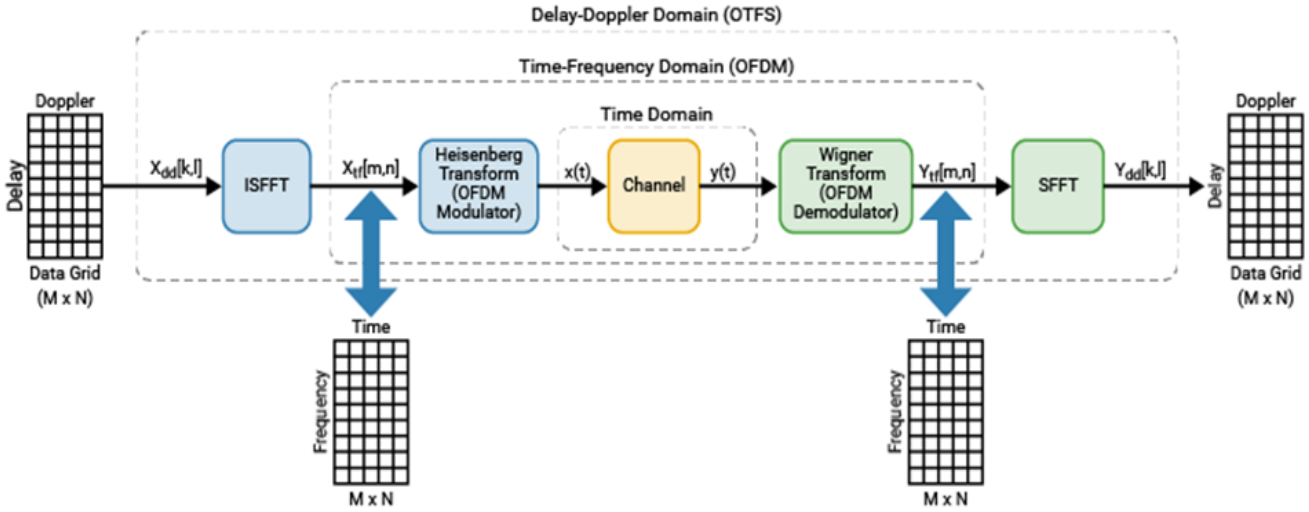


Fig. 3.6 : Chaine de transmission OTFS

1-ISFFT/SFFT : transformation du domaine temps-fréquence depuis/vers le domaine retard-Doppler : le canal de propagation est défini par la matrice H, qui représente la dimension de temps et de fréquence.

A. Pour une fréquence donnée, on regarde l'évolution du canal dans le temps.
B. Pour un temps donné, on connait l'évolution du canal en fréquence.

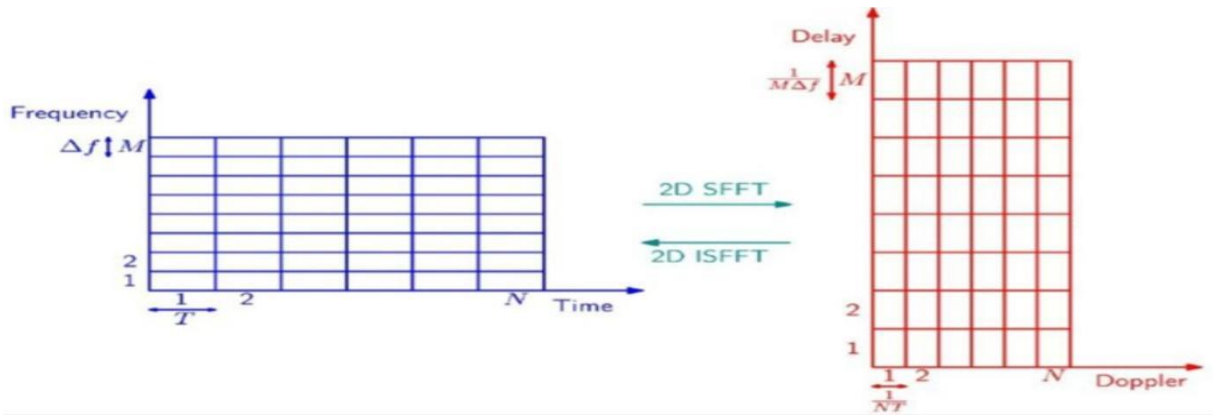


Fig. 3.7 : Passage du domaine temps /fréquence en delai/Doppler

La relation entre la représentation du canal en temps et en fréquence H (t, f) et celle du canal en délai-doppler H (τ, υ) s'obtient à partir de la transformée de Fourier symplectique bidirectionnelles SFT.

$$h(\tau, v) = SFT\{H(f,t)\} = \iint H(f,t)e^{-j2\pi(vt-f\tau)}dtdf \qquad 3.12$$

La transformée de Fourier inverse se calculer par :

$$\text{H(f,t)=ISFT}\{h(\tau,v)\} = \iint h(\tau,v)e^{j2\pi(vt-f\tau)}d\tau dv \qquad 3.13$$

Ainsi, le signal en sortie de la transformée inverse ISFFT s'écrit :

$$X_{tf}[m,n] = \frac{1}{MN}\sum_{l=0}^{M-1}\sum_{k=0}^{N-1} X_{dd}[k,l]e^{j2\pi(\frac{nk}{N}-\frac{ml}{M}} \qquad 3.14$$

3.3.3Modulation des symboles dans le domaine retard-Doppler :

On applique une transformée de Heisenberger. Le signal émis est transcrit dans le domaine temporel à partir de la transformation de Heisenberg (IFFT)

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1} X_{tf}[m,n]g(t-nT)e^{j2\pi m\Delta f(t-nT)} \qquad (3.15)$$

La Figure 3.8 ci-dessous montre le schéma fonctionnel d'un modulateur OTFS. Considérons un ensemble de $N \times M$ symboles d'information $x\,[k, l]$, $k = 0, \ldots, N-1$, $l = 0, \ldots, M-1$ à partir d'un alphabet de modulation $A = \{a1, \cdots, a|A|\}$ (par exemple QAM), qui sont disposés sur une grille 2D retard – Doppler Γ que nous souhaitons transmettre. L'OTFS mappe $x\,[k, l]$ aux symboles $X\,[n, m]$ dans le domaine temps-fréquence en utilisant la transformée de Fourier finie symplectique inverse
(ISFFT) comme suit :

$$Xp\ [n,\ m]\ =\ \text{ISFFT}\ (xp\ [k,\ l])=\frac{1}{N.M}\sum_{k,l} x_p[k,l]g_{Tx.}e^{j2\pi\left(\frac{nk}{N}-\frac{ml}{M}\right)}, l = 0, \ldots., M-1\ k = 0, \ldots, N-1 \qquad (3.16)$$

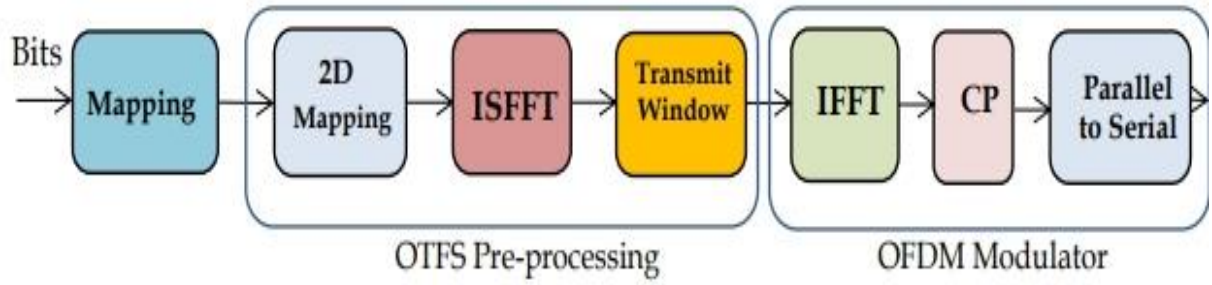


Fig. 3.8 : Diagramme Fonctionnel d'un Modulateur OTFS

L'équation est une généralisation de la modulation OFDM qui mappe les symboles d'information du domaine fréquentiel au domaine temporel. Si $N = 1$ et la fenêtre de transmission (Transmit Windows) $g(t)$ est une forme d'onde rectangulaire avec une durée T. Par conséquent, un symbole OTFS peut être considéré comme un pré-codage ISFFT appliqué sur N symboles OFDM indépendants consécutifs avec *M* sous-porteuses [25].

3.3.4 Démodulation du signal.

Le signal reçu est transformé dans le domaine temps/fréquence par la transformation de Wiener (FFT). Au niveau du récepteur, le signal reçu est d'abord transmis à travers un démodulateur OFDM adapté au modulateur utilisé au niveau de l'émetteur. Le signal résultant, c'està-dire, après la conversion série parallèle du signal reçu, la suppression du CP, et la N-FFT de longueur N est appliquée à chaque symbole OFDM est ensuite passé à travers un bloc de post-traitement OTFS. Après égalisation de canal, les symboles de données sont extraits des sous-porteuses correspondantes [24].

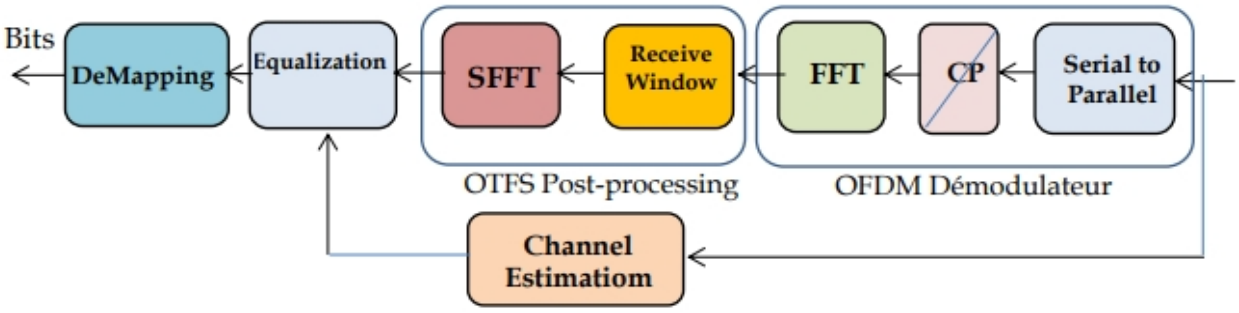


Fig.3.9 : Diagramme Fonctionnel d'un Démodulateur OTFS

On note que la combinaison de fenêtrage et de SFFT inverse est appelée la transformation OTFS. Par la suite, le signal obtenu est donné par

$xp\,[k, l]$ = SFFT ($Xp\,[n, m]$)

$$\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} X_p[n,m].\, g_{Rx}.\, e^{-j2\pi\left(\frac{nk}{N}-\frac{ml}{M}\right)} \;, l = 0, \dots, M-1 \; k = 0, \dots, N-1 \qquad (3.17)$$

Après la conversion des symboles en un vecteur, une égalisation Zéro-Forcing (ZF) ou MMSE est établie afin d'extraire les symboles de donnés. Égalisation simplifiée grâce à la structure du

canal dans le domaine retard-Doppler. Par la transformation SFFT, le signal est ramené dans le domaine retard/doppler. L'égalisation est réalisée par un filtre adapté [26].
Le schéma de modulation OTFS peut être réalisé par la transformation inverse de Zak :

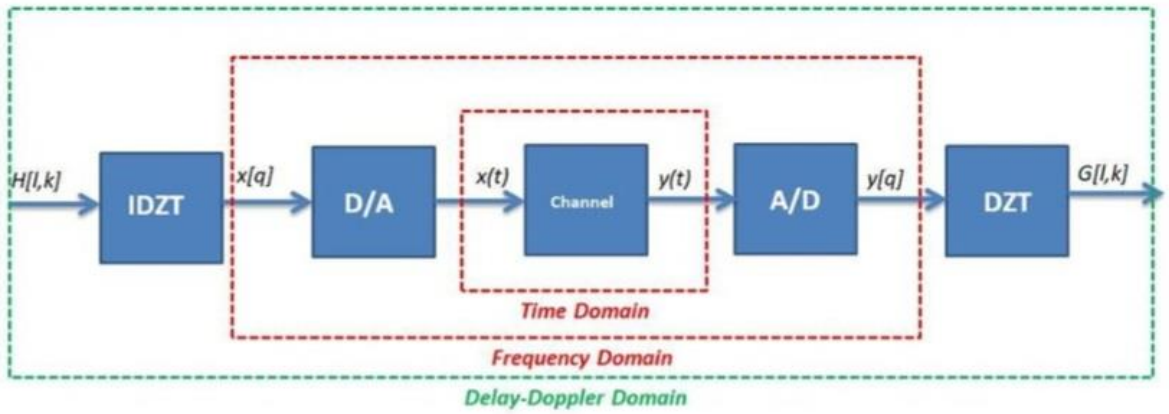


Fig. 3.10 : Utilisation de la transformée de Zak discrète

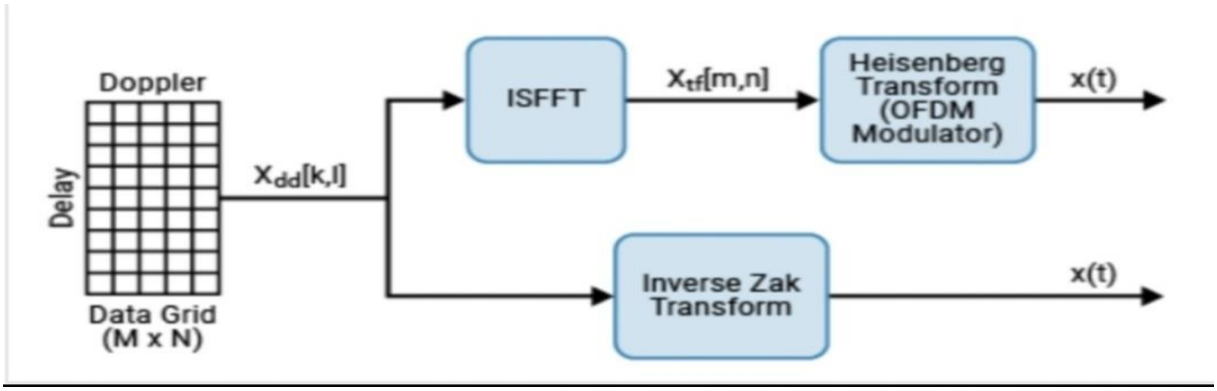


Fig. 3.11 : L'équivalence entre transformée inverse de Zak et l'OTFS

3.3.5 Amélioration de l'OTFS par Zero Padding : la ZP-OTFs

Le système ZP-OTFS (Zero-Forcing Orthogonal Time Frequency Space) est une technologie avancée de communication sans fil qui permet de surmonter certains des défis liés aux canaux de communication à haute mobilité et à forte dispersion de retard. Le concept de ZP-OTFS repose sur l'utilisation de la transformation symplectique de Fourier (SFFT) et de la transformation inverse symplectique de Fourier (ISFFT). Cette approche est combinée à l'utilisation de la technique de Zero Padding (ZP) qui permet de simplifier les techniques de démodulation dans des environnements mobiles complexes [25].

Les principales caractéristiques de ZP-OTFS sont :

- Une robustesse accrue contre les effets de mobilité élevée.
- Une meilleure efficacité spectrale.
- Une simplification des processus d'égalisation et de démodulation dans les systèmes à haute vitesse de propagation.

3.3.5.1 Modulation ZP-OTFS

Le processus de modulation dans un système ZP-OTFS comprend les étapes suivantes :

a) - Mapping des symboles dans le domaine délai-Doppler :

Les symboles d'information x[k,l] sont placés sur une grille bidimensionnelle représentant les retards (k) et les décalages Doppler (l).

b) - Transformation Inverse Symplectique de Fourier Finie (ISFFT) :

Cette transformation convertit les symboles du domaine délai-Doppler au domaine temps-fréquence.

c) - Transformation de Heisenberg (Modulation OFDM) :

Les symboles dans le domaine temps-fréquence X[n,m] sont convertis en un signal temporel s(t) via la transformation de Heisenberg.

d)- Ajout du Zero Padding (ZP) :

Des zéros sont ajoutés à la fin de chaque bloc temporel :

$$s_ZP(t) = [s(t), 0, 0, ..., 0] \quad (3.18)$$

3.3.5.2. Transmission sur le canal

Le signal est transmis à travers un canal sans fil souvent modélisé dans le domaine délai-Doppler

.

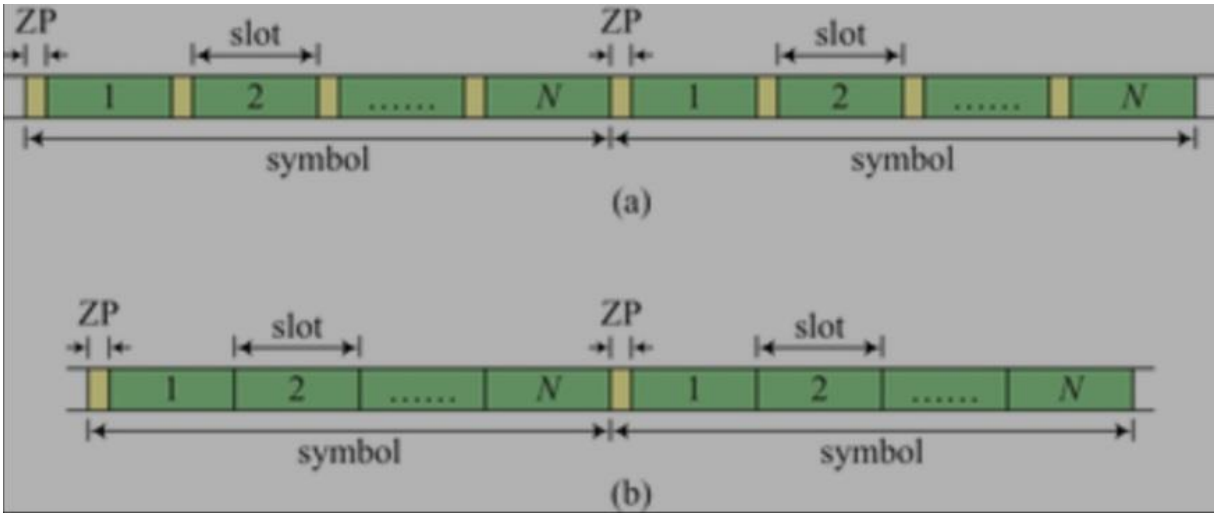


Fig.3.12 : Diagramme fonctionnel d'un Modulateur ZP-OTFS

3.3.5.3 Démodulation ZP-OTFS

À la réception, le processus inverse est appliqué :

- Suppression du Zero Padding : Les zéros ajoutés sont retirés pour récupérer le signal utile.
- Transformation de Wigner (Démodulation OFDM) : Le signal temporel est converti au domaine temps-fréquence :
- Transformation Symplectique de Fourier Finie (SFFT) : Les symboles dans le domaine temps-fréquence sont convertis au domaine délai-Doppler

3.3.5.4. Détection des symboles

Les symboles y[k,l] sont détectés en utilisant des techniques d'égalisation adaptées, telles que MMSE ou ML.

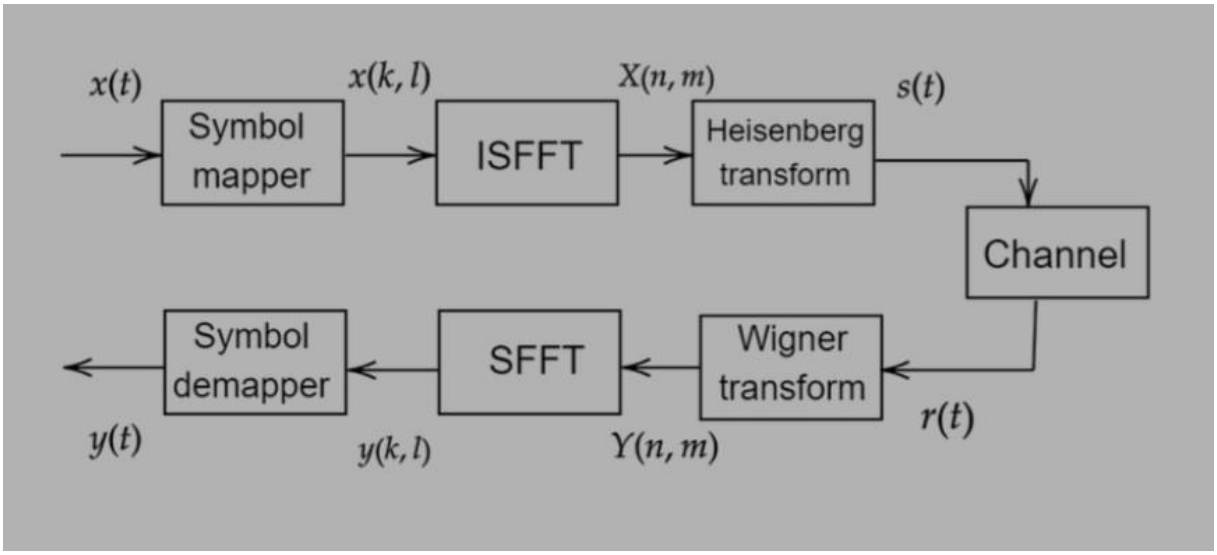


Fig3.13 : Diagramme fonctionnel d'un Démodulateur ZP-OTFS

3.4 Architecture MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Le MIMO (Multiple Input Multiple Output) est une technologie utilisée dans les systèmes de communication sans fil. Elle emploie plusieurs antennes à l'émission (Tx) et à la réception (Rx) pour améliorer les performances du système. Les objectifs sont d'augmenter le débit de données, améliorer la fiabilité du signal et optimiser l'utilisation du spectre.

3.4.1 Présentation de la technique MIMO

Les systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output) exploitent la diversité spatiale pour surmonter les phénomènes d'évanouissement et de multi-trajets. En utilisant plusieurs antennes, le récepteur combine des copies du signal pour améliorer la fiabilité de transmission (gain de diversité) en réduisant la probabilité d'erreur et augmenter le débit (gain de multiplexage). La conception fondamentale des systèmes MIMO est relativement simple ; elle implique la transmission simultanée d'informations dans une bande de fréquence déterminée en utilisant plusieurs antennes à l'émission et à la réception comme le montre la Figure 3.13. En première approximation, le débit transmis dans cette plage de fréquence est directement proportionnel au nombre d'antennes émettrices. Cependant, la mise en œuvre pratique de cette idée pose des défis complexes, car tous les signaux émis se mélangent, nécessitant ainsi la capacité de séparer les composants du mélange. Pour résoudre ce problème, des méthodes avancées de traitement du signal sont requises du côté du récepteur. L'utilisation de réseaux d'antennes tant en émission qu'en réception vise à améliorer l'efficacité spectrale et/ou la fiabilité des transmissions numériques, en particulier dans des environnements riches en diffuseurs [20].

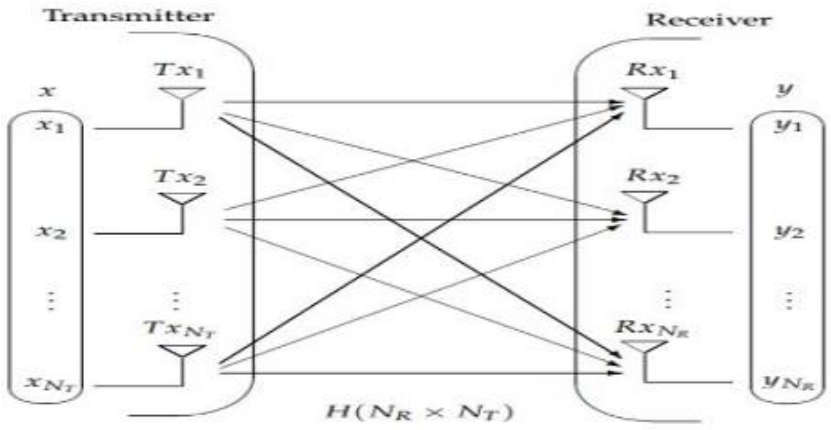


Fig 1.14 : Modèle MIMO

3.4.2 Diversité Spatial MIMO

Cette technique implique la transmission simultanée d'une même information à travers différentes antennes d'émission. Lors de la réception, tous les signaux reçus sur les antennes de réception sont sommés d'une manière cohérente. Une version simplifiée de cette technique consiste à utiliser uniquement le signal de la meilleure antenne réceptrice, généralement celle qui reçoit le meilleur signal (antenne polarisée). Cette approche permet d'améliorer le rapport signal sur bruit SNR (Signal Noise Ratio) grâce au gain de diversité de la transmission [18]. Pour que la diversité spatiale soit bien efficace, il est crucial que les sous-canaux MIMO soient décorrélés entre eux or indépendants [17].

3.4.3 Multiplexage Spatial MIMO

L'utilisation du MIMO massif, est l'une des nouveautés de la 5G. Il permet de mieux couvrir les zones surchargées. Le MIMO massif assure une meilleure fiabilité, permet de réduire la latence et d'augmenter les débits. Contrairement au MIMO classique, qui utilise quelques antennes par pylône, le MIMO massif s'appuie sur une centaine d'antennes pour envoyer le signal aux appareils connectés. L'idée est d'utiliser un grand nombre d'éléments d'antennes en réseau pour générer des profils de rayonnement très directifs. Ses principales caractéristiques incluent un nombre élevé d'antennes, permettant une meilleure exploitation de la diversité spatiale, l'utilisation de techniques de formation de faisceau pour une liaison de qualité et une

réduction des interférences, une efficacité spectrale améliorée grâce à l'exploitation simultanée de multiples canaux de communication [29].

3.4.4 Beamforming

Le beamforming est une autre technologie révolutionnaire essentielle au succès de la 5G qui permet de concentrer la puissance rayonnée omnidirectionnelle de l'antenne dans une ou plusieurs directions spécifiques. Les stations de base conventionnelles transmettent des signaux dans de multiples directions, sans tenir compte de l'emplacement des utilisateurs ni des appareils ciblés. Néanmoins, les antennes 5G dirigent les ondes radio directement vers une cible plutôt que de les diffuser dans toutes les directions c'est-à-dire le signal est dirigé dans une direction précise plutôt que d'être dirigé dans toutes les directions. Dans le système 5G, la formation de faisceau désigne la transmission d'un signal de forme plus étroite de la station de base au récepteur de telle sorte que seul l'utilisateur prévu peut récupérer les informations tout en rejetant les interférences provenant d'autres directions. Le beamforming présente l'avantage de permettre aux antennes relais d'émettre uniquement lorsque nécessaire, évitant ainsi une émission continue. Cela se traduit par une économie d'énergie significative. La Figure 1.15 présente le beamforming conventionnel, le Beamforming 3D pour un utilisateur unique et pour plusieurs utilisateurs [28].

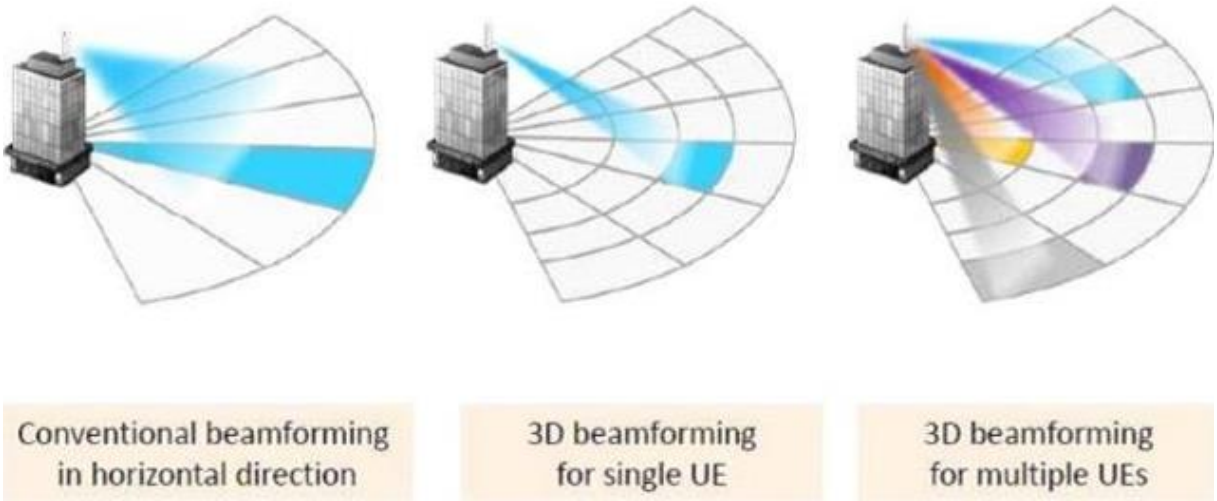


Fig 1.15 : Beamforming de l'UE

3.4.5. Intégration de MIMO avec ZP-OTFS

La modulation OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) est conçue pour les environnements fortement sélectifs en fréquence et en temps, comme ceux rencontrés dans les réseaux 5G.

L'intégration de MIMO avec OTFS permet d'exploiter les avantages des deux techniques pour améliorer la robustesse et l'efficacité du système [27].

a) - Principe de ZP-OTFS

ZP-OTFS (Zero Padding OTFS) ajoute des zéros en début et fin des blocs de symboles OTFS afin de faciliter le traitement au niveau du récepteur et d'éviter l'interférence inter-blocs. Cela rend le système plus compatible avec l'égalisation en environnement MIMO [26].

b) - Avantages de la combinaison MIMO-ZP-OTFS

- Meilleure robustesse contre les effets de propagation multi-trajets.
- Gain en diversité spatiale et temporelle.

- Réduction du taux d'erreur grâce à la structure ZP.

- Meilleure performance dans les scénarios à haute mobilité (ex. véhicules, trains).

c)- Modélisation mathématique

L'équation MIMO standard devient dans le cas ZP-OTFS :

$$Y = H_eff \cdot X + N$$

Où :

- Y : vecteur des symboles reçus après transformation OTFS inverse
- H_eff : matrice de canal effective prenant en compte la modulation OTFS et la structure ZP
- X : vecteur des symboles OTFS transmis

- N : bruit

3.5. Comparaison entre OFDM, OTFS et ZP-OTFS

Le tableau suivant résume les principales différences entre les techniques de modulation OFDM, OTFS et ZP-OTFS [24]

Critère	OFDM	OTFS	ZP-OTFS
Résistance aux interferences	Faible	Élevée	Très élevée
Performances en mobilité	Mauvaises	Bonnes	Excellentes
Complexité	Faible	Élevée	Modérée à élevée
Utilisation du domaine	Temps-Fréquence	Délai-Doppler	Délai-Doppler avec Padding
Taux d'erreur	Élevé en canaux rapides	Faible	Très faible
Facilité d'égalisation	Simple	Complexe	Facilitée par ZP
Compatibilité MIMO	Bonne	Bonne	Excellente avec traitement simplifié

Tab.3.2 : Comparaison entre OFDM, OTFS et ZP-OTFS

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les performances de la modulation multi porteuse OTFS, proposée comme solution aux limitations de l'OFDM dans les canaux à trajets multiples et variant dans le temps, notamment dans le contexte des réseaux 5G. Contrairement à l'OFDM, la modulation OTFS applique un prétraitement à l'émetteur basé sur la transformée ISFFT afin de mapper les symboles dans le domaine délai-Doppler. À la réception, un post-traitement est requis après la démodulation OFDM pour extraire correctement les symboles transmis. Par ailleurs, une attention particulière a été portée à la variante ZP-OTFS, qui introduit un préfixe nul (Zero Padding) pour renforcer la robustesse du système face aux effets de dispersion du canal, améliorant ainsi les performances globales de la transmission.

Chapitre 4

Simulation et Résultats

4.1. Introduction

Après avoir finalisé la partie théorique, nous passons dans ce chapitre à l'implémentation de notre application, L'objectif est d'examiner le système de modulation ZP-OTFS proposé pour les systèmes mobile 5G et 6G. Dans ce contexte nous décrivons en premier lieu l'effet de plusieurs paramètres (type du canal et type de modulation) sur les performances du système de modulation ZP-OTFS. Finalement nous présentons les résultats des simulations réalisés pour évaluer le taux d'erreur binaire (BER).

4.2. Langage utilisé

MATLAB, acronyme de "Matrix Laboratory", est un environnement de programmation et un langage, largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie, des sciences et de la recherche. Il offre une gamme étendue de fonctionnalités pour le calcul numérique, la visualisation des données, le traitement du signal et bien plus encore. Grâce à sa richesse fonctionnelle et à sa convivialité, il est souvent privilégié pour résoudre des problèmes complexes, y compris la simulation des systèmes de communication avancés comme ceux de la technologie 5G. Ses fonctionnalités de modélisation de communication avancés comme ceux de la technologie 5G. Ses fonctionnalités de modélisation de haute précision et ses outils de simulation sophistiqués en font un allié de premier plan pour les projets dans le domaine de la 5G. De plus, les boîtes à outils (Toolbox) 5G de MATALB viennent enrichir son écosystème, offrant une panoplie d'outils spécialisés pour la modélisation des canaux de propagation, la simulation de la couche physique (PHY), la conception et l'évaluation des schémas de modulation et de codage, ainsi que l'analyse des performances système et ceci pour divers scénarios.

4.3. Objectifs de l'analyse

Les résultats obtenus ont permis de quantifier l'impact de l'utilisation du ZP sur la robustesse du système face à la sélectivité en fréquence et au fading rapide, caractéristiques des environnements 5G.

4.4. Méthodes d'analyse

Dans ce travail, nous avons adopté une approche basée sur la simulation numérique pour analyser les performances du système ZP-OTFS (Zero Padding - Orthogonal Time Frequency Space) dans le contexte des communications 5G. Les simulations ont été réalisées sous l'environnement MATLAB afin d'évaluer les performances du système en termes de taux d'erreur binaire (BER) et de rapport signal sur bruit (SNR), dans différents types de canaux sans fil, notamment le canal AWGN, Rician et le canal Rayleigh.

a)- Bit Error Rate (BER)

Le BER (Bit Error Rate) est calculé, pour un SNR donné, à partir de l'équation suivante :

$$\mathbf{BER} = \frac{Nombre\ de\ bits\ erronés\ en\ réception\ (Ne)}{Nombre\ de\ bits\ envoyés\ (N)}$$

4.5. Détails sur la simulation

Pour effectuer la simulation du système ZP-OTFS, nous avons développé un script MATLAB qui modélise le processus de transmission, la transformation OTFS, l'insertion de ZP, la propagation dans le canal (Rician et Rayleigh), et le processus de réception. Le système est évalué selon différents niveaux de SNR afin de tracer les courbes BER (Bit Error Rate).

Les étapes principales de la simulation sont les suivantes :

1. Génération de symboles aléatoires modulés (QAM).
2. Mappage dans le domaine Doppler-Temps via la transformée symplectique inverse.
3. Insertion du Zero Padding (ZP) avant transmission.
4. Transmission à travers un canal AWGN, Rician ou Rayleigh simulé.
5. Réception et traitement inverse (suppression du ZP, transformation inverse OTFS).
6. Détection et démodulation des symboles reçus.
7. Calcul du BER pour différents SNR.

Les paramètres simulés incluent : la taille de la grille OTFS, l'ordre de modulation, la longueur du ZP, et les caractéristiques du canal (facteur K pour Rician, Doppler shift, etc.). Les résultats de simulation sont présentés sous forme de courbes BER vs SNR.

4.6 Evaluation des résultats

Dans cette partie, nous étudions de l'effet de type du canal dans les systèmes de communication ZP-OTFS, chaque type du canal est caractérisé par des phénomènes physiques particulières. Nous évaluations trois types des canaux de transmission tels que : AWGN, Rayleigh et Rician avec de différents types de modulations PSK et QAM.

4.6.1 La technique ZP-OTFS et effet des modulations PSK/QAM dans un canal AWGN

Nous présenterons dans un premier temps l'effet de type de modulations PSK/QAM dans un canal AWGN. Pour cela, une analyse comparative des différents types des modulations PSK/QAM dans un canal AWGN est présentée, dans la Figure 4.1.

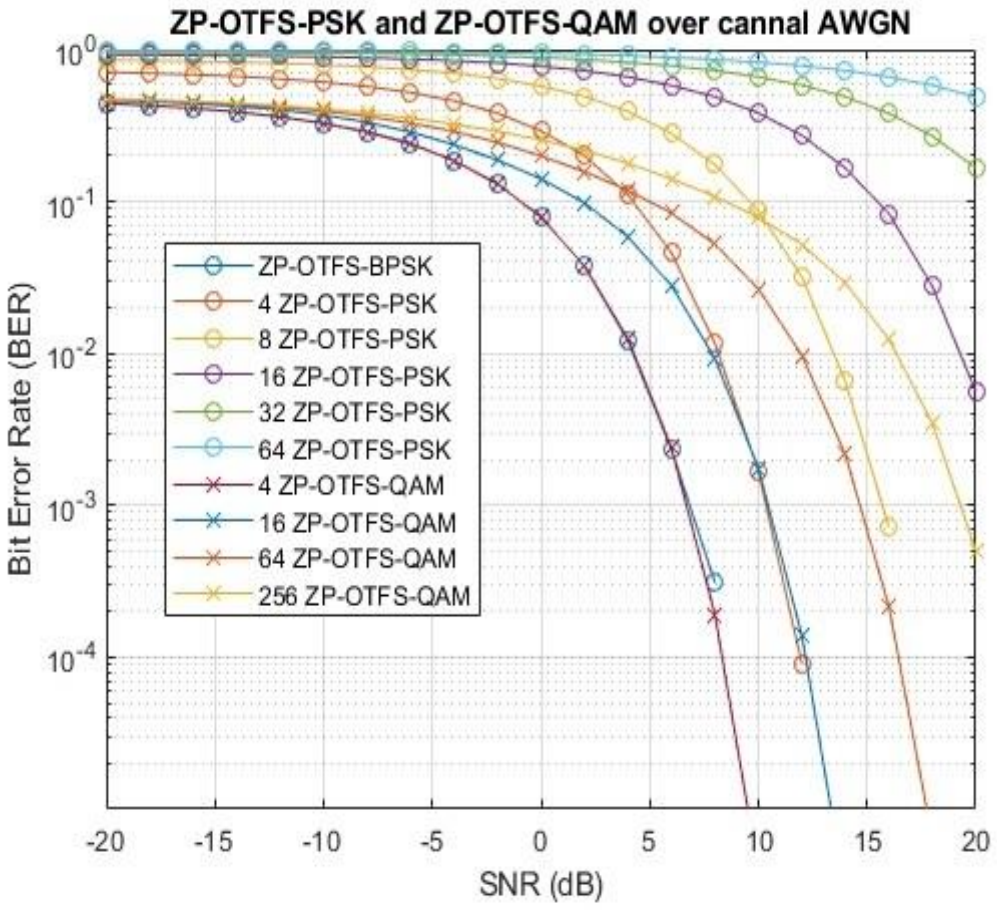


Fig. 4.1 : La technique ZP-OTFS et les modulations PSK/QAM dans un canal AWGN

A partir des résultats illustrés dans la Figure.4.1, ci-dessus, on remarque que les courbes BER montrent que les modulations de bas ordre comme **BPSK et QPSK** offrent de très bonnes

performances à faible SNR. Les modulations à plus haute densité, telles que **16-PSK, 64-QAM**, sont plus sensibles au bruit et nécessitent un SNR plus élevé pour atteindre une BER acceptable.

Conclusion : Plus l'ordre de modulation est élevé, plus le système est sensible au bruit dans un canal AWGN.

4.6.2 La performance de ZP-OTFS en canal Rayleigh avec modulations PSK

Dans cette section, nous avons utilisé un canal multi-trajets de type Rayleigh, qui est un canal radio avec évanouissement aléatoire, est déterminée par la probabilité d'erreur de bit ou de symbole. Le PSK est une technique de modulation où les données sont transmises en variant la phase de la porteuse. En canal Rayleigh, la performance des modulations PSK est influencée par les évanouissements qui modifient le signal. Les modulations PSK, comme BPSK, 4-PSK, et 8-PSK, ont des performances différentes en fonction de leur nombre de phases et de leur sensibilité aux évanouissements.

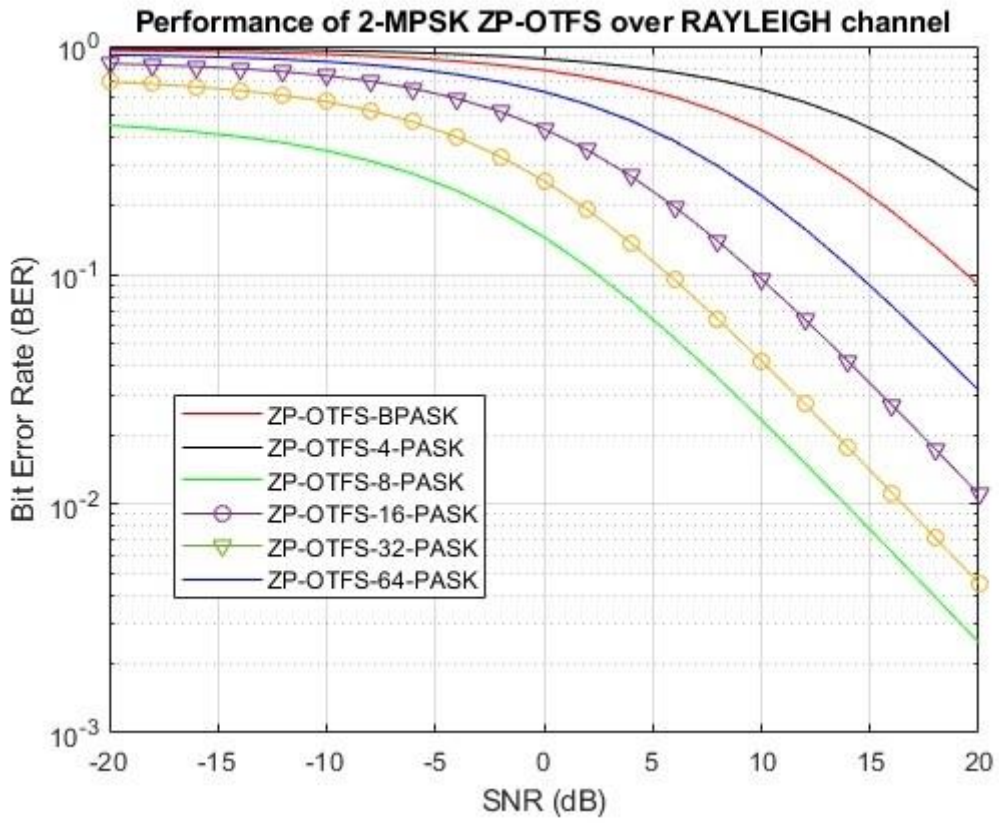


Fig.4.2 La technique OTFS et le canal Rayleigh avec modulations PSK

A partir des résultats illustrés dans la Figure.4.2 ci-dessus, le canal Rayleigh introduit des variations rapides d'amplitude dues à l'effet de trajets multiples sans ligne de vue (LOS). On remarque que la détérioration générale des performances par rapport à AWGN. Les modulations comme BPSK résistent mieux à ces conditions, tandis que 8-PSK et 16-PSK présentent des BER élevées.

Conclusion : Les modulations PSK de bas ordre sont plus adaptées aux environnements Rayleigh.

4.6.3 La performance de ZP-OTFS en canal Rayleigh avec modulations QAM

Dans cette section, nous avons utilisé un canal multi-trajets de type Rayleigh et les modulations QAM sont utilisées dans un canal de Rayleigh pour améliorer la robustesse du système de transmission. Le canal Rayleigh introduit des pertes de signal et une fading (atténuation) en fonction de la distance et de la fréquence. Les modulations QAM, en combinant les composantes en amplitude de deux signaux de modulation d'amplitude, peuvent offrir une meilleure performance en termes de taux d'erreur de bits et la robustesse face aux perturbations.

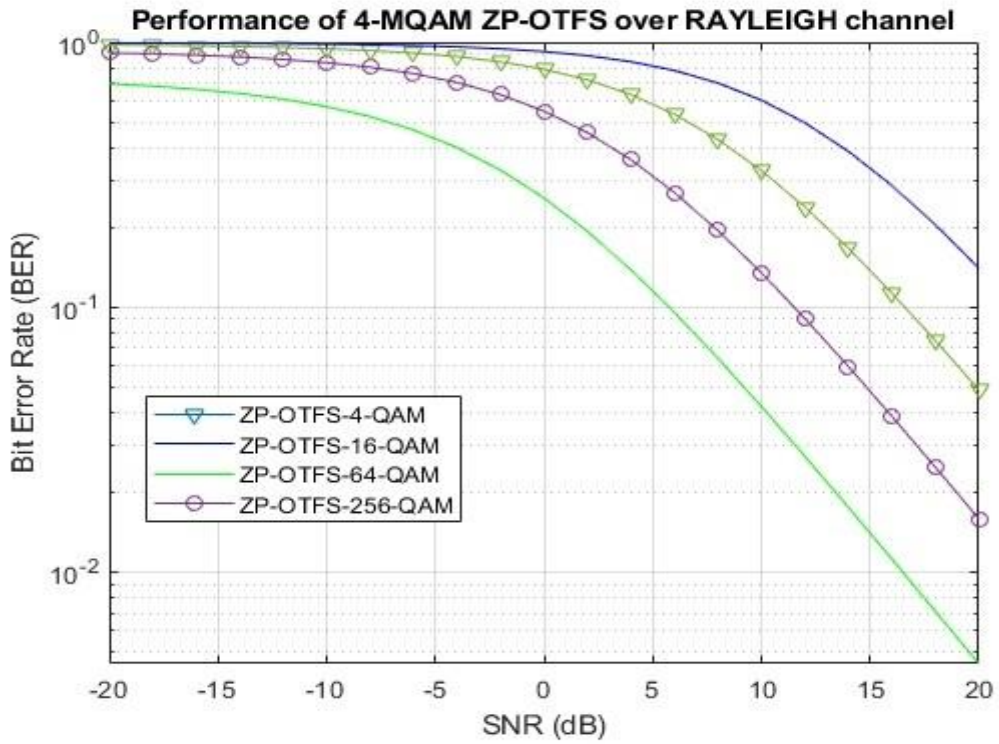


Fig.4.3 La technique OTFS et le canal Rayleigh avec modulations QAM

Les résultats obtenus sous Rayleigh avec les modulations QAM montrent une tendance similaire à celle des modulations PSK. **4-QAM** reste relativement stable, tandis que **16-QAM** et surtout **64-QAM** montrent une augmentation significative du taux d'erreur à faible SNR.

Conclusion : Le canal Rayleigh accentue les erreurs, surtout pour les modulations QAM de haut ordre.

4.6.4 La performance de ZP-OTFS en canal Rician avec modulations PSK

Dans cette section, nous avons utilisé le canal Rician avec la modulation PSK, nous avons évalué la technique ZP-OTFS pour améliorer la robustesse des communications dans des environnements fortement sélectifs en temps et en fréquence, comme ceux caractérisés par un canal Rician. Dans ce type de canal, où une composante en ligne de vue (LOS) coexiste avec des trajets diffus. En intégrant un remplissage par zéros (ZP), ZP-OTFS limite l'interférence inter-bloc, simplifiant l'égalisation et améliorant la détection des symboles. Lorsqu'elle est combinée à des modulations PSK (comme BPSK ou 8PSK).

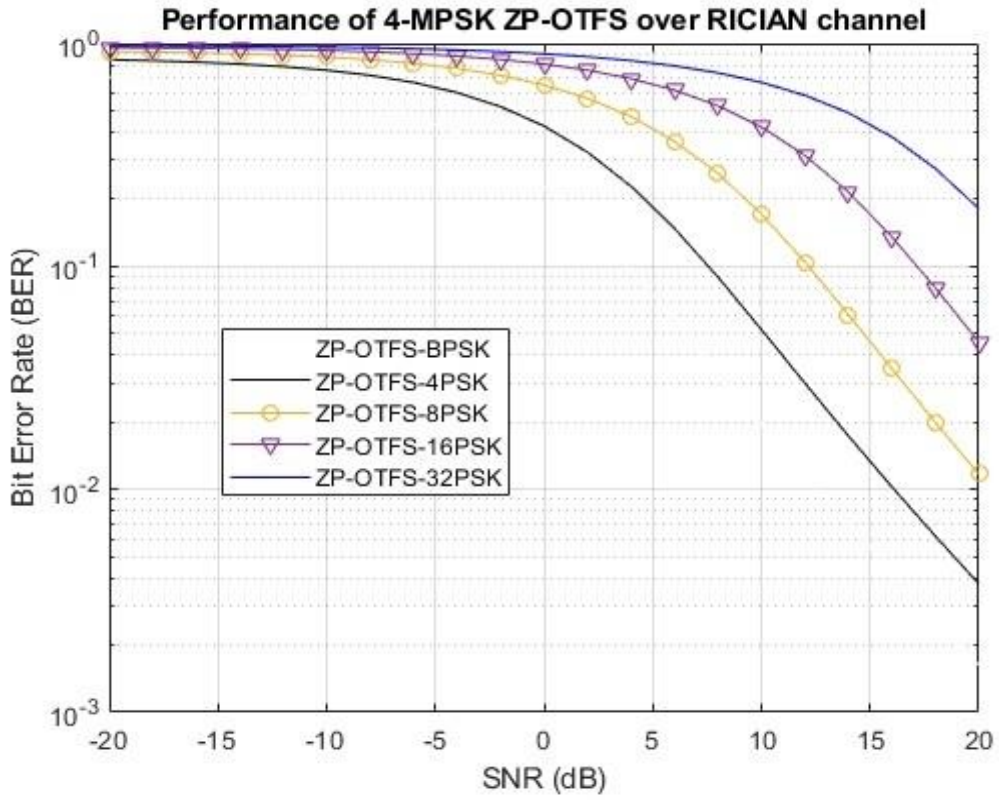


Fig.4.4 3 La technique OTFS et le canal Rician avec modulations PSK

A partir des résultats illustrés dans la Figure.4.4 ci-dessus, le canal Rician introduit une composante directe (LOS) en plus des trajets multiples, ce qui améliore globalement les performances par rapport au Rayleigh. Les modulations **BPSK et QPSK** en profitent particulièrement bien, avec une BER nettement réduite.

Conclusion : L'effet de ligne de vue améliore les performances, surtout pour les modulations de bas ordre.

4.6.4 La performance de ZP-OTFS en canal Rician avec modulations QAM

Dans cette section, nous avons utilisé le canal Rician avec la modulation QAM, nous avons évalué la technique ZP-OTFS sur la performance du canal Rician avec des modulations QAM. Dans un tel canal, la présence d'une composante LOS dans le canal Ricin améliore la fiabilité de la transmission par rapport à un canal Rayleigh.

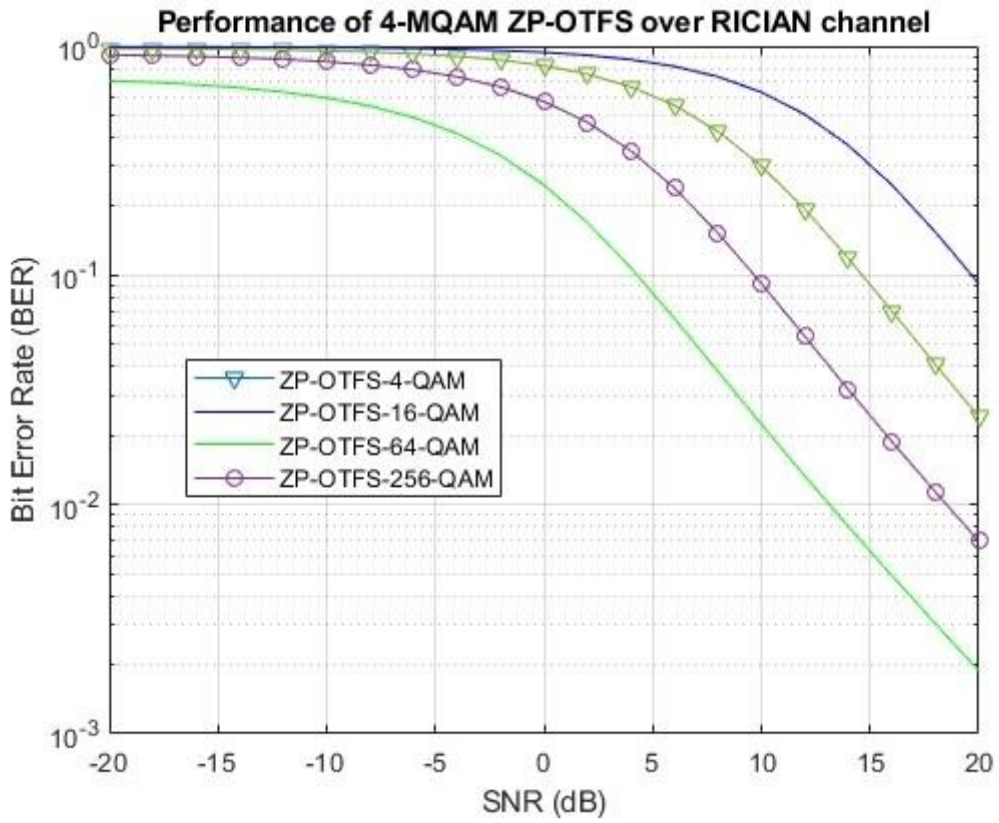


Fig.4.5 3 La technique OTFS et la performance du canal Rician avec modulations QAM

Dans un canal Rician, les modulations QAM bénéficient également de la composante directe. 4-QAM et 16-QAM montrent de meilleures performances qu'en Rayleigh, tandis que 64-QAM reste limité par sa sensibilité au bruit et au fading.

Conclusion : Le canal Rician est un bon compromis entre fiabilité et débit, notamment avec des modulations de moyenne complexité comme 16-QAM.

Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude détaillée des performances du système ZP-OTFS dans différents environnements de propagation et pour plusieurs schémas de modulation. Les simulations menées ont permis d'illustrer l'impact significatif de l'ordre de modulation et du type de canal sur le taux d'erreur binaire (BER). Dans un canal AWGN, les résultats ont montré que les modulations de faible ordre (BPSK, QPSK, 4-QAM) offrent une grande robustesse au bruit, avec des BER très faibles même à des SNR modérés. En revanche, les modulations à haute capacité (16-QAM, 64-QAM, 16-PSK) nécessitent un SNR plus élevé pour conserver des performances acceptables. Dans des canaux plus complexes comme Rayleigh et Rician, les performances se dégradent à cause des effets de fading. Toutefois, l'intégration du zero-padding dans le système OTFS permet de limiter l'inter-symbol interference et de maintenir des performances correctes. Le canal Rician, avec une composante en ligne de vue, améliore légèrement les résultats par rapport au canal Rayleigh.

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons étudié et analysé la performance des systèmes de communication ZP-OTFS (Zero-Padding Orthogonal Time Frequency Space) dans le contexte des réseaux mobiles 5G.

Notre étude a débuté par une analyse approfondie de la technologie de réseaux mobiles, couvrant ses caractéristiques, son architecture, et son déploiement. Ensuite, nous nous sommes concentrés sur les canaux de transmission et les techniques d'accès, en mettant en évidence la complexité des environnements de propagation, notamment dans les scénarios de haute mobilité, et les méthodes d'accès adaptées. Nous avons détaillé la technique OTFS, une modulation émergente basée sur le domaine délai-Doppler, qui offre une meilleure robustesse face aux variations rapides du canal. L'introduction du préfixe nul (ZP) dans ZP-OTFS a ensuite été analysée, avec l'objectif d'améliorer les performances en simplifiant l'égalisation et en réduisant l'interférence entre symboles. Enfin, une partie importante de notre étude a été dédiée à la simulation de la technique ZP-OTFS sur MATLAB.

Les performances de la technique ZP-OTFS ont été analysées en se basant sur le taux d'erreur de bit (BER) comme critère d'évaluation.

Les résultats obtenus montrent que ZP-OTFS présente des performances supérieures à celles de techniques conventionnelles dans des environnements fortement sélectifs en fréquence et en temps, ce qui en fait une solution prometteuse pour les futures générations de réseaux mobiles.

En conclusion, le système ZP-OTFS se révèle être une alternative efficace pour faire face aux défis des canaux de propagation complexes de la 5G. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser son implémentation matérielle et pour étudier son intégration dans l'architecture globale des réseaux mobiles de nouvelle génération.

Comme des perspectives pour ce travail, il serait pertinent d'envisager :

- D'explorer de manière approfondie l'influence des paramètres des canaux de transmission sur les performances de système de communication ZP-OTFS
- L'exploration les techniques de Deep Learning, telle que les réseaux neuronaux profonds (DNN), représente une opportunité significative pour améliore la performance du système de communication ZP-OTFS.

Bibliographiques

[1] A. A. Zaidi, M. Shaat, and L. Vandendorpe, "OTFS Modulation for 5G New Radio," in Proc. IEEE ICC Workshops, 2019, pp. 1–6.

[2] A. Farhang, A. R. Reyhani, L. E. Doyle, and B. Farhang-Boroujeny, "Low Complexity Modem Structure for OFDM-Based Orthogonal Time Frequency Space Modulation," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 7, no. 3, pp. 344–347, Jun. 2018.

[3] A. Singh and R. Patra, "Performance Analysis of OTFS in Presence of High Doppler Shift," in Proc. IEEE VTC-Spring, 2021.

[4] B. Farhang-Boroujeny, "OTFS: A New Generation of Modulation Addressing Mobility and Multipath," IEEE Access, vol. 7, pp. 114394–114407, 2019.

[5] H. J. Lee, J. W. Choi, and B. Shim, "Low-Complexity Iterative Detection for Orthogonal Time Frequency Space Modulation," IEEE Access, vol. 7, pp. 128603–128613, 2019.

[6] H.-G. Yeh, H.-H. Chen, and C.-Y. Chen, "Two-Path Parallel Cancellation ZP-OTFS Systems for Mitigating Residual Carrier Frequency Offset," in Proc. IEEE VTC-Spring, 2024.

[7] M. K. Daldal and H. Arslan, "Pilot Placement Strategies for OTFS Modulation in High Mobility Scenarios," IEEE Access, vol. 8, pp. 54357–54367, 2020.

[8] M. R. Khanzadi, C. F. Berger, and T. Eriksson, "Phase Noise Compensation for OTFS Modulation," in Proc. IEEE ICC, 2019, pp. 1–6.

[9] MathWorks, "OTFS Modulation," Communications Toolbox Documentation, MathWorks, 2023.

[10] O. A. Aghda, M. J. Omidi, and H. Saeedi-Sourck, "Low-PAPR Joint Channel Estimation and Data Detection in ZP-OTFS System," arXiv preprint arXiv:2304.01681, 2023.

[11] Q. Li, J. Yuan, M. Qiu, S. Li, and Y. Xie, "Low Complexity Turbo SIC-MMSE Detection for Orthogonal Time Frequency Space Modulation," IEEE Transactions on Communications, vol. 72, no. 2, pp. 1234–1248, Feb. 2024.

[12] R. Hadani and S. Rakib, "Orthogonal Time Frequency Space Modulation," U.S. Patent 9,454,038, Sep. 27, 2016.

[13] R. Hadani, S. Rakib, M. Tsatsanis, A. Monk, and A. J. Goldsmith, "OTFS – Orthogonal Time Frequency Space: A Novel Modulation Technique Meeting the Requirements of Future Wireless Networks," 2017 IEEE WCNC, San Francisco, CA, USA, 2017, pp. 1–6.

[14] S. G. Neelam and P. R. Sahu, "Digital Compensation of IQ Imbalance, DC Offset for Zero-Padded OTFS Systems," International Conference on Signal Processing and Communication (ICSPC), 2022.

[15] S. K. Sharma and X. Wang, "Deep Learning-Based Detection for OTFS Systems," in Proc. IEEE GLOBECOM, 2020, pp. 1–6.

[16] S. Li, Y. Yuan, Z. Wei, J. Yuan, and D. W. K. Ng, "Channel Estimation and Data Detection for OTFS Modulation in Doubly Dispersive Channels," IEEE Transactions on Communications, vol. 67, no. 10, pp. 6489–6503, Oct. 2019.

[17] T. Thaj and E. Viterbo, "Low Complexity Iterative Rake Decision Feedback Equalizer for Zero-Padded OTFS Systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 12, pp. 15606–15622, Dec. 2020.

[18] X. Gao, C. Qi, and G. Y. Li, "OTFS-based MIMO Systems With Low-Resolution ADCs," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, no. 5, pp. 678–682, May 2020.

[19] Y. Hong, T. Thaj, and E. Viterbo, "Delay-Doppler Communications: Principles and Applications," Academic Press, Elsevier, Feb. 2022.

[20] Z. Wei, W. Yuan, S. Li, J. Yuan, G. Bharatula, R. Hadani, and L. Hanzo, "Orthogonal Time-Frequency Space Modulation: A Promising Next-Generation Waveform," IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 9, pp. 98–104, Sep. 2020.

[21]Dahlman, S. Parkvall ,J.Sköld , « 4G LTE-Advanced Pro and The Road to 5G » , 3rd Edition - July 19, 2016.

[22] A.Bazin, « Massive MIMO for 5G Scenarios with OFDM and FBMC/OQAM Waveforms », Networking and Internet Architecture [cs.NI]. INSA de Rennes, 2018.

[23] Y.Hao , « Investigation and Technological Comparison of 4G and 5G Networks » , Journal of Computer and Communications, pp 36-43, Preston-UK , 2021.

[24] S.Ahmadi , « 5G NR Architecture, Technology , Implementation , and Operation of 3GPP New Rdio Standards », Academic Press , Elsevier,Paris-France , pp.86,2019.

[25] [En ligne]. Available: https://tweet4technology.blogspot.com/2019/07/5g-nr-protocol stack.html. Consulté le : 2/03/2024.

[26] E.Moulay, «Etude d'une architecture radio-sur-fibre pour le fronthaul 5G », Traitement du signal et de l'image [eess.SP], Université Paris-Est, Université de Nouakchott, 2019.

[27] 2005, [En ligne]. Available : http://lewebdephilou.free.fr/RESEAUX-TELECOM/Cours Telecom/Transmission/MODNUMERIQUESQPSK.htm. Consulté le : 15/03/2024.

[28] 2024, [En ligne]. Available : https://teletopix.org/fr/comment-est-calcule-le-bler-en-5g/. Consulté le : 10/04/2024.

[29] Sandip Jana, Amit Kumar Mishra, Mohammed Zafar Ali Khan, « Sensing the Environment with 5G Scattered Signals (5G-CommSense): A Feasibility Analysis », India, 2023.

[30] A. AHRICHE, « Étude comparative des méthodes d'estimation de canal à l'aide des pilotes dans les systèmes OFDM à travers un canal multi-trajets », thèse pour l'obtention du grade de Maître ès sciences, Université Laval, QUEBEC ,2008.