

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



Mémoire de Fin d'Etude
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique

Domaine : **Sciences et Techniques**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Réseaux et Télécommunications**

Etude d'un Système de Communication OTFS

Présenté par :

BOUHALLIT ATIF
AMAIRIA HEMZA ABDENNOUR

Sous la direction de :
Pr. ABED DJAMEL

Juin 2023

Remerciement

Nous tenons d'abord à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la foi et de nous permis d'en arriver là.

Nous tenons à remercier sincèrement Dr. ABED Djamel, qui en tant qu'encadrant, s'est toujours montré à l'écoute et disponible tout au long notre projet de fin d'étude.

*Nous aimerons bien à remercier les agents d'agence Algérie Télécoms : Dif Abderrazak, Ben Abda Ahmed, Bousaha Soumia
Merci pour tous les échanges et collaborations au cours de stages.*

Nos remerciements s'adressent également Mr. BOUCHMEL Amar pour leur aide et encouragement.

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et ont contribué à cette mémoire.

Nous tenons à remercier aussi « l'université 8 mai 1945 Guelma » d'avoir donné l'opportunité de vivre une expérience aussi enrichissante tant sur le plan humain que professionnel.

Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je dédie cet humble travail, fruit des longues années de mes études à :

Ma mère qui m'a donné la vie, l'espoir et la tendresse.

Mon très cher père pour lequel les mots ne suffiront jamais pour le remercier.

A mon frère ILYES et mes deux sœurs et leurs enfants : AKRAM, CHIHAB, MALAK, LAYENE, ANES.

Et à toute la famille BOUHALLIT et GHOUILLA.

Aussi, je dédie ce mémoire :

A tous mes amis, spécialement à HEYTHEM, ISSA, KARIM, ZICOU, DAYA, YASSINE, DIDOU, ABDENNOUR.

A tous mes amis passionnés dans les tribunes.

A tous mes amis des groupes 1001.

Et toutes mes connaissances et compagnons de parcours.

A tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et universitaire.

A mon binôme AMAIRIA HEMZA ABDENNOUR.

A tous mes enseignants.

Et à tous ceux qui j'estime et m'estiment.

ATIF

Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je dédie cet humble travail, fruit des longues années de mes études à :

Ma mère qui m'a donné la vie, l'espoir et la tendresse.

Mon très cher père pour lequel les mots ne suffiront jamais pour le remercier.

A mes sœurs.

Et à toute la famille AMAIRIA et SAIHI.

Aussi, je dédie ce mémoire :

*A tous mes amis, spécialement à ANIS, SABRI, ALAA, SAID, YUCEF ,
SASI, YOUNES.*

Et toutes mes connaissances et compagnons de parcours.

A tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et universitaire.

A mon binôme BOUHALLIT ATIF.

A tous mes enseignants.

A tous ceux qui j'estime et m'estiment.

ABDENNOUR

Table des Matières

Remerciement.....	<i>i</i>
Dédicace.....	<i>ii</i>
Sommaire.....	<i>iv</i>
Liste des Figures.....	<i>vi</i>
Liste des Tableaux.....	<i>viii</i>
Liste d'Abréviations.....	<i>ix</i>
Introduction Générale.....	01
Chapitre I : État de l'Art sur les Communications Mobiles	03
I.1 Introduction.....	04
I.2 Évolution des Réseaux Mobiles.....	05
I.2.1 Première Génération (1G).....	05
I.2.2 Deuxième Génération (2G).....	05
I.2.3 La Norme GPRS (2.5G).....	06
I.2.4 La Norme EDGE (2.75G).....	06
I.2.5 Troisième Génération (3G).....	07
I.2.6 La Norme UMTS.....	07
I.2.7 La Norme HSPA (3.5G).....	07
I.2.8 La Norme HSPA+ (3.75G).....	08
I.2.9 La Norme DC-HSPA+.....	08
I.2.10 Quatrième Génération (4G).....	08
I.2.11 La Norme LTE.....	09
I.2.12 La Norme LTE-Advanced.....	09
I.3 Les Technologie 5G, B5G et 6G.....	11
I.3.1 Présentation de La Technologie 5G.....	11
I.3.2 Bandes Fréquentielles pour La 5G.....	11
I.3.3 L'Internet des Objets « IoT ».....	12
I.3.4 Beyond 5G.....	13
I.3.5 la Sixième Génération (6G).....	13
I.4 Modèles des Canaux Mobiles.....	14
I.4.1 Propagation des Ondes Radio.....	14
I.4.2 Atténuation de Parcours.....	15
I.4.3 Canal Multi-trajet.....	16
I.4.4 Masquage (Shadowing).....	17
I.4.5 L'effet Doppler.....	18
I.4.6 Problème de Mobilité à Grand Vitesse.....	18
I.5 conclusion.....	19
Chapitre II : Le Format de Modulation OTFS	20
II.1 Introduction.....	21
II.2 Notion de Modulation Multi-Porteuses.....	22
II.3 Format de Modulation OFDM.....	23

Table des Matières

I.3.1 Notion d'Orthogonalité.....	23
II.3.2 Modulateur OFDM.....	25
II.3.3 Démodulateur OFDM.....	28
II.4 Format de Modulation OTFS.....	29
II.4.1 Modulateur OTFS.....	29
II.4.2 Démodulateur OTFS.....	30
II.5 Conclusion.....	31
Chapitre III : Résultats de Simulation d'un Système OTFS	32
III.1 Introduction.....	33
III.2 Environnement Utilisé.....	33
III.3 Métrique d'Evaluation.....	34
III.4 Effet du Canal de Transmission.....	35
III.5 Effet de la Vitesse de Mobilité.....	36
III.5.1 Pour une Modulation 4QAM.....	36
III.5.2 Pour une Modulation 16QAM.....	37
III.5.3 Pour une Modulation 64QAM.....	38
III.6 Effet de la Taille de la Matrice de Modulation 2D.....	39
III.7 Conclusion.....	40
Conclusion Générale.....	42
Bibliographie.....	45

Liste des Figures

Figure I.1	L'Evolution de Réseaux de Communications Mobiles	10
Figure I.2	Bandes Fréquentielles pour La 5G (a) Bandes des Ondes Centimétriques et Millimétriques (b) Les Fréquences Proposées par l'UIT	11
Figure I.3	L'Internet des Objets (IoT) : Regroupe Tous Les Objets Physiques Communicants	12
Figure I.4	La Différence entre un Canal de transmission et un Canal de propagation	14
Figure I.5	Propagation par Trajets Multiples dans un Canal Radio Mobile	15
Figure I.6	Les Variations de la Puissance reçue en Fonction de la Distance Parcourue	17
Figure II.1	Classification des Modulations Multi-Porteuses	22
Figure II.2	Base Orthogonale en Temps	23
Figure II.3	Base Orthogonale en Fréquence	24
Figure II.4	Diagramme Fonctionnel d'un Modulateur OFDM	25
Figure II.5	Techniques d'Insertion de l'Intervalle de Garde (GI) (a) La technique CP (a) La technique ZP	26
Figure II.6	Diagramme Fonctionnel d'un Démodulateur OFDM	27
Figure II.7	Diagramme Fonctionnel d'un Modulateur OTFS	28
Figure II.8	Diagramme Fonctionnel d'un Démodulateur OTFS	29
Figure III.1	Effet du Canal de Transmission pour une Matrice 8X8 et une Modulation 16QAM (a) ETU 0km/h (b) EPA 0km/h (c) EVA 50km/h	33
Figure III.2	Effet de la Vitesse de Mobilité pour une modulation 2D de 4X4 4QAM (a) 10km/h (b) 70km/h (c) 140km/h (d) 170km/h (e) 280km/h (f) 500km/h	34
Figure III.3	Effet de la Vitesse de Mobilité pour une modulation 2D de 4X4 16QAM (a) 10km/h (b) 50km/h (c) 70km/h (d) 140km/h (e) 210km/h (f) 500km/h	35
Figure III.4	Effet de la Vitesse de Mobilité pour une modulation 2D de 4X4 16QAM (a) 10km/h (b) 70km/h (c) 120km/h (d) 200km/h (e) 300km/h (f) 500km/h	36

Figure III.5 Effet de la Taille de Matrice la taille de la Matrice de Modulation 2D pour une Modulation 16QAM pour Différentes Vitesse de Mobilité (a) 4X4 10km/h (b) 8X8 10km/h (c) 16X16 10km/h (d) 4X4 70km/h (e) 8X8 70km/h (f) 16X16 70km/h (g) 4X4 400km/h (h) 8X8 400km/h (i) 16X16 400km/h

37

Liste des Tableaux

Tableau I. 1	Les Principaux Standards de Téléphonie Radio Fréquence	10
---------------------	--	----

Liste des Acronymes

1G :	1 st Generation
2G :	2 nd Generation
3G :	3 rd Generation
4G :	4 th Generation
5G :	5 th Generation
6G :	6 th Generation
3GPP :	3 rd Generation Partnership Project
AMPS :	Advanced Mobile Phone System
AT&T :	American Telephone & Telegraph
AWGN :	Additive White Gaussian Noise
BER :	Bit Error Rate
B5G :	Beyond 5G
CP :	Cyclic Prefix
COFDM :	Coded Orthogonal Frequency Division Multiple
DFT :	Discrete Fourier Transform
DC-HSPA+ :	Dual Cell High Speed Packet Access+
DSSS :	Direct Sequence Spread Spectrum
EDGE :	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EPA :	Extended Pedestrian A model
ETU :	Extended Typical Urban model
EVA :	Extended Vehicular A model
EHF :	Extrêmement Hautes Fréquences
FFT :	Fast Fourier Transform
FIR :	Finite Impulse Response
GI :	Guard Interval
GSM :	Global System for Mobile communication
GPRS :	General Packet Radio Services
HSPA :	High Speed Packet Access
HSPA+ :	High Speed Packet Access+
HSDPA :	High-Speed Downlink Packet Access
HSUPA :	High-Speed Uplink Packet Access
IA :	Intelligence Artificielle
IDFT :	Inverse Discrete Fourier Transform
ISFFT :	Inverse Symplectic Finite Fourier Transform
ISI :	Inter-Symbol Interference
IoT :	Internet des Objets
LMMSE :	Linear Minimum Mean Square Error
LTE :	Long Term Evolution
LOS :	Line-of-Sight
NLOS :	Non-Line-Of-Sight
NMT:1	Nordic Mobile Telephone

OFDM :	Orthogonal Frequency Division Multiple
OFDMA :	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OTFS :	Orthogonal Time Frequency Space
QAM :	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK :	Quadrature Phase Shift Keying
SFFT :	Symplectic Finite Fourier Transform
SHF :	Super Hautes Fréquences
SNR :	Signal-to-Noise Ratio
UIT :	Union internationale des télécommunications
UMTS :	Universal Mobile Telecommunications System
VoIP :	Voix sur IP
ZP-OFDM :	Zero Padding- Orthogonal Frequency Division Multiple
ZF :	Zéro-Forcing
MMSE :	Minimum Mean Square Error
2D :	Deux Dimensions

Introduction Générale

Introduction Générale

La communication mobile est devenue un pilier essentiel de notre société moderne, offrant une connectivité et une accessibilité constantes. Dans ce mémoire, nous explorons différents aspects de la communication mobile en nous concentrant sur le système Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) et ses performances de réception. Les chapitres de ce mémoire couvrent l'état de l'art de la communication mobile, le fonctionnement du système OTFS, ainsi que les simulations et mesures du taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) en utilisant les techniques de réception Single-Tap et LMMSE. Nous examinons également l'impact de la vitesse de mobilité et de la modulation QAM, ainsi que la taille de la matrice sur les performances du système OTFS.

Le premier chapitre établit l'état de l'art de la communication mobile en analysant les avancées technologiques, les normes et les défis actuels. Nous explorons les différentes générations de réseaux mobiles, du GSM (Global System for Mobile Communications) à la 5G, en mettant en évidence les progrès réalisés en termes de débit de données, de capacité et de latence. Comprendre l'évolution de la communication mobile nous permet de situer le système OTFS dans son contexte et de reconnaître son potentiel en tant que solution pour les futurs réseaux mobiles.

Le deuxième chapitre se concentre sur le système OTFS lui-même. Nous explorons en détail son fonctionnement, en mettant en évidence les concepts clés tels que l'orthogonalité dans le domaine temps-fréquence et la résilience aux effets du canal et de la mobilité. Nous examinons également les avantages de l'OTFS, tels que l'efficacité spectrale accrue, la résolution temporelle fine et la flexibilité en termes de gestion des ressources spectrales. Comprendre les caractéristiques et le potentiel de l'OTFS nous permet d'évaluer son adéquation pour répondre aux exigences croissantes des communications mobiles.

Le dernier chapitre présente les simulations de l'OTFS et les résultats du taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) en utilisant les

techniques de réception Single-Tap et LMMSE. Nous explorons l'impact de la vitesse de mobilité, de la modulation QAM et de la taille de la matrice sur les performances du système. Les résultats de ces simulations nous fournissent des informations précieuses sur les performances du système OTFS dans des scénarios réels, nous permettant d'analyser les compromis entre la complexité, la capacité et la qualité de transmission des données.

L'objectif de ce mémoire est de contribuer à la compréhension et à l'optimisation des systèmes de communication mobile en se concentrant sur le système OTFS. En combinant l'état de l'art, l'analyse du système et les résultats des simulations, nous espérons formuler des recommandations pour améliorer les performances de la communication mobile, notamment dans des conditions de mobilité élevée et avec une modulation QAM complexe.

Nous espérons que les résultats de la recherche contribueront à l'optimisation des systèmes de communication mobile et guideront le développement des futures générations de réseaux mobiles plus performants et efficaces.

Chapitre I

État de l'Art sur les Communications

Mobiles

Chapitre I

État de l'Art sur les Communications Mobiles

I.1 Introduction

L'histoire des communications mobiles remonte à la fin du 19^{ème} siècle, avec l'invention de la radio. OÙ les premiers téléphones mobiles ont commencé à apparaître dans les années 1940 et 1950. L'idée d'un réseau mobile fondé sur des cellules hexagonales est ainsi formulée dans les laboratoires Bell dès décembre 1947 par Douglas Ring et Rae Young. Le concept nécessitant cependant des dispositifs électroniques dépassant les possibilités du moment, AT&T ne songea à concrétiser ce dispositif qu'en 1971 [I.1]. À cette époque Les téléphones mobiles étaient volumineux et pesaient plusieurs kilos, ce qui les rendait difficiles à transporter. Ils étaient également très chers et n'étaient accessibles qu'aux personnes les plus riches. Faute d'autorisation officielle, AT&T (American Telephone & Telegraph) dut cependant retarder ses projets et ce fut donc plus tard, à Tokyo en 1979, que le premier réseau cellulaire fut activé [I.1]. Dans les années 1980, les téléphones mobiles sont devenus encore plus petits et plus légers, et de nouvelles fonctionnalités ont été ajoutées, telles que les SMS et la navigation sur Internet. Les réseaux mobiles ont également commencé à évoluer vers la technologie numérique, offrant une meilleure qualité de communication et une plus grande capacité de transmission de données.

Au début des années 2000, les smartphones sont apparus, combinant les fonctions d'un téléphone portable avec celles d'un ordinateur de poche. Les réseaux mobiles ont également évolué vers la technologie 3G, offrant une plus grande capacité de transmission de données et une meilleure qualité de communication.

Au cours des dernières années, les smartphones ont continué à évoluer avec de nouvelles fonctionnalités telles que la reconnaissance faciale et les écrans tactiles, tandis que les réseaux mobiles ont évolué vers la technologie 4G, offrant une vitesse de transmission de données encore plus rapide. Aujourd'hui, la technologie 5G est en train de se déployer, offrant des vitesses de transmission de données encore plus rapides et des capacités de communication améliorées. Les communications mobiles sont devenues un élément indispensable de la vie quotidienne pour la plupart des gens, et les avancées technologiques continuent à améliorer leur fonctionnalité et leur efficacité [I.2].

I.2 Évolution des Réseaux Mobiles

I.2.1 Première Génération (1G)

La première génération (1G) de réseaux mobiles a été lancée dans les années 1980 et utilisait une technologie analogique pour transmettre des signaux vocaux. Les réseaux de la 1G étaient principalement utilisés pour les appels téléphoniques et offraient des vitesses de transmission de données très limitées, allant jusqu'à seulement quelques kilobits par seconde. Les premiers réseaux de téléphonie mobile 1G ont été développés en Amérique du Nord et en Europe dans les années 1980, tels que le système Advanced Mobile Phone Service (AMPS) aux États-Unis et le système Nordic Mobile Telephone (NMT) en Scandinavie. Le lancement de ces réseaux 1G a marqué le début de l'ère de la téléphonie mobile, offrant aux consommateurs la liberté de communiquer à distance sans avoir besoin d'une ligne terrestre [I.3].

I.2.2 Deuxième Génération (2G)

Le lancement de la deuxième génération (2G) de réseaux mobiles a commencé dans les années 1990, peu de temps après l'introduction des premiers réseaux 1G. Le premier système 2G à être déployé à grande échelle, était le Global System for Mobile Communications (GSM), lancé pour la première fois en 1991 en Europe par un consortium d'opérateurs de télécommunications [I.3].

Le GSM était basé sur une technologie numérique qui offrait une meilleure qualité vocale et une plus grande efficacité spectrale que les réseaux 1G analogiques. Il permettait également l'envoi de messages texte (SMS) et offrait une meilleure sécurité grâce à l'utilisation de techniques de chiffrement pour protéger les communications des utilisateurs. Le GSM a rapidement connu un grand succès [I.3].

I.2.3 La Norme GPRS (2.5G)

La norme "General Packet Radio Service" (GPRS ou 2.5G) est une technologie de communication sans fil qui a été introduite en 2000. Elle est basée sur le réseau GSM et permet une transmission de données plus rapide et plus efficace que les normes précédentes. GPRS utilise une technique de transmission de paquets de données, ce qui signifie que les données sont découpées en petits paquets qui sont transmis séparément et réassemblés à l'arrivée. Cela permet une utilisation plus efficace de la bande passante et permet de transmettre plus de données en moins de temps. La technologie GPRS utilise une technique appelée "commutation de paquets" pour transmettre des données. Contrairement à la commutation de circuits utilisée dans les réseaux de téléphonie traditionnels. Il permet des vitesses de transmission de données allant jusqu'à 114 kbps. Cette augmentation de la vitesse de transmission des données a permis l'émergence de services tels que la navigation sur Internet, la messagerie instantanée et le courrier électronique sur les téléphones mobiles [I.3].

I.2.4 La Norme EDGE (2.75G)

La norme "Enhanced Data rates for GSM Evolution" (EDGE ou 2,75G) est une technologie de communication sans fil utilisée comme une transition vers la téléphonie mobile de troisième génération (3G) en tant qu'amélioration de la norme GPRS. Elle est également basée sur le réseau GSM et permet une transmission de données plus rapide que les normes précédentes. EDGE est une technologie de communication de 2.75G qui utilise la même technique de transmission de paquets de données tel que GPRS, mais avec une modulation à phase augmentée (8PSK) et permet une transmission de données jusqu'à trois fois plus rapide que GPRS. EDGE permet des vitesses de transmission de données allant jusqu'à 384 kbps, ce qui permet l'utilisation de services multimédias sur les téléphones mobiles [I.3].

I.2.5 Troisième Génération (3G)

La troisième génération (3G) est une technologie de réseau mobile qui permet de fournir des services de communication mobiles plus avancés que la 2G. La 3G a été introduite pour la première fois à la fin des années 1990 pour offrir des vitesses de transmission de données plus rapides que la 2G et permettre de nouvelles fonctionnalités telles que la vidéoconférence, la diffusion en continu de vidéos et la navigation sur Internet sur des appareils mobiles. La 3G utilise la commutation de paquets qui permet aux données de transiter sur le réseau en petits paquets plutôt que dans une transmission continue. Cela permet une utilisation plus efficace du spectre de fréquences et permet également aux utilisateurs de partager des ressources réseau, ce qui peut réduire les coûts. La 3G est un terme général qui décrit une famille de technologies de réseau mobile, tels que UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), HSPA (High Speed Packet Access) et HSPA+ (évolution de HSPA) [I.3].

I.2.6 La Norme UMTS

L'UMTS est une norme de réseau mobile 3G. Il a été développé en Europe par le projet de recherche et de développement Groupe Spécial Mobile (GSM) et est utilisé dans le monde entier. L'UMTS utilise une technologie de transmission de paquets commutés pour transmettre les données. Il offre des vitesses de transmission de données allant jusqu'à 384 Kbps en déplacement et jusqu'à 2 Mbps en position fixe. Cela permet des applications avancées telles que la vidéoconférence, la navigation sur Internet, la diffusion de vidéos en continu, et la messagerie instantanée. L'UMTS est un système de réseau mobile "large bande" qui utilise des fréquences radio qui sont différentes de celles des réseaux 2G. L'UMTS utilise également des techniques de modulation à étalement de spectre directe (DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum) pour la transmission de données. Cette technique de modulation utilise une largeur de bande de plusieurs mégahertz pour transmettre un signal à faible énergie [I.4].

I.2.7 La Norme HSPA (3.5G)

HSPA est une évolution de la norme UMTS qui permet d'offrir des vitesses de téléchargement et d'envoi de données plus rapides. HSPA est également connu sous le nom de 3.5G ou 3G+ [I.5].

HSPA utilise une modulation adaptative en fonction des conditions du canal de transmission pour transmettre les données. Cela permet une utilisation plus efficace du spectre radio et de la bande passante. HSPA est divisé en deux parties principales : HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) pour les transmissions descendantes avec une modulation QPSK et HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) pour les transmissions ascendantes avec une modulation 16QAM. HSDPA permet des vitesses allant jusqu'à 14,4 Mbps, tandis que HSUPA permet des vitesses allant jusqu'à 5,76 Mbps [I.5].

I.2.8 La Norme HSPA+ (3.75G)

HSPA+ (High-Speed Packet Access Plus) est une évolution de la technologie HSPA qui permet d'offrir des débits de données plus élevés et une meilleure qualité de service. HSPA+ est également connu sous le nom de 3.75G ou 3G++. HSPA+ utilise la modulation 64QAM. Cela permet des débits de données plus élevés par rapport à la modulation 16QAM utilisée dans HSUPA. Elle utilise également d'autres techniques telles que la MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). HSPA+ peut offrir des vitesses de téléchargement allant jusqu'à 42 Mbps et des vitesses d'envoi allant jusqu'à 11 Mbps, ce qui en fait une technologie de réseau mobile très performante [I.5].

I.2.9 La Norme DC-HSPA+

DC-HSPA+ (Dual-Carrier High-Speed Packet Access Plus) est une évolution de la technologie HSPA+ (High-Speed Packet Access Plus) qui permet d'offrir des débits de données encore plus élevés en utilisant l'agrégation de porteuses. DC-HSPA+ utilise l'agrégation de deux porteuses HSPA+ pour transmettre les données, ce qui permet de doubler la bande passante disponible pour la transmission de données [I.13].

I.2.10 Quatrième Génération (4G)

La quatrième génération (4G) est une technologie de réseau mobile qui permet d'offrir des débits de données beaucoup plus élevés que les technologies 3G précédentes. Elle est conçue pour fournir des vitesses de téléchargement et de transfert de données plus rapides, une meilleure qualité de voix et de données, une latence plus faible et une capacité de réseau plus élevée [I.3].

I.2.11 La Norme LTE

La Norme "Long Term Evolution" (LTE) est une technologie de réseau 4G qui utilise la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) pour transmettre les données sur plusieurs porteuses de fréquence différentes. Cela permet d'offrir des débits de données plus élevés et une meilleure qualité de service que les technologies 3G précédentes. Cette technologie offre des vitesses de téléchargement allant jusqu'à plusieurs centaines de Mbps, ce qui permet aux utilisateurs de télécharger rapidement des fichiers volumineux, de diffuser des vidéos haute définition en continu et de jouer à des jeux en ligne sans décalage. La LTE est également utilisée pour la voix sur IP (VoIP) et la vidéoconférence, ce qui permet une communication plus claire et plus fiable [I.11].

I.2.12 La Norme LTE-Advanced

LTE-Advanced (Long-Term Evolution-Advanced) est une évolution de la technologie 4G LTE et a été introduit dans la "Release 10" des spécifications du "3rd Generation Partnership Project (3GPP)". Il est considéré comme faisant partie de la 4G [I.11]. La technologie LTE-Advanced apporte des améliorations significatives par rapport à la LTE, notamment en termes de débits de données plus élevés, de capacité accrue, de meilleure couverture et de fiabilité améliorée. Il utilise des techniques avancées telles que l'agrégation de porteuses, le MIMO de haut ordre, la coordination améliorée de l'interférence entre cellules, la mise en réseau hétérogène, la coordination multipoint, etc. pour améliorer les performances du système. En somme, LTE-Advanced est considéré comme une évolution naturelle de la technologie 4G LTE et apporte des améliorations significatives à la fois pour les utilisateurs et pour les opérateurs de réseaux.

Le Tableau ci-dessous (Tableau I.1) montre Les Principaux Standards de Téléphonie Radio Fréquence. Et la Figure I.1 montre L'Evolution de Réseaux de Communications Mobiles depuis la norme 2G jusqu'à la norme 4G/IMT.

Tableau I.1 : Les Principaux Standards de Téléphonie Radio Fréquence

Standard	Génération	Caractéristiques
GSM	2G	Permet le transfert des voix ou des données numériques de faible débit
GPRS	2.5G	Permet le transfert des voix et des données numériques de volume modéré
EDGE	2.75G	Permet le transfert simultané des voix et des données numériques
UMTS	3G	Permet le transfert simultané des voix et des données numériques à haut débit
UMTS+ HSDPA	3.5G ou 3G+	Permet de connecter les téléphones mobiles 3G au réseau internet
LTE (Long Term Evolution)	4G	Permet d'améliorer des applications plus exigeantes telles que la télévision interactive, les blogs vidéo mobiles, les jeux avancés et des services professionnels.

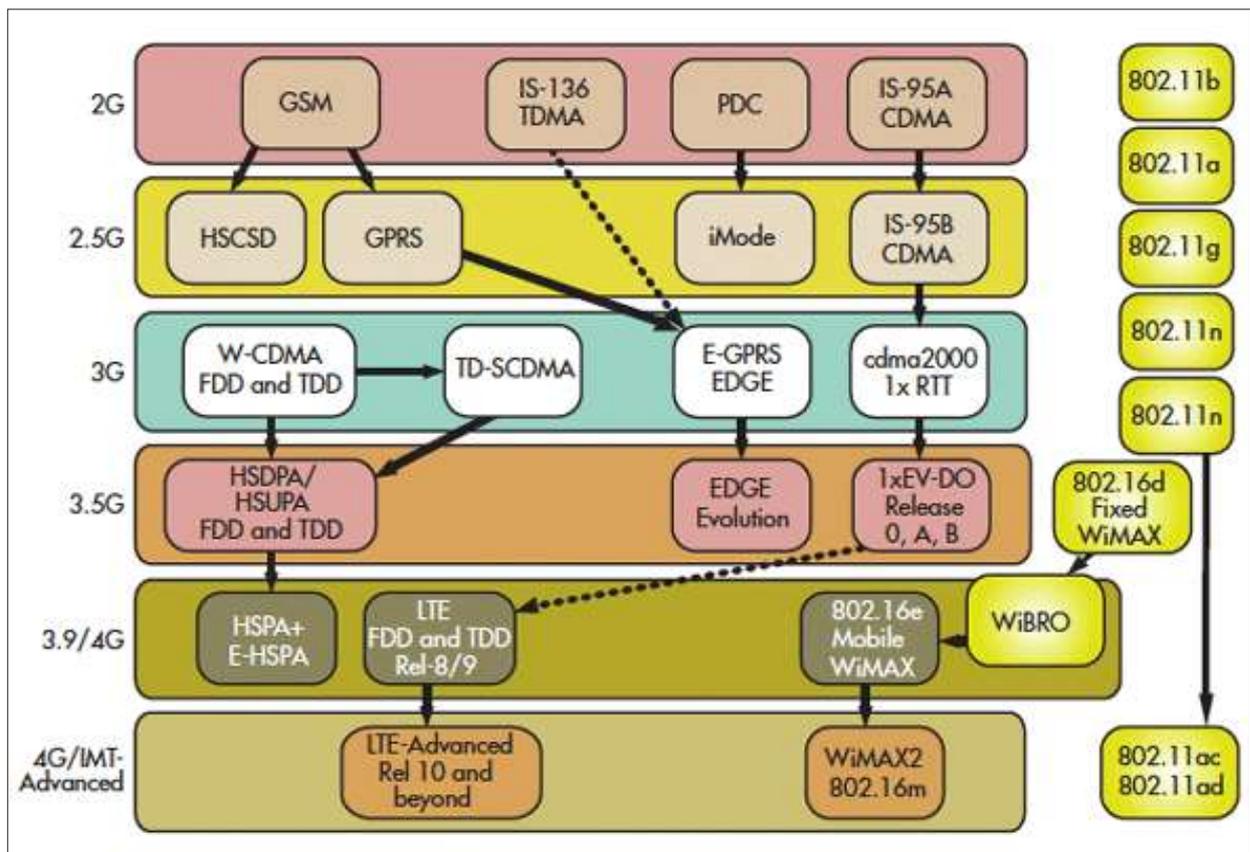


Figure I.1 : L'Evolution de Réseaux de Communications Mobiles

I.3 Les Technologie 5G, B5G et 6G

I.3.1 Présentation de La Technologie 5G

La cinquième génération de technologies de réseaux de communication mobile, représente une évolution majeure par rapport aux technologies précédentes. La 5G promet des débits de données plus élevés (jusqu'à 100 fois plus rapide que la 4G), une latence plus faible, une meilleure connectivité et une capacité accrue pour connecter des millions d'appareils simultanément.

I.3.2 Bandes Fréquentielles pour La 5G

Les ondes centimétriques appartiennent à la bande des « super hautes fréquences » (SHF), entre 3 et 30 GHz, dans laquelle on trouve déjà le Wi-Fi à 5 GHz ou la télévision par satellite. Les ondes millimétriques appartiennent à la bande des « extrêmement hautes fréquences » (EHF), entre 30 et 300 GHz, utilisée de manière très ponctuelle [I.12]. Les dernières discussions de l'Union internationale des télécommunications (UIT) ont permis de focaliser les études sur certaines fréquences pour les réseaux du futur : 24,25 à 27,5 GHz, 31,8 à 33,4 GHz, 37 à 43,5 GHz, 45,5 à 50,2 GHz, 50,4 à 52,6 GHz, 66 à 76 GHz et enfin 81 à 86 GHz. Les Figures II.2(a) and II.2(b) illustrent les bandes des ondes centimétriques et millimétriques et fréquences proposées par l'UIT, respectivement.

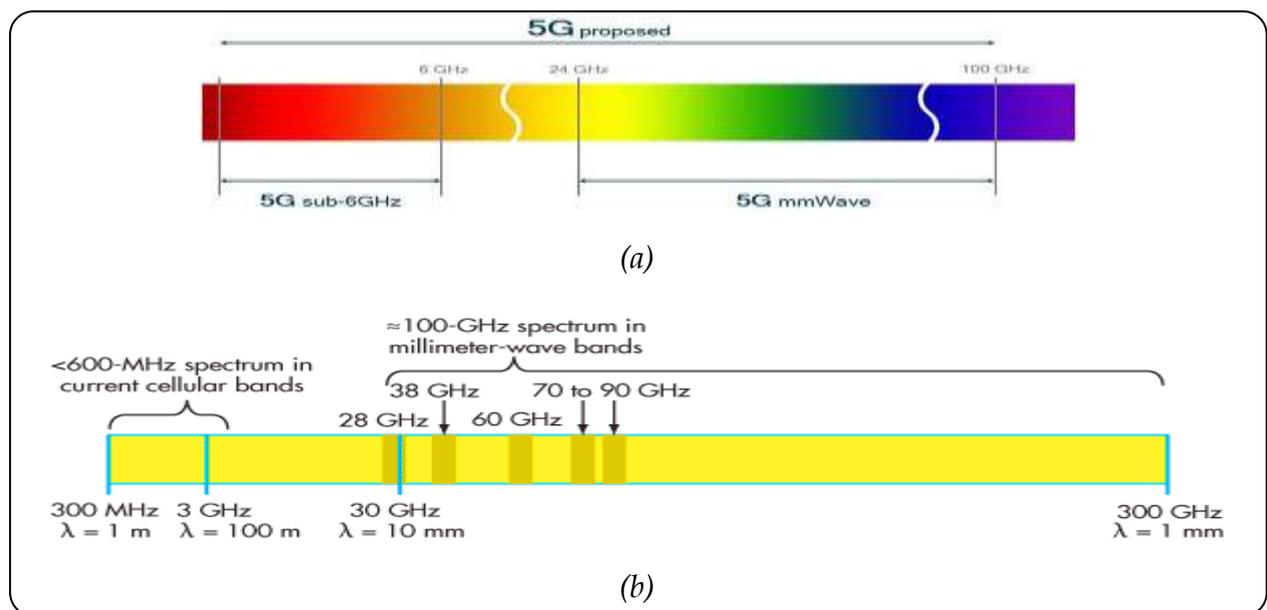


Figure I.2 : Bandes Fréquentielles pour La 5G (a) Bandes des Ondes Centimétriques et Millimétriques (b) Les Fréquences Proposées par l'UIT

I.3.3 L'Internet des Objets « IoT »

Selon l'Union internationale des télécommunications, l'Internet des objets (IoT) est une « infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution ». En réalité, la définition de ce qu'est l'Internet des objets n'est pas figée. Elle recoupe des dimensions d'ordres conceptuel et technique (Figure I.3). D'un point de vue conceptuel, l'Internet des objets caractérise des objets physiques connectés ayant leur propre identité numérique et capables de communiquer les uns avec les autres. Ce réseau crée en quelque sorte une passerelle entre le monde physique et le monde virtuel [I.14].

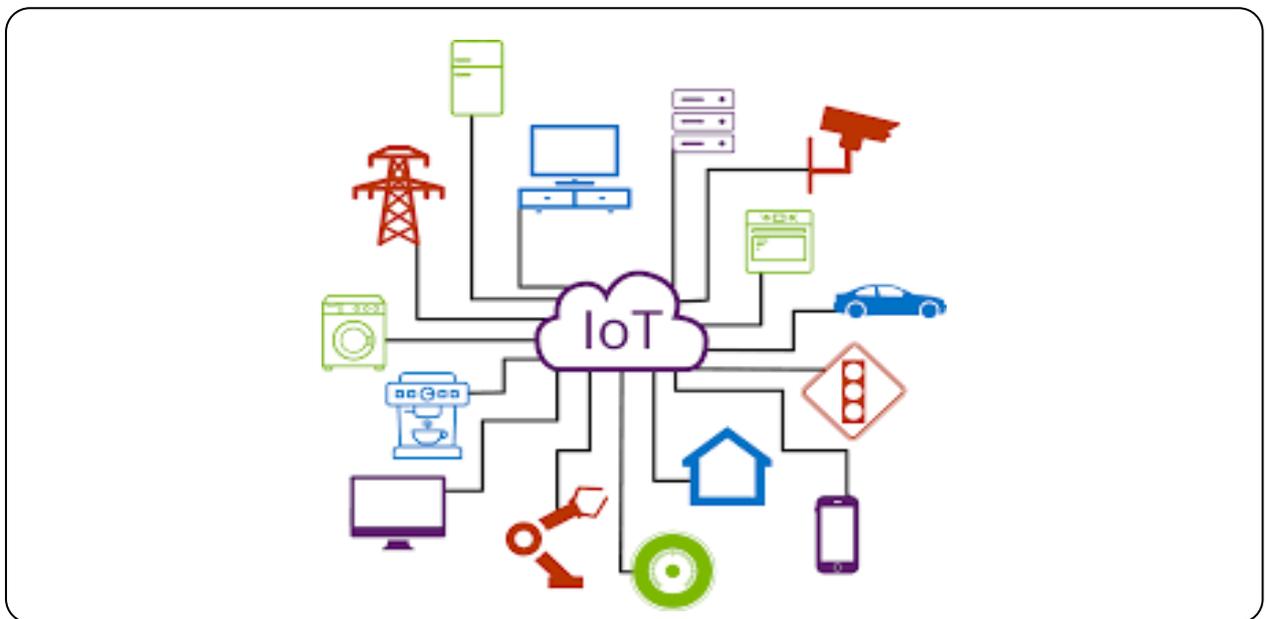


Figure I.3 : L'Internet des Objets (IoT) : Regroupe Tous Les Objets Physiques Communicants

Les objets connectés produisent de grandes quantités de données dont le stockage et le traitement entrent dans le cadre de ce que l'on appelle les big data. En logistique, il peut s'agir de capteurs qui servent à la traçabilité des biens pour la gestion des stocks et les acheminements. Dans domaine de la santé et du bien-être avec le développement des montres connectées, des bracelets connectés et d'autres capteurs surveillant des constantes vitales., etc. En domotique, l'IoT recouvre tous les appareils électroménagers communicants, les capteurs, les compteurs intelligents et systèmes de sécurité connectés des appareils de type box domotique.

I.3.4 Beyond 5G

Beyond 5G (B5G) fait référence aux technologies de communication sans fil qui viennent après la 5G. Bien que la 5G soit considérée comme la norme actuelle pour les réseaux mobiles, la recherche et le développement de technologies de communication sans fil se poursuivent pour améliorer encore les performances et la capacité des réseaux. Certaines des technologies émergentes qui pourraient être utilisées dans les réseaux B5G incluent les réseaux de communication terahertz (THz) utilisant des fréquences de 300GHz à 3 THz, ces réseaux peuvent offrir des vitesses de données encore plus rapides que la 5G [I.15]. L'intelligence artificielle (IA) peut être utilisée pour améliorer les performances et la fiabilité des réseaux, ainsi que pour optimiser l'utilisation des ressources réseau.

I.3.5 la Sixième Génération (6G)

La 6G est une technologie de communication sans fil, qui est en phase de recherche et de développement. Bien que la 5G soit actuellement la norme de communication mobile la plus récente, l'industrie des télécommunications est déjà en train de travailler sur la 6G pour améliorer encore les performances et les capacités des réseaux mobiles. La 6G est censée offrir des performances encore plus rapides et plus efficaces que la 5G. Elle pourrait offrir des vitesses de transmission de données allant jusqu'à 1 To/s, une latence ultra-faible, une capacité réseau accrue, ainsi que des avancées dans les domaines de l'IA, de l'Internet des objets (IoT) et de la réalité augmentée/virtuelle [I.16]. La 6G est en effet conçue pour offrir des performances encore plus rapides et plus efficaces que la 5G, même en situation de mobilité. Cela signifie que la 6G devrait permettre des vitesses de communication mobile plus élevées même lorsque les utilisateurs se déplacent à grande vitesse, par exemple dans un train ou dans une voiture, selon la technique de modulation OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) qui est susceptible d'être utilisé dans cette technologie pour améliorer les performances du réseau sans fil. Cependant, il est important de noter que la 6G est encore en phase de recherche et il faudra probablement plusieurs années avant que cette technologie ne soit commercialisée. Les normes et les réglementations pour la 6G devront également être élaborées, et la disponibilité des fréquences appropriées sera un facteur clé pour le déploiement de cette technologie [I.17].

I.4 Modèles des Canaux Mobiles

Les canaux mobiles sont des voies de transmission sans fil entre un émetteur et un récepteur mobile. Ils sont utilisés pour les communications mobiles, telles que les téléphones portables, les réseaux de données sans fil et les réseaux de communication pour les véhicules. Le système de transmission radioélectrique permet de transformer le signal électrique émis $e(t)$ en des ondes électromagnétiques. Au niveau de récepteur l'onde électromagnétique reçue par l'intermédiaire d'un canal de propagation est convertie en un signal électrique reçu $s(t)$. À ce stade, il est important de différencier le canal de propagation, qui ne tient en compte que des interactions du signal émis avec l'environnement traversé et le canal de transmission, qui inclut en plus les effets induits par les antennes émettrice et réceptrice comme la montre la figure ci-dessous



Figure I.4 : La Différence entre un Canal de transmission et un Canal de propagation [6]

I.4.1. 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 [I.7]. 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 [I.8].

Généralement, l'évanouissement peut être dû aux différents effets: affaiblissement de parcours, masquage par des objets, propagation par trajets multiples, et propagation Doppler.

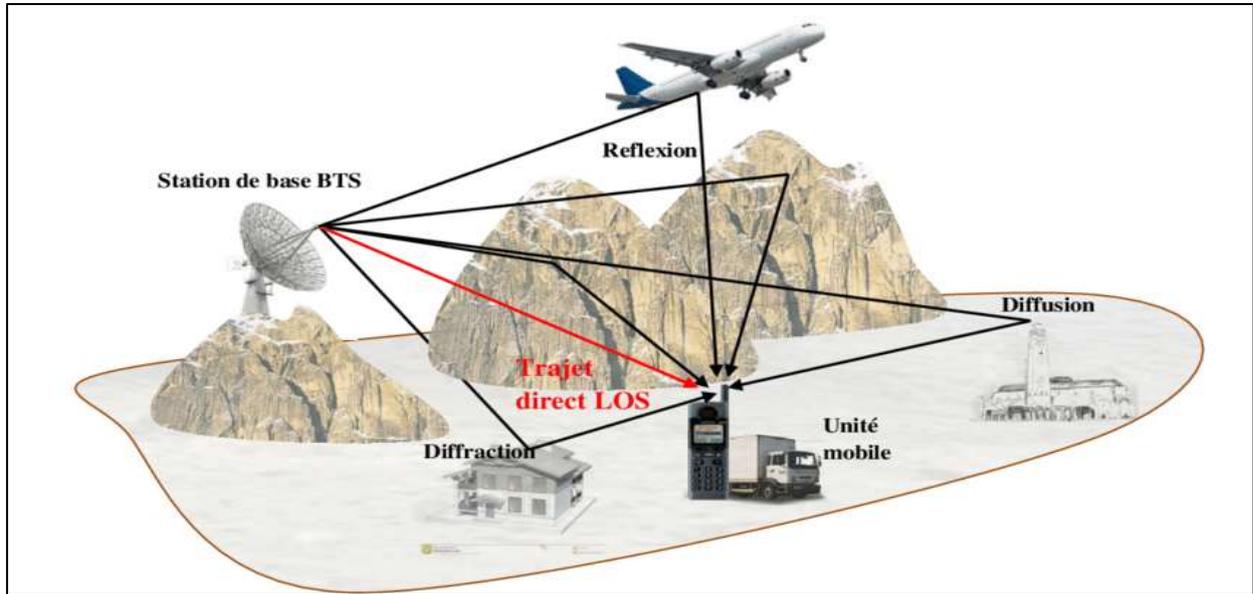


Figure I.5 : Propagation par Trajets Multiples dans un Canal Radio Mobile [I.7]

I.4.2 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 $\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$ [I.7]. Ainsi, un canal radio en espace libre qui est caractérisé uniquement par l'affaiblissement du parcours peut être exprimé par l'équation suivante [8]

$$A_p [db] = 10 \log \left(\frac{P_e}{P_r} \right) = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (I.1)$$

Où P_e , P_r sont la puissances 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

$$A_{p1} (d)[db] = A_p (d_0) + 10 \log \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \quad (I.2)$$

Avec, d_0 est une distance de référence à laquelle on a calculé A_p par l'équation (I.1). On peut facilement remarquer que la valeur particulière $n = 2$ correspond à l'affaiblissement en espace libre.

I.4.3 Canal Multi-trajet

Dans un système sans fil, l'environnement du système de transmission interfère avec l'onde transmise selon différents mécanismes. Le récepteur peut recevoir le même signal de plusieurs trajets différents. Cet effet est appelé propagation par trajets multiples.

En effet, il existe cinq phénomènes principaux la réflexion, la réfraction, la diffraction, la diffusion le guidage d'onde qui ont un impact direct sur la propagation du signal [I.9].

Les ondes émises lors de la communication radio subissent généralement une combinaison de ces divers phénomènes. Le signal reçu est une somme de tous les trajets arrivants au récepteur et cette somme peut être constructive ou bien destructive. Les obstacles peuvent être considérés comme un avantage ou un inconvénient. Par exemple, lorsqu'un émetteur et le récepteur sont en vue directe (LOS), la réflexion perturbe la liaison. Cependant, dans le cas du canal (NLOS), la diffraction et la diffusion assurent la continuité de la liaison. Le signal résultant est alors la somme des signaux reçus sur L_h trajets. Le $l^{\text{ième}}$ trajet, $l \in [0, L_h - 1]$, est décrit par un retard τ_l et par un gain complexe noté $h_l(t)$, qui varie plus ou moins rapidement dans le temps. De plus, le bruit additif qui s'ajoute et qui s'agit d'une variable aléatoire complexe gaussienne distribuée, cette composante est appelée bruit blanc additif Gaussien (AWGN en anglais).

Dans le domaine temporel, on peut noter ce bruit par une variable complexe $n(t)$. Selon ces effets, le signal reçu, en bande de base, dans le domaine temporel s'exprime par [I.7]

$$r(t) = \left\{ \underbrace{\sqrt{A_{p1}}}_{\text{Atténuation de parcours}} \times \underbrace{\left(\sum_{l=0}^{L_h-1} h_l(t) \cdot \delta(t - \tau_l) \right)}_{\text{Composantes des trajets multiples}} \right\} \times s(t) + \underbrace{n(t)}_{\text{Bruit additif}} \quad (I.3)$$

I.4.4 Masquage (Shadowing)

L'effet de masquage 'Shadowing' résulte de l'obstruction des ondes transmises par des objets (bâtiments, murs, arbres, etc.) le long des trajets d'un signal, ce qui entraîne une atténuation plus ou moins forte de l'énergie du signal.

Par rapport aux évanouissements rapides, la constellation du signal ne sera significativement modifiée par l'effet 'Shadowing' que sur de longues distances.

La Figure I.6 illustre les effets du multi-trajet et du masquage sur la puissance reçue en fonction de la distance parcourue [I.7]. La variation de l'intensité du signal due au masquage est appelée évanouissement lent (Slow Fading) et peut être décrite par la distribution log-normale suivante [I.8]

$$A_{p1}(d)[db] = A_p(d_0) + 10 \log \left(\frac{d}{d_0} \right)^n + X_\sigma \tag{I.4}$$

Où, X_σ est une variable aléatoire gaussienne avec une moyenne nulle et un écart type σ .

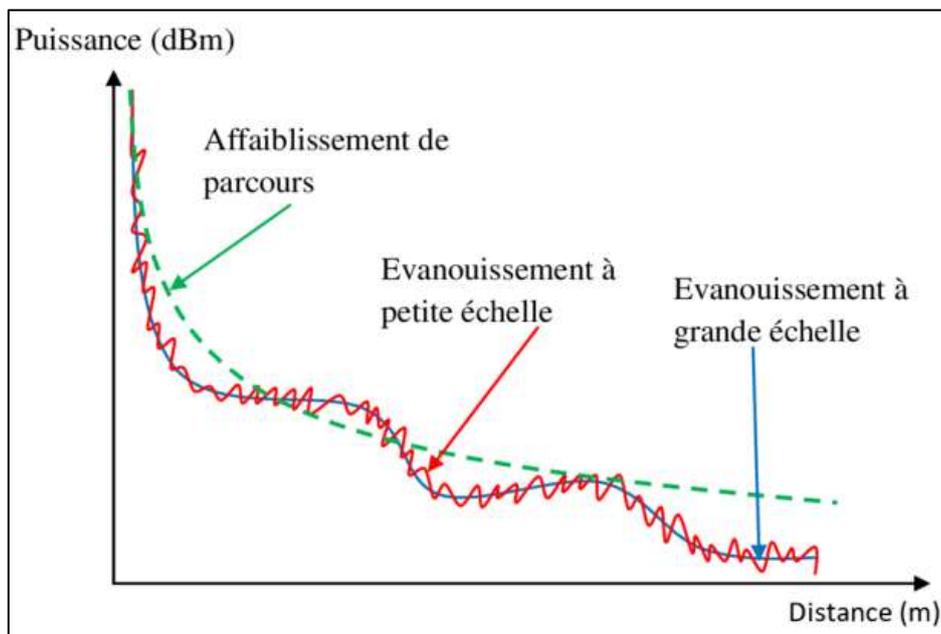


Figure I.6 : Les Variations de la Puissance reçue en Fonction de la Distance Parcourue

En d'autres termes, ce modèle particulier permet au récepteur situé à la même distance d d'avoir une atténuation de parcours différente, qui varie en fonction de l'effet de masquage aléatoire X_σ . L'expression du signal reçu, en bande de base et en temps continu devient alors [I.7]

$$r(t) = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{A_{p1} + X_{\sigma}} \\ \text{Perte de trajet} \\ \text{a une distance } d \end{array} \times \underbrace{\left(\sum_{l=0}^{L_h-1} h_l(t) \cdot \delta(t - \tau_l) \right)}_{\text{Effet des trajets multiples}} \right\} \times s(t) + \underbrace{n(t)}_{\text{Bruit additif}} \quad (I.5)$$

I.4.5 L'effet Doppler

L'effet Doppler 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 mouvement 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 a une vitesse v ; ce décalage fréquentiel f_d , appelé décalage Doppler, s'exprime comme suit [I.10] :

$$f_d = f_r - f_e = f_e \frac{v}{c} \cos \alpha \quad (I.6)$$

$$f_{d \max} = \frac{v}{\lambda} \quad (I.7)$$

Avec f_e la fréquence du signal transmis, f_r 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 $[0 \ 2\pi]$.

I.4.6 Problème de Mobilité à Grand Vitesse

Les problèmes de mobilité dans les réseaux de communication mobile peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que la densité des antennes, la topographie locale, les obstacles physiques, etc. Cependant, en général, les problèmes de mobilité commencent à se manifester à des vitesses de l'ordre de 100 km/h à 150 km/h. À ces vitesses, le réseau peut avoir du mal à suivre la vitesse de l'utilisateur et à maintenir une connectivité stable [I.18]. Au-delà de ces vitesses, les problèmes de mobilité peuvent devenir plus fréquents et plus importants, ce qui peut entraîner des interruptions de service. Les opérateurs de réseaux mobiles peuvent prendre

des mesures pour atténuer ces problèmes, mais dans certains cas, il peut être nécessaire de limiter la vitesse de l'utilisateur pour garantir une connectivité stable et une qualité de service adéquate.

I.5 Conclusion

L'évolution des interfaces radio dans les systèmes réseaux mobiles se caractérise par l'orientation vers la 5G. Cette nouvelle technique est caractérisée par pour apporter des très haut débits. L'objectif principal de ce chapitre est donner un aperçu sur les différents réseaux mobiles. Nous avons d'abord présenté les réseaux mobiles de GSM au LTE. Ensuite, la technologie 5G ces applications telles que l'internet des objets, les bande fréquentielles et les travaux de recherche en B5G/6G.

A la fin de chapitre nous allons modélisation du canal radio utilisée dans les réseaux de communication mobiles ainsi que le problème de la mobilité à grande vitesse. Le prochain chapitre, sera consacré à la présentation du système OTFS proposé en B5G afin de résoudre le problème de la mobilité à grande vitesse.

Chapitre II

Le Format de Modulation OTFS

Chapitre II

Le Format de Modulation OTFS

II.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 [II.1]. 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 [II.2]. 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

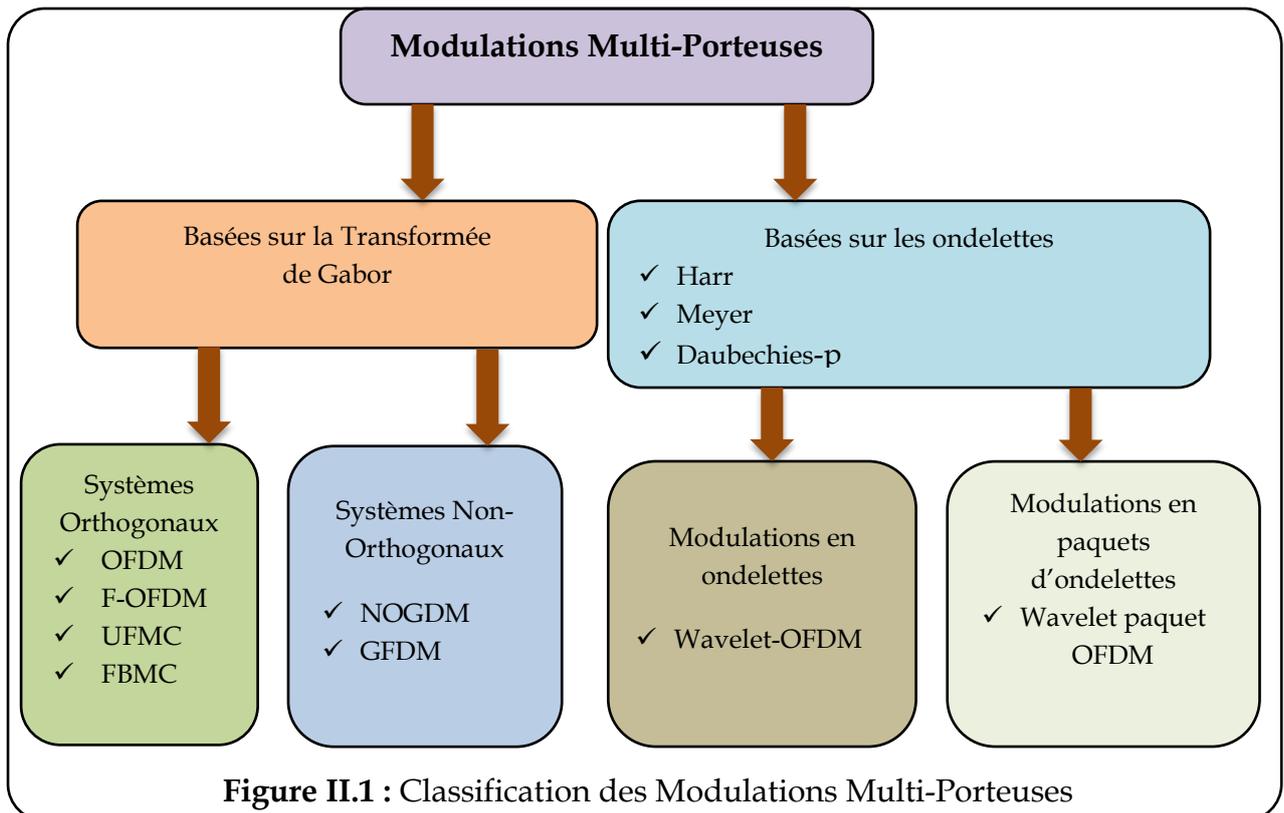
et G. Caire, publié dans le journal *Foundations and Trends in Communications and Information Theory* en 2020 [II.3], fournit une revue exhaustive de l'OTFS, couvrant les aspects théoriques, les algorithmes de modulation et de démodulation, ainsi que les applications potentielles dans les systèmes de 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 OTFS proposée pour la future génération des réseaux de communication sans fil.

II.2 Notion de Modulation Multi-Porteuses

En général, le transfert de données repose sur une transmission successive des symboles dans le temps. Chaque symbole occupe l'intégralité de la bande disponible dans ce cas. Une autre technique consiste à transmettre simultanément les symboles dans le temps, en occupant des bandes parallèles. La durée temporelle et la largeur de bande peuvent être réparties uniformément ou non uniformément pour chaque symbole. Dans le domaine de la transmission de données, les modulations multi porteuses font référence à une structure dans laquelle plusieurs symboles sont transmis simultanément en occupant des sous-bandes distinctes. La répartition des bandes peut être uniforme, ce qui donne lieu à des modulations basées sur les systèmes de Gabor, ou non uniforme, ce qui engendre des systèmes de modulation utilisant des ondes ou des paquets d'ondes [II.4] [II.5].

La classification des modulations multi porteuses en fonction de la répartition de la bande, qu'elle soit uniforme ou non uniforme, est illustrée dans la Figure ci-dessous.



II.3 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 [II.6]. Par la suite, nous expliquerons le concept de base orthogonale en termes de temps et de fréquence, et nous présenterons le modulateur/démodulateur OFDM.

I.3.1 Notion d'Orthogonalité

La Figure II.2 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 :

$$\int_a^b f(t)g(t)dt = 0 \quad (II.1)$$

Et que

$$\int_a^b g(t)h(t)dt = 0 \quad (II.2)$$

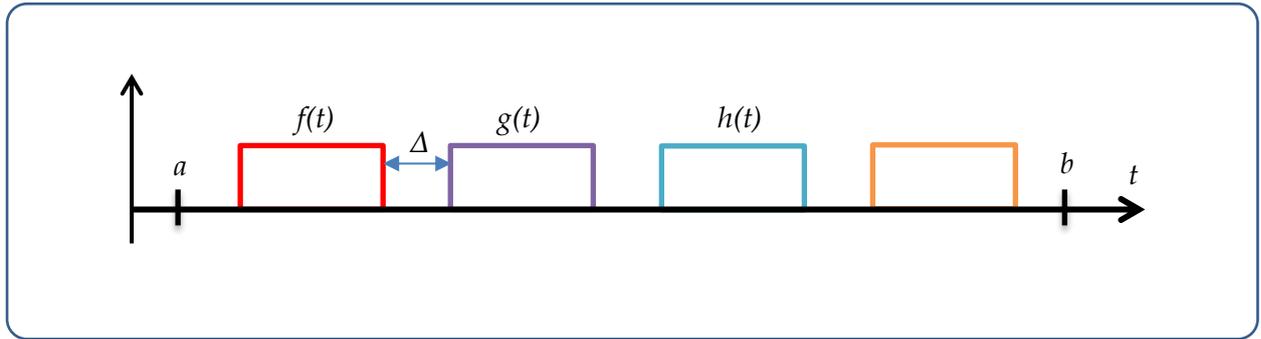


Figure II.2 : Base Orthogonale en Temps

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 $\Pi_{T_U}(t)$ avec une amplitude A et une largeur T_U . Elle est donnée par un sinus cardinal :

$$TF\{A\Pi_{T_U}(t)\} = A \frac{\sin(\pi f T_U)}{\pi f} = AT_U \text{Sinc}(f T_U) \quad (II.3)$$

Ainsi, en effectuant la transformation de Fourier sur chaque fonction porte $\Pi_{T_U}(t)$, d'une base orthogonale temporelle, il est possible d'obtenir une base orthogonale fréquentielle de sinus cardinaux. La Figure II.3 illustre un exemple de cette base orthogonale en fréquence, dérivée de la base orthogonale en temps décrite précédemment.

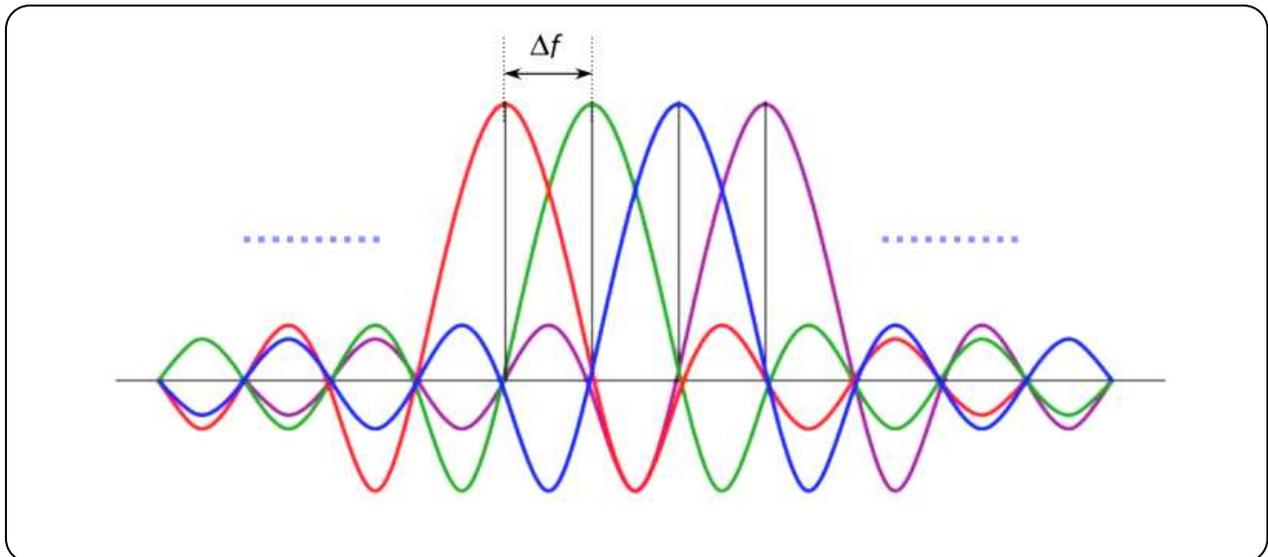


Figure II.3 : Base Orthogonale en Fréquence

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

$$\Delta F = \frac{1}{T_U} \quad (II.4)$$

II.3.2 Modulateur 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 :

$$X_K = a_k + jb_k \quad (II.5)$$

Les symboles X_K sont groupés en paquets de longueur N . Chaque séquence de N -symboles $X_0, X_1, X_2, \dots, X_{N-1}$ forme un symbole OFDM. La Figure II.4 illustre un schéma synoptique qui explique le principe de fonctionnement d'un Modulateur OFDM.

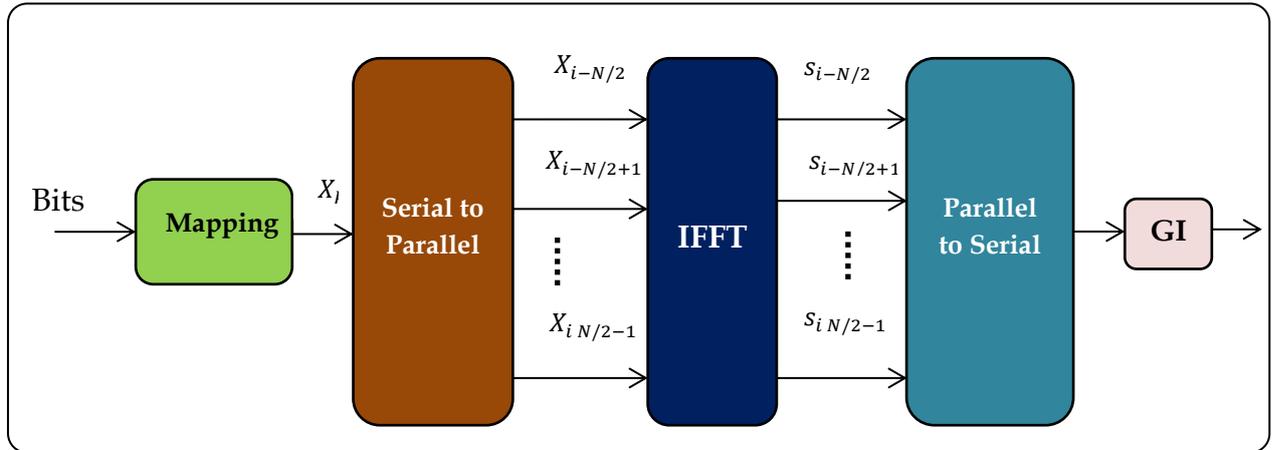


Figure II.4 : Diagramme Fonctionnel d'un Modulateur OFDM

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 [II.7]. Après l'opération de la IDFT basée sur l'algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier inverse (IFFT), le $i^{\text{ème}}$ OFDM symbole obtenu pour le $i^{\text{ème}}$ paquet de longueur N est donné par :

$$s_i(k) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} X_{i,n} e^{j2\pi \frac{nt}{T}}, \quad k = -N/2 \dots N/2 - 1 \quad (II.6)$$

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 :

$$f_n = \frac{n}{T} \quad (II.7)$$

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

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T}, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (II.8)$$

Où f_0 représente la première fréquence de la bande du signal. Ainsi, lorsque l'échantillonnage est effectué précisément à la fréquence f_k 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 [II.1]. 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.
- **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.

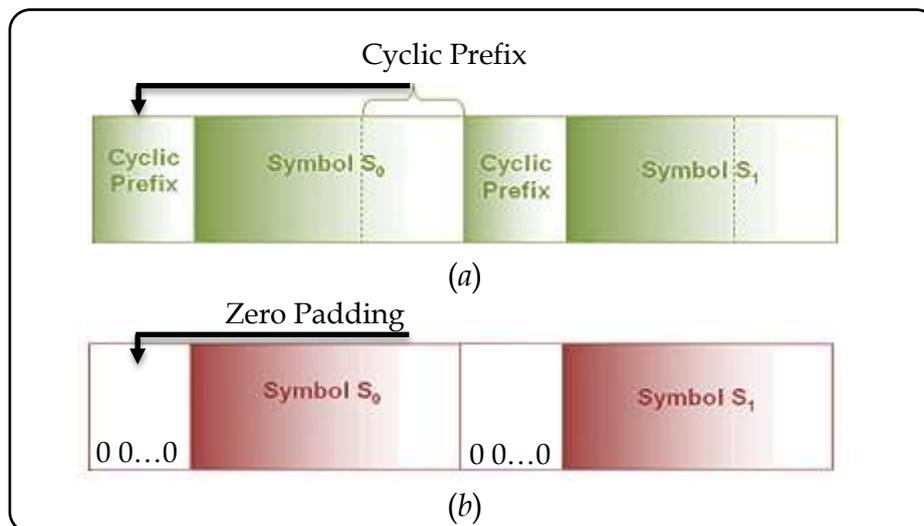


Figure II.5 : Techniques d'Insertion de l'Intervalle de Garde (GI)
(a) La technique CP (a) La technique ZP

II.3.3 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.

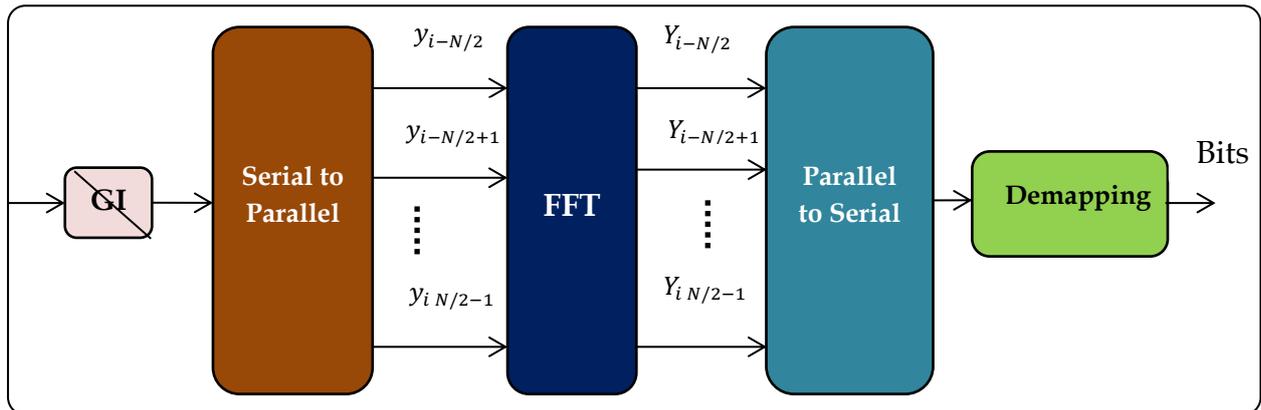


Figure II.6 : Diagramme Fonctionnel d'un Démodulateur OFDM

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 [II.7].

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.

II.4 Format 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.

II.4.1 Modulateur OTFS

La Figure II.7 ci-dessous montre le schéma fonctionnel d'un modulateur OTFS. Considérons un ensemble de $N \times M$ symboles d'information $x[k, l]$, $k = 0, \dots, N - 1, l = 0, \dots, M - 1$ à partir d'un alphabet de modulation $A = \{a_1, \dots, a_{|A|}\}$ (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 :

$$X_p[n, m] = \text{ISFFT}(x_p[k, l])$$

$$= \frac{1}{N \cdot M} \sum_{k,l} x_p[k, l] \cdot g_{Tx} \cdot e^{j2\pi(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M})}, l = 0, \dots, M - 1, k = 0, \dots, N - 1 \quad (II.9)$$

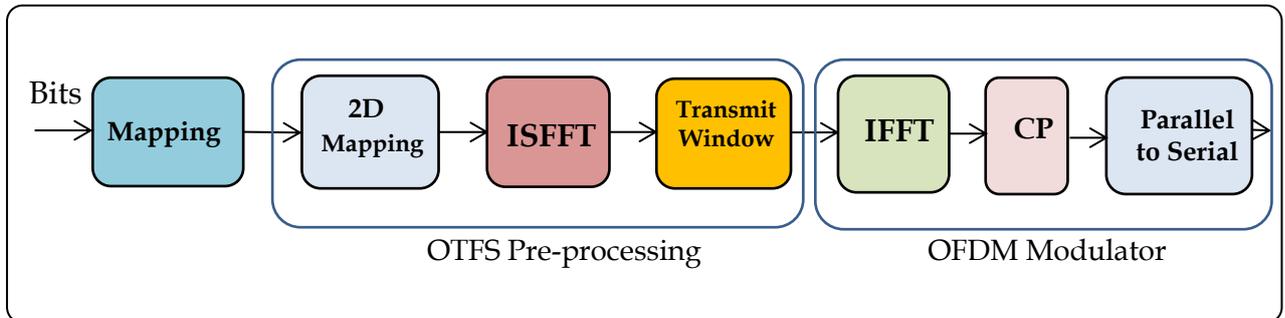


Figure II.7 : Diagramme Fonctionnel d'un Modulateur OTFS

L'équation (II.9) 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 Window) $g_{tx}(t)$ est une forme d'onde rectangulaire avec une durée T , alors (II.9) se réduit à une transformée de Fourier discrète inverse conventionnelle. Par conséquent, un symbole OTFS peut être considéré comme un pré-codage ISFFT appliqué sur N symboles OFDM indépendants consécutifs avec M sous-porteuses.

II.4.2 Démodulateur OTFS

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'est-à-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 comme le montre la Figure II.8.

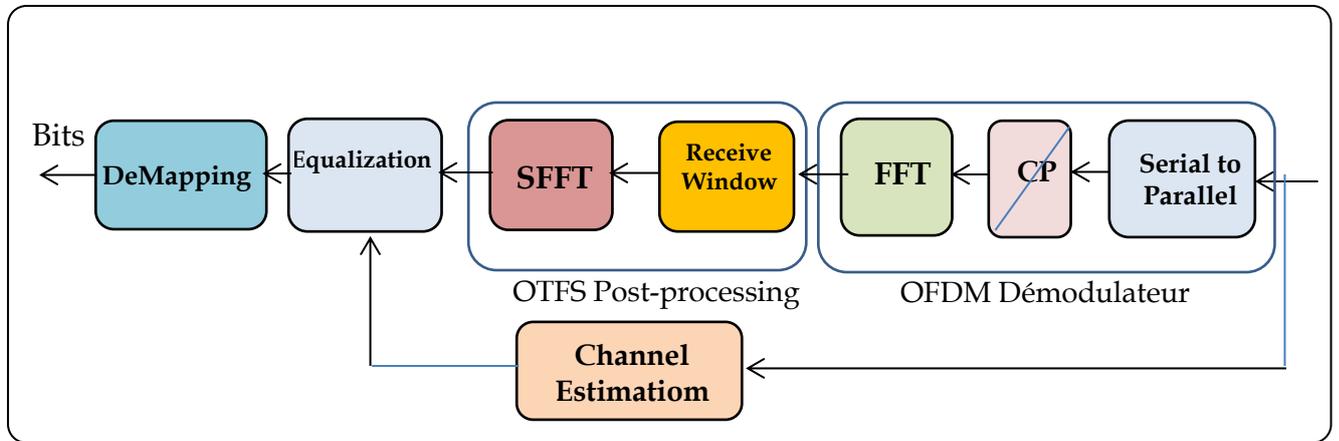


Figure II.8 : Diagramme Fonctionnel d'un Démodulateur OTFS

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

$$x_p[k, l] = \text{SFFT}(X_p[n, m])$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} X_p[n, m] \cdot g_{Rx} \cdot e^{-j2\pi(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M})}, l = 0, \dots, M - 1, k = 0, \dots, N - 1 \quad (II.10)$$

Après la conversion des symboles en un vecteur, une égalisation Zéro-Forcing (ZF) ou MMSE est établie afin d'extraire les symboles de données.

II.5 Conclusion

Afin de résoudre les problèmes de la modulation OFDM dans un canal multi-trajets avec une variant en temps un nouveau format de modulation appelée |OTFS a été proposée pour la B5G. Nous avons vu durant ce chapitre, une présentation de la modulation OFDM. Le format de modulation OTFS applique un prétraitement au niveau de l'émetteur basé sur la transformée ISFFT. Au niveau de récepteur et la démodulation OFDM un post-traitement est nécessaire afin d'extraire les symboles de données. Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de performances de la modulation multi-porteuses OTFS.

Chapitre III

*Résultats de Simulation
d'un Système OTFS*

Chapitre III

Résultats de Simulation d'un Système OTFS

III.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 format de modulation OTFS proposé pour les futurs systèmes 5G et B5G. Dans ce contexte nous décrivons en premier lieu l'effet de plusieurs paramètres (Type du canal, Vitesse de mobilité, Type de modulation) sur les performances du système pour les deux techniques d'égalisation « Single-Tap » et « LMMSE (Linear Minimum Mean Square Error)» en OTFS. Finalement nous présentons les résultats des simulations réalisés pour évaluer le taux d'erreur binaire (BER).

III.2 Environnement Utilisé

Le choix d'un bon environnement pour la programmation / la simulation est très important pour le développement des projets. Cela se fait suivant plusieurs facteurs : la puissance de compilation, la facilité d'utilisation, la disponibilité de plusieurs fonctionnalités et la communication avec d'autres environnements, etc. Afin de réaliser les différentes simulations de notre système, nous avons choisi l'environnement MATLAB. Ce dernier est un outil de calcul scientifique de haut niveau et interactif pour le développement d'algorithmes, la visualisation et l'analyse des données, ou encore le calcul. En utilisant MATLAB, nous pouvons résoudre des problèmes de calcul scientifique plus rapidement qu'avec les langages de programmation traditionnels (de bas niveau).

III.3 Métrique d'Evaluation

L'objectif de cette partie est l'évaluation de performances d'un système OTFS en termes de BER (Bit Error Rate) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR - Signal-to-Noise Ratio) pour différents paramètres du système à l'aide de le logiciel MATLAB.

- **Bit Error Rate (BER)**

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

$$\text{BER} = \frac{\text{Nombre de bits erronés en réception } (N_e)}{\text{Nombre de bits envoyés } (N)} \quad (\text{III. 1})$$

L'évaluation de performances d'un système OTFS a été effectué pour deux techniques de réception couramment utilisées : la réception « Single-Tap » et la réception « LMMSE »

- **La Réception « Single-Tap »**

La réception « Single-Tap » est une technique de réception relativement simple qui utilise un seul filtre adaptatif pour compenser les distorsions du canal de communication. Ce filtre est conçu pour minimiser l'interférence inter-symbole (ISI - Inter-Symbol Interference) et améliorer le rapport signal sur bruit. Dans ce chapitre, nous analyserons comment la BER évolue en fonction du SNR pour cette technique de réception appliquée à l'OTFS.

- **La Réception « LMMSE »**

D'autre part, la réception LMMSE est une technique plus avancée qui exploite des outils statistiques pour estimer le signal d'origine à partir du signal reçu. Elle prend en compte la matrice de covariance du bruit et du signal pour obtenir une estimation optimale du signal d'origine, en minimisant l'erreur quadratique moyenne.

L'objectif de ce chapitre est de comparer les performances de ces deux techniques de réception dans le contexte de l'OTFS en termes de BER en fonction du SNR. Nous utiliserons des simulations détaillées pour illustrer les résultats et analyser les avantages et les limitations de chaque technique.

III.4 Effet du Canal de Transmission

L'étude de l'effet du canal est très importante dans les systèmes de communication, ou chaque type du canal est caractérisé par des phénomènes physiques particulières. La Figure III.1 montre la simulation d'un système OTFS pour trois modèles des canaux du fading multi-trajets différents : EPA (Extended Pedestrian A model), EVA (Extended Vehicular A model), ETU (Extended Typical Urban model).

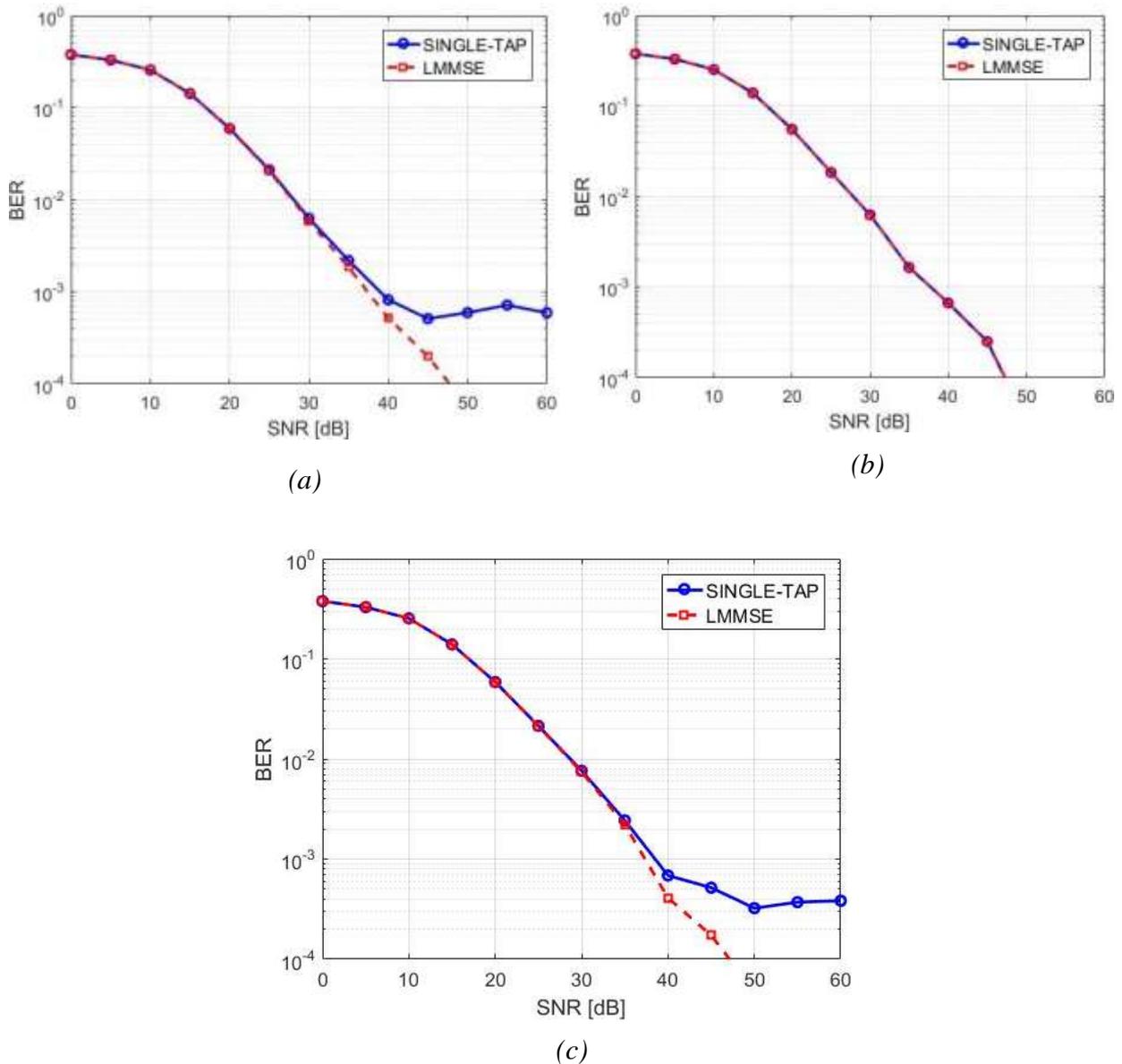


Figure III.1 : Effet du Canal de Transmission pour une Matrice 8X8 et une Modulation 16QAM (a) ETU 0km/h (b) EPA 0km/h (c) EVA 50km/h

A partir de la simulation qui étudie le changement de BER en termes de SNR pour le mode Single-Tap et LMSSE, nous remarquons une différence de performance entre les canaux de transmission ETU, EPA et EVA . Entre tous les simulations (III.a), (III.b) et (III.c), il n'y a pas de changement dans la réception avec égalisation "LMMSE", tant qu'il y a un changement remarquable dans pour la réception avec égalisation "Single-Tap". L'effet de la vitesse de mobilité sera discuté en détail dans la prochaine session.

III.5 Effet de la Vitesse de Mobilité

L'objectif de cette partie est d'étudier la performance la réception avec égalisation "Single-Tap" et la réception avec égalisation "LMMSE" en terme de la variation de vitesse pour différentes modulation.

III.5.1 Pour une Modulation 4QAM

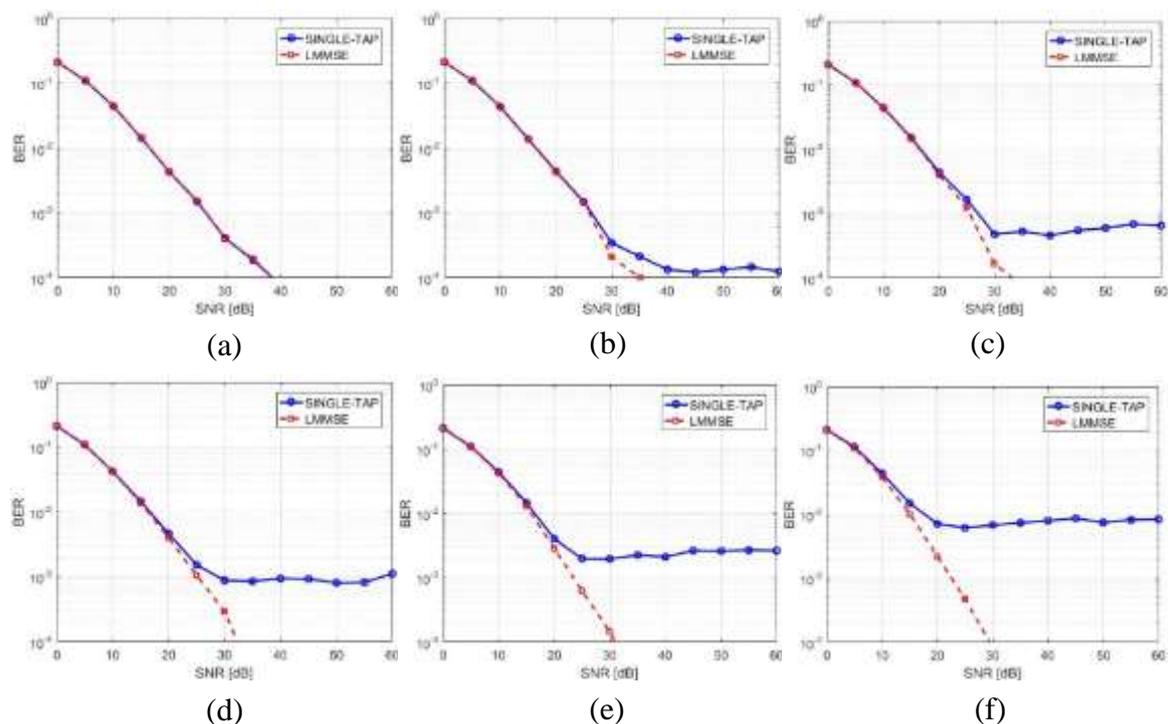


Figure III.2 : Effet de la Vitesse de Mobilité pour une modulation 2D de 4X4 4QAM

(a) 10km/h (b) 70km/h (c) 140km/h (d) 170km/h (e) 280km/h (f) 500km/h

A partir de la simulation avec matrice de modulation 4QAM 2D de taille 4X4, on remarque que pour avoir un BER = 10^{-4} , le niveau de SNR dans le cas d'un égaliseur "LMMSE" doit varier entre 30dB et 40 dB si on augmente la vitesse de mobilité. Pour avoir les mêmes performances avec un égaliseur "Single-Tap" le niveau de SNR est plus de 60dB. La différence apparait clairement à partir de la vitesse 70km/h. Dans les faibles vitesses il-y-a aucune différence entre le "Single-Tap" et le "LMMSE".

III.5.2 Pour une Modulation 16QAM

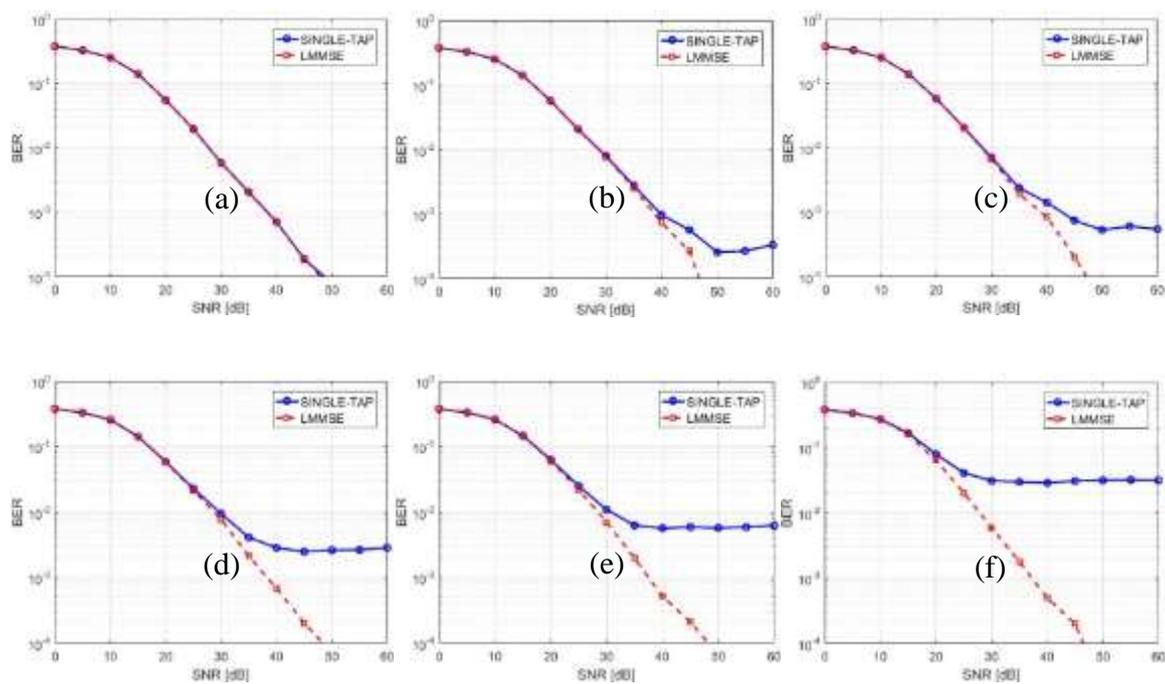


Figure III.3 : Effet de la Vitesse de Mobilité pour une modulation 2D de 4X4 16QAM
 (a) 10km/h (b) 50km/h (c) 70km/h (d) 140km/h (e) 210km/h (f) 500km/h

Pour la modulation 16QAM on remarque que pour avoir un le BER = 10^{-4} le niveau de SNR dans le cas d'un égaliseur "LMMSE" doit autour de 50dB si on augmente la vitesse de mobilité. Pour avoir les mêmes performances avec un égaliseur "Single-Tap" le niveau de SNR est plus de 60dB. La différence apparait clairement à partir de la vitesse 50km/h. Dans les faibles vitesses il-y-a aucune différence entre le "Single-Tap" et le "LMMSE".

III.5.3 Pour une Modulation 64QAM

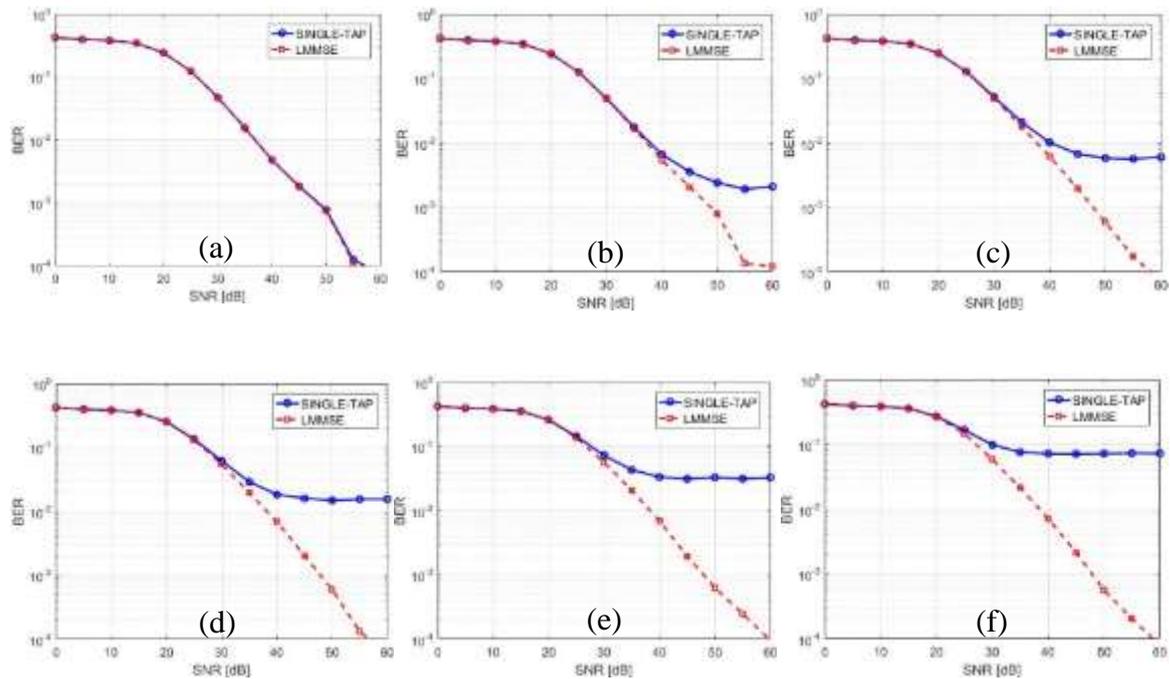


Figure III.4 : Effet de la Vitesse de Mobilité pour une modulation 2D de 4X4 16QAM
 (a) 10km/h (b) 70km/h (c) 120km/h (d) 200km/h (e) 300km/h (f) 500km/h

Pour la modulation 64QAM on remarque que pour avoir un le $BER = 10^{-4}$ le niveau de SNR dans le cas d'un égaliseur "LMMSE" doit varier entre 55dB et 60 dB si on augmente la vitesse de mobilité. Pour avoir les mêmes performances avec un égaliseur "Single-Tap" le niveau de SNR est plus de 60dB. La différence apparait clairement à partir de la vitesse 70km/h. Dans les faibles vitesses il-y-a aucune différence entre le "Single-Tap" et le "LMMSE".

III.6 Effet de la Taille de la Matrice de Modulation 2D

L'objectif de cette partie est d'étudier la performance de mode "Single-Tap" et le "LMMSE" en terme de changement de la taille de la Matrice de Modulation 2D pour différents vitesse de mobilité. La Figure III.5 illustre une comparaison entre la variation du BER en fonction du SNR pour les deux modes de réception.

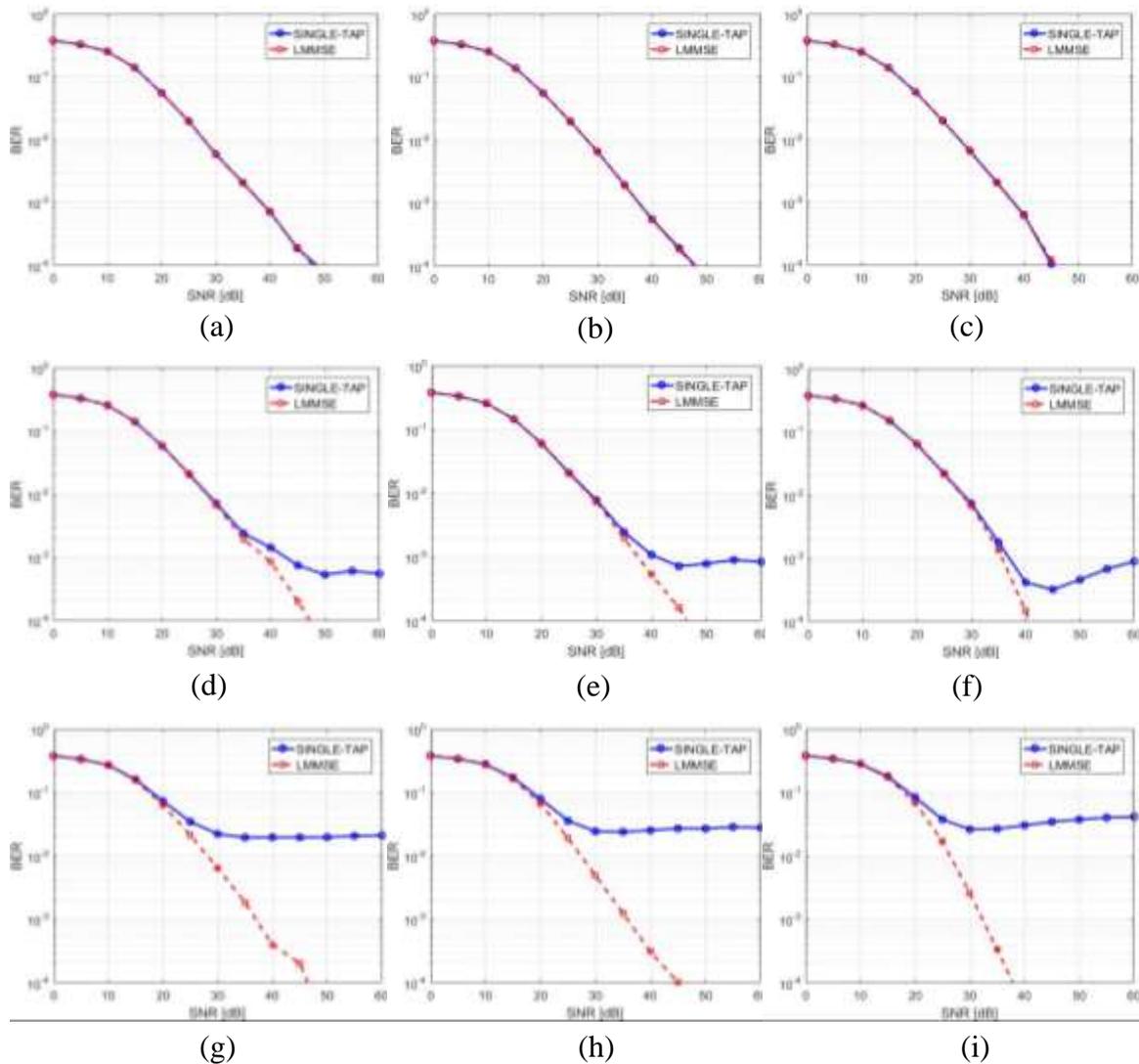


Figure III.5 : Effet de la Taille de Matrice la taille de la Matrice de Modulation 2D pour une Modulation 16QAM pour Différentes Vitesse de Mobilité (a) 4X4 10km/h (b) 8X8 10km/h (c) 16X16 10km/h (d) 4X4 70km/h (e) 8X8 70km/h (f) 16X16 70km/h (g) 4X4 400km/h (h) 8X8 400km/h (i) 16X16 400km/h

A partir de la simulation avec modulation 16QAM on remarque dans les cas (a), (b) et (c) qu'il-y-a aucune différence si on change le la taille de la matrice de modulation 2D avec une vitesse de mobilité de 10km/h. Pour les cas (d), (e) et (f) le niveau de SNR nécessaire pour avoir la performances cible en BER avec un égaliseur "LMMSE" diminue de 45dB à environ de 37dB lorsqu'on augmente la taille de la matrice de modulation 2D avec une vitesse de mobilité égale 400km/h. Dans les cas (g), (h) et (i) le niveau de SNR nécessaire diminue d'environ 50dB à 40dB lorsqu'on augmente la taille de la matrice avec une vitesse de 70km/h.

III.7 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons étudié les résultats de simulations d'un système de communication OTFS en fonction de certains paramètres pertinentes. La métrique utilisée est les mesures du BER en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) pour les techniques de réception "Single-Tap" et le "LMMSE". Nous avons également analysé l'effet du canal, l'impact de la variation de la vitesse de mobilité, le type de la modulation et de la taille de la matrice de modulation 2D sur les performances du système de communication OTFS . Les résultats obtenus mettent en évidence l'importance de choisir judicieusement les techniques de réception, la modulation appropriée et la taille de la matrice de modulation 2D pour obtenir des performances optimales en termes de BER, et de capacité et de qualité de transmission des données.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce mémoire explore différents aspects de la communication mobile, en mettant l'accent sur le système Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) et ses performances de réception en termes de taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR). Les chapitres abordent des sujets clés visant à comprendre et à améliorer les systèmes de communication mobile.

Le premier chapitre présente un état de l'art de la communication mobile, en examinant les avancées technologiques, les normes en vigueur et les défis actuels. Cela établit un contexte solide pour appréhender les enjeux et les opportunités dans ce domaine en constante évolution.

Le deuxième chapitre se concentre sur le système OTFS, en décrivant ses principes fondamentaux, son fonctionnement et ses avantages par rapport aux autres techniques de modulation. Les caractéristiques uniques de l'OTFS sont explorées, notamment sa résilience face aux effets du canal et de la mobilité, ainsi que sa capacité à offrir une efficacité spectrale accrue et une résolution temporelle fine.

Le troisième chapitre aborde la simulation de l'OTFS et les mesures de BER en fonction du SNR pour les techniques de réception SINGLE-TAP et LMMSE. L'impact de la vitesse de mobilité, de la modulation QAM et de la taille de la matrice sur les performances du système est également étudié. Les résultats mettent en évidence l'importance de choisir les bonnes techniques de réception, une modulation appropriée et une taille de matrice adaptée pour obtenir des performances optimales en termes de BER, de capacité et de qualité de transmission des données.

Dans l'ensemble, ce mémoire offre une meilleure compréhension des défis et des opportunités de la communication mobile, en soulignant les avantages de l'OTFS en termes de performances et d'efficacité spectrale. Les résultats des simulations fournissent des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des systèmes de communication OTFS, en prenant en compte des paramètres tels que la vitesse de mobilité, la modulation et la taille de la matrice.

Il est important de noter que ce mémoire ne couvre pas tous les aspects de la communication mobile et de l'OTFS. Il reste de nombreux domaines de recherche et d'amélioration potentiels, tels que l'adaptation dynamique des paramètres du système en fonction des conditions du canal, l'optimisation des performances en présence d'interférences et l'exploration de nouvelles techniques d'égalisation et de décodage.

En conclusion, ce mémoire apporte une contribution significative à la compréhension de la communication mobile et de l'OTFS, en explorant l'état de l'art, le fonctionnement du système et les performances de réception. Il constitue une base solide pour de futures recherches et développements visant à améliorer les systèmes de communication mobile et à exploiter pleinement le potentiel de l'OTFS dans des scénarios réels.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [I.1] S.D. Geeko "Comment les réseaux mobiles ont influencé l'évolution technologique" 13 juin 2023
- [I.2] Cité des télécoms "La mobilité: Histoire des télécoms" juin 2023, à l'adresse <https://www.cite-telecoms.com/blog/histoire/200-ans-de-telecoms/1ere-des-convergences/la-mobilite/>
- [I.3] Mohammad Meraj ud in, M., et al, "Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G", International Journal Of Computer Science And Information Technologies, 2015
- [I.4] Stéphane GIRODON, Rapport de stage - DESS MTI - IAE Aix en Provence, 2001-2002
- [I.5] Bouguen, Y., Hardouin, E., Wolff, F., Pujolle, G., et Maloberti, "LTE et les réseaux 4G" Paris: Eyrolles, 2012
- [I.6] A Choumane, "Synthèse d'un canal de propagation par système multi-antennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité", Thèse de doctorat, Université De Limoges, France, 2011.
- [I.7] Ikni Samir, "Contribution à l'Etude et au Développement de Techniques Avancées de Modulations Multiporteuses pour les futurs Systèmes de communication sans fil", Thèse de doctorat, Université De Guelma, Algérie, 2019.
- [I.8] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, "MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB", Copyright 2010, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2 Clementi Loop, # 02-01, Singapore 129809.
- [I.9] T. S. Rappaport, Wireless communications: principles and practice: Prentice Hall PTR, 2002.
- [I.10] Marwan EL HAJJ, "Caractérisation et modélisation du canal de propagation indoor pour les réseaux WLAN/WPAN multi-bandes", Thèse de doctorat, Rennes, 2020.
- [I.11] A. Ghosh, J. Zhang, J. G. Andrews, and R. Muhamed, "Fundamentals of LTE," 1st edition, Communications Engineering and Emerging Technologies Series, Prentice Hall, 2010
- [I.12] T.A. Milligan "Modern Antenna Design", second edition John Wiley & Sons, Inc, 2005
- [I.13] Site Internet "DC-HSPA+ brings 42 Mbps to 39 networks" 13 juin 2023, à l'adresse <https://www.3gpp.org/news-events/partner-news/dc-hspa-brings-42-mbps-to-39-networks>
- [I.14] Imad Salah, Laboratoire Paragraphe Université Paris 8, ISTE OpenScience - Published by ISTE Ltd. London, UK - openscience.fr, 2017
- [I.15] Site Internet "ITF Beyond 5G" juin 2023, à l'adresse <https://www.imecitf.com/2022/beyond-5g>
- [I.16] Ichbiah, D, "Définition | 6G - 6e génération | Futura Tech. Futura", juin 2023
- [I.17] Alsharif, M. H., Kelechi, A. H., Albreem, M. A., Chaudhry, S. A., Zia, M. S., & Kim, S, "Sixth generation (6G) wireless networks: Vision, research activities, challenges and potential solutions" Symmetry, 12(4), 676, 2020

- [I.18] Tarek BCHINI, "*Gestion de la Mobilité, de la Qualité de Service et Interconnexion de Réseaux Mobiles de Nouvelle Génération*", these de doctorates, university de Toulouse, juin 2010
- [II.1] C. Rusu, Y. C. Eldar, and A. J. Goldsmith "Orthogonal Time Frequency Space Modulation" *IEEE Transactions on Communications*, 2018
- [II.2] E. Basar and Y. C. Eldar "Orthogonal Time-Frequency Signaling for Fading Multipath Channels" *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017
- [II.3] Y. C. Eldar and G. Caire, "Orthogonal Time-Frequency Space Modulation" *Foundations and Trends in Communications and Information Theory*, 2020
- [II.4] H. Bogucka and A. Conti. *Degrees of freedom for energy savings in practical adaptive wireless systems. IEEE Communications Magazine*, 49(6) : 38-45, 2011.
- [II.5] Jonathan G. Koomey. Estimating total power consumption by servers in the U.S. and the world. Technical report, Lawrence Berkley National Laboratory, February 2007.
- [II.6] Gerhard Fettweis and Ernesto Zimmermann. ICT Energy Consumption – Trends and Challenges. In 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC 2008, September 2008.
- [II.7] Marian K. Kazimierczuk. RF Power Amplifiers. Wiley, November 2008.