

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux de Télécommunications

Par :

DELBAZE Fatiha

Sujet

Amélioration des performances d'un réseau WLAN-IoT 5G autour des ondes millimétriques 60 GHz

Soutenu publiquement, le **23 / 06 / 2022**, devant le jury composé de :

M. BENDIMERAD F.T	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. KAMECHE S	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. ADARDOUR H.E	MCA	Univ. Chlef	Co- Directeur de mémoire
M. CHIKH BLED H	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux de Télécommunications

Par :

DELBAZE Fatiha

Sujet

Amélioration des performances d'un réseau WLAN-IoT 5G autour des ondes millimétriques 60 GHz

Soutenu publiquement, le **23 / 06 / 2022**, devant le jury composé de :

M. BENDIMERAD F.T	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. KAMECHE S	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. ADARDOUR H.E	MCA	Univ. Chlef	Co- Directeur de mémoire
M. CHIKH BLED H	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur

Je dédie ce modeste travail à :

Je remercie Dieu tout-puissant de m'avoir donné la santé et le courage de terminer ce modeste travail.

À l'âme pure de mon père.

À celle qui m'a comblé de ses prières et semé l'ambition et la persévérance, et elle a été mon soutien tout au long du chemin, ma mère adorée, que Dieu prolonge sa vie.

À ma chère grand-mère qui m'a soutenu et encouragé ainsi que la passion qui m'entoure depuis toujours et pour toujours, que Dieu la protège et lui donne santé et longue vie.

À toute ma famille, sans exception, et à mes sœurs, je dédie mon diplôme et vous dis merci pour votre soutien constant et votre présence à mes côtés.

À tous ceux dont le cœur se souvient avant que la plume ne les écrive, mes chers amis.

surtout Basma ,djaouida ,aicha ,esmahan

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

À tous ceux que nous aimons.

Remerciements

« Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu tout-puissant, qui m'a donné la force, la volonté et la patience pour accomplir ce modeste travail »

*J'exprime ma gratitude et mes sincères remerciements au directeur de mémoire, Monsieur le Professeur **KAMECHE Samir**, pour ses efforts, sa compréhension constante et ses précieux conseils, sans lesquels ce mémoire n'aurait pas été possible.*

*Par ailleurs, je tiens à remercier Monsieur **ADARDOUR Haroun Errachid**, co-directeur de mémoire, qui m'a permis d'approfondir mes recherches en m'informant et en me donnant généreusement aide et conseils. C'est grâce à lui.*

*Je tiens à remercier Monsieur le Professeur **BENDIMERAD Fethi Tarek** d'avoir accepté de présider le jury.*

*J'adresse également mes chaleureux remerciements à Monsieur **CHIKH BLED Hichem** qui nous fera l'honneur de participer au jury pour examiner ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier Monsieur **IRID Sidi Mohamed Hadj**, maître de conférences classe A, pour son aide constante, ses conseils et ses encouragements durant mes études.*

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à rendre ce projet possible, je dis merci à tous.

Enfin, tous les remerciements vont à tous les professeurs de la Faculté de Technologie, qui m'ont aidé tout au long de mon cycle universitaire.

Résumé

Ce projet vise à améliorer les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G en ondes millimétriques dans un environnement encombré, autour de la bande de fréquences sans fil de 60 GHz. Cependant, en raison des effets aléatoires de l'évanouissement et des trajets multiples, la nature du canal de propagation 5G peut être affectée, ce qui explique que le lien le plus faible en termes de SNR apparaisse et, par conséquent, les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G peuvent être dégradées.

En effet, ce travail a pour principal objectif d'améliorer le lien SNR du signal reçu au niveau de l'utilisateur secondaire IoT-5G, le taux de transmission maximal de bout en bout entre le point d'accès WLAN-IoT 5G et l'utilisateur secondaire IoT-5G, ainsi que le temps de transmission requis des paquets de données, en considérant que l'utilisateur secondaire IoT-5G est en mouvement. Afin d'atteindre ces objectifs, on s'appuie sur l'utilisation d'un estimateur récursif simple (ou ESR).

Mots clés : 60 GHz, 5G, WLAN-IoT 5G, Utilisateur Secondaire IoT-5G, ESR.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Table des matières	iii
Sigles et abréviations	vi
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xii
Introduction générale	2

Chapitre 1 : Technologies 5G pour les réseaux sans fil

1.1. Introduction	5
1.2. Bref historique	5
1.3. 5ème génération	6
1.4. Objectif de la 5G	7
1.5. Architecture de la 5G	7
1.6. Vision de la 5G	8
1.6.1. Applications	8
1.6.2. Domaines d'utilisation	10
1.7. Service innovant	12
1.7.1. Objets connectés	12
1.7.2. MIMO massive	12
1.7.3. Radiocommunications	13
1.8. Fréquences utilisées pour la 5G	15
1.8.1. Rôle des IMT pour 2020 (5e génération) et au-delà	15

1.9. Conclusion.....	16
----------------------	----

Chapitre 2 : Technologies 60 GHz, Propagation du signal et Modèle de mobilité

2.1. Introduction	18
2.2 Technologies 60 GHz appliquées aux réseaux sans fil	18
2.3. Equipements qui intègrent le 60 GHz	20
2.4. Réglementation et attribution des fréquences	21
2.4.1. Amérique du Nord	22
2.4.2. Japon.....	22
2.4.3. Australie.....	22
2.4.4. Corée.....	23
2.4.5. Europe.....	23
2.5. Caractérisation du canal de propagation	24
2.6. Modèle de propagation.....	25
2.6.1. Propagation en espace libre	25
2.6.2. Trajets multiples	28
2.7. Évanouissements	32
2.7.1. Évanouissement à grande échelle	33
2.7.2. Évanouissement à petite échelle	33
2.8. Mobilité dans les réseaux radio	34
2.9. Conclusion.....	35

Chapitre 3 : Résultats et interprétations

3.1. Introduction	37
3.2. Algorithme proposé.....	37
3.2.1. Modèle de mobilité de Gauss-Markov	38
3.2.2. Estimateur récursif simple (ou ERS).....	39
3.3. Résultats des simulations et interprétations	42
3.3.1. Simulations	42
3.3.2. Résultats et interprétations.....	42
3.4. Conclusion.....	50
Conclusion générale	52
Références bibliographiques	54

#

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation

A

ACMA	Australian Communications and Media Authority
AM	Amplitude Modulation
AWGN	Additive White Gaussian Noise

B

BW	BandWidth
Bps	Bit per second

C

CEPT	Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CDMA	Code Division Multiple Access

D

dBm	Décibel Milliwatt
dBi	Décibel Isotope

E

EC	Estimation Cycle
ECC	Electronic Communications Committee
ERC	European Radiocommunication Committee
ETSI	European Telecommunications Standards Institute

F

FC	Fusion Center
FCC	Federal Communications Commission
FM	Frequency Modulation

G

Gbps	GigaByte Per Second
GHz	GigaHertz
GMMM	Gauss Markov Mobility Model

H

HD	Haut Définition
Hz	Hertz

I

IC-SMT	Industry Canada Spectrum Management and Telecommunications
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT	International Mobile Telecommunications

IoT Internet of Things
IP Internet Protocol
ISM Industrial Scientific Medical

L

LNS Log-Normal Shadowing
LOS Line Of Sight

M

MFSG Millimeter wave Frequency Study Group
MPHPT Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications
MHz MegaHertz
mW milliWatt

N

NLOS Non Line Of Sight

P

PA Power Amplifiers
PIRE Power Isotropic Radiated Equivalent
PCSN Personal Communications Service Networks

R

RAN	Radio Access Network
RF	Radio Frequency
RWMM	Random Walk Mobility Model
RWPMM	Random Waypoint Mobility Model
RPGMM	Reference Point Group Mobility Model

S

SNR	Signal to Noise Ratio
------------	------------------------------

T

TIC	Technical Information Center
------------	-------------------------------------

U

URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication
--------------	---

W

WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

Chapitre 1

Figure 1.1. Évolution des réseaux mobiles.....	7
Figure 1.2. Architecture générale de réseau cellulaire 5G	8
Figure 1.3. Évolution des applications de la 4G vers la 5G	10
Figure 1.4. Scénarios d'utilisation des IMT pour 2020 et au-delà	11
Figure 1.5. MIMO massive	12
Figure 1.6. Micro-ondes et spectre de fréquences ondes millimétriques	13
Figure 1.7. Technologie full-duplex.....	14
Figure 1.8. Petites cellules.....	14

Chapitre 2

Figure 2.1. Spectre électromagnétique.....	19
Figure 2.2. Routeur Talon AD7200 opérant à 2.4/5/60 GHz.....	20
Figure 2.3. Débit dépendant de la portée pour les normes WLAN et WPAN	21
Figure 2.4. Attribution et exploitation des fréquences mondiales de la bande passante de 60 GHz	24
Figure 2.5. Les différents mécanismes de propagation.....	25
Figure 2.6. Représentation d'un canal de propagation.....	26
Figure 2.7. Ellipsoïde de Fresnel.....	26
Figure 2.8. Propagation par trajets multiples dans un environnement "extérieur".....	28
Figure 2.9. Propagation multi-trajets LOS	29

Figure 2.10. Propagation multi-trajets NLOS	29
Figure 2.11. Fonctionnement des réflexions spéculaires et diffuses	29
Figure 2.12. Mécanisme de réflexions ou de transmission	30
Figure 2.13. Mécanisme de diffraction.....	31
Figure 2.14. Mécanisme de diffusion	31
Figure 2.15. Puissance reçue [dB] vs. Distance [m]	32
Figure 2.16. Classification des canaux à évanouissement.....	33

Chapitre 3

Figure 3.1. Cycle d'estimation.....	40
Figure 3.2. 3 canaux disponibles dans la bande 60 GHz au Canada.....	42
Figure 3.3. Trajectoire estimée de l' US_{IoT-5G} via l'utilisation de l'algorithme GMMM.....	43
Figure 3.4. Vitesse estimée de l' US_{IoT-5G} via l'utilisation de l'algorithme GMMM vs. Temps [s].....	44
Figure 3.5. Rapport signal sur bruit entre l'US-5G et l'UP-5G [dB] vs. Temps [s].....	45
Figure 3.6. TTM entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} [Mbps] vs. Temps [s].....	46
Figure 3.7. TTR entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} [s] vs. Temps [s].....	47
Figure 3.8. TTR entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} [s] vs. TDT [Mb].....	49

Chapitre 1

Tableau 1.1. Bilan des technologies de communications mobiles.....	6
Tableau 1.2. Capacités et valeurs clés 5G de l'UIT-R.....	9

Chapitre 2

Tableau 2.1. Plan des bandes de fréquences et les limites sur la puissance d'émission, la PIRE et le gain d'antenne pour différents pays	21
---	----

Chapitre 3

Tableau 3.1. Éléments clés de la méthode d'estimation	39
Tableau 3.2. Scénarios proposés de détection locale du signal primaire UP_{IoT-5G}	42
Tableau 3.3. Paramètres de simulations	43
Tableau 3.4. Amélioration des performances d'un réseau WLAN-IoT 5G à $t = 139$ s, dans le troisième scénario.....	48
Tableau 3.5. Comparaison des performances d'un réseau WLAN-IoT 5G dans différents scénarios.	48
Tableau 3.6. Comparaison des performances TTRs dans un réseau WLAN-IoT dans différents scénarios avec des instants différents pour une TDT = 350 [Mb].	50

Introduction générale

La naissance de la cinquième génération de communications cellulaires ou 5G constitue une évolution prometteuse pour le marché des objets connectés (ou IoT : Internet of Things). Par ailleurs, le déploiement de ce réseau contribuera grandement à augmenter les performances et la fiabilité des objets connectés.

La croissance de l'IoT s'étant accélérée au cours des dernières années, il a fallu développer des solutions innovantes. Ces solutions ont pour but de multiplier la quantité de données transmissibles ainsi que leur débit. Grâce à cela, les infrastructures actuelles seront en mesure de faire face à la hausse attendue des périphériques connectés et du transfert de données. Parmi les solutions les plus modernes à ce problème figure notamment la mise en place de la technologie internet mobile sans fil 5G.

La réussite commerciale de tout périphérique IoT repose sur ses performances. Elles dépendent de la rapidité avec laquelle un périphérique est capable de communiquer avec d'autres périphériques IoT, smartphones et tablettes, logiciels sous la forme d'applications ou de sites web, etc. Dans le cadre de la 5G, les débits de transfert de données progressent de manière spectaculaire. En réalité, la 5G présente un débit 10 fois supérieur à celui des réseaux 4G plus anciens. Cette amélioration de débit autorise les périphériques IoT à communiquer et à partager des données plus efficacement que jamais auparavant.

Les réseaux locaux sans fil reposent sur un standard qui constitue des solutions intégrées adaptées à la mise en réseau d'une manière qui offre mobilité, flexibilité, facilité d'installation, faible coût pour la mise en œuvre de la technologie IoT sans fil 5G.

L'utilisation des ondes millimétriques en tant que solution attrayante pour la transmission de débits de données plus élevés (Gbits/s) pour les applications à courte distance. Toutefois, les ondes millimétriques sont très vulnérables aux pertes de propagation et aux divers obstacles tels que les meubles et les murs. De ce fait, les besoins toujours croissants en fréquences plus élevées ont amené de la part de nombreux chercheurs à se focaliser prioritairement sur les ondes millimétriques à 60 GHz. En effet, la bande 60 GHz est un bon candidat pour les futurs systèmes de communication WLAN-IoT à haut débit, elle offre un avantage en termes de coût et de temps pour les fabricants d'équipements afin de garantir la qualité aux consommateurs.

La grande portion du spectre dans la bande des 60 GHz est accessible gratuitement dans tout le monde, ce qui explique l'émergence de nouvelles technologies autorisant les connexions Wi-Fi. Ce spectre sans licence est plus approprié pour les bandes de fréquences

plus élevées telles que les bandes d'ondes millimétriques et contribue de manière significative à l'amélioration de la qualité de vie des utilisateurs [1,2].

Cependant, dans ce travail, on s'intéresse à l'amélioration des performances d'un réseau WLAN-IoT 5G autour des ondes millimétriques 60 GHz. Mais d'abord, on va présenter la partie purement théorique de la technologie 5G pour les réseaux sans fil et les principaux composants afin de développer l'algorithme souhaité pour atteindre les objectifs de la contribution proposée.

CHAPITRE 1

Technologies 5G pour les réseaux sans fil

1.1. Introduction

Les systèmes de communication cellulaire ont été conçus en quatre générations, chaque génération de mobiles arrivant approximativement tous les dix ans. La première génération (ou 1G) a été exploitée pour les téléphones mobiles ou cellulaires, offrant des niveaux d'efficacité et de sécurité très faibles. En revanche, la deuxième génération (ou 2G) a été développée en adoptant la technologie numérique et en numérisant également le signal vocal. Cette technologie présente donc une efficacité bien supérieure et apporte de nouvelles fonctionnalités telles que la messagerie texte et les communications à bas débit. La 1G et la 2G constituent donc des technologies de téléphonie cellulaire.

En effet, l'objectif de la troisième génération (ou 3G) était de permettre la transmission de données à haut débit et d'améliorer la technologie afin de permettre la transmission de données jusqu'à 14 Gbits/s, alors que la quatrième génération (ou 4G) repose sur la technologie IP et est également apte à offrir un débit de données allant jusqu'à 1 Gbits/s. Par conséquent, la 3G et la 4G apporteront la technologie à large bande. En ce qui concerne la technologie de cinquième génération (ou 5G), elle correspond à une nouvelle génération de normes de téléphonie mobile, à une technologie évolutive et à une opportunité de mettre en œuvre des réseaux câblés et sans fil convergents dans le cadre de la gestion des réseaux, afin de répondre aux exigences énormes en matière de communication et de prise en charge de nouvelles applications au moyen d'un débit de données très élevé. Le développement de la 5G va offrir des débits de données beaucoup plus rapides, une connectivité fiable et une faible latence aux télécommunications mobiles internationales (ou IMT : International Mobile Telecommunications), tous ces facteurs étant nécessaires à la mise en place de notre nouvel écosystème de communication mondial, constitué de périphériques connectés transférant de grandes quantités de données via le très haut débit.

Après ce propos, on présentera brièvement la technologie sans fil 5G autour des ondes millimétriques et leur apport.

1.2. Bref historique

Les technologies des systèmes de communication mobile sont illustrées dans le Tableau 1.1. Historiquement, le réseau de téléphonie mobile a été subdivisé en quatre générations, et chaque génération possède des caractéristiques spécifiques qui la distinguent des autres. En effet, chaque génération est indépendante des autres en termes de fréquence, de débit de

données, de nombre maximal d'utilisateurs et de zone géographique couverte par le réseau [3,4,5].

Génération	1G	2G	3G	4G	5G
1 ^{ère} année de déploiement	1981	1992	2001	2010	2020
Débit de données maximal supporté	2 Kbits/s	64 Kbits/s	2 Mbits/s	100 Mbits/s	10 Gbits/s
Fréquences	900 MHz	900 MHz et 1,8 GHz	800/900 MHz 1,7 à 1,9 GHz 2100 MHz	800 MHz 900 MHz 1800 MHz 2100 MHz 2600 MHz	28 GHz 37 GHz 39 GHz 64 à 71 GHz
Descriptions fonctionnelles générales	Téléphones cellulaires analogiques	Téléphones cellulaires numériques (GSM/CDMA)	Premier mobile à haut débit, utilisant les protocoles IP (WCDMA 2000)	Mobile à haut débit, sur une norme unifiée (LTE)	Internet tactile- Améliorer le réseau de communication M2M

Tableau 1.1. Bilan des technologies de communications mobiles [3,4,5].

1.3. 5^{ème} génération

On considère la technologie 5G comme l'une des technologies mobiles les plus avancées dans le secteur des communications sans fil [6]. Cette technologie prévoit une expérience pour l'utilisateur final en fournissant des applications et des services à des vitesses de l'ordre du gigabit tout en atténuant la latence des données et en améliorant la fiabilité du réseau, qui comprend des périphériques connectés qui transfèrent de grandes quantités de données en haut débit. Par conséquent, on peut dire que le passage de la 4G à la 5G implique un changement optimal de la conception d'un système à processus unique à un système à processus multiples [7].

1.4. Objectif de la 5G

Il s'agit de la technologie de la nouvelle génération de normes de téléphonie cellulaire extensibles et supportant de nouvelles fonctions, qui offre des solutions efficaces et rapides par le biais des meilleures méthodes de gestion à distance, dont les objectifs sont les suivants :

- Paquets de données volumineux : les données doivent avoir une taille supérieure à 1 000 fois ;
- Atteindre un temps de transmission inférieur à 10 millisecondes ;
- Faible nombre d'antennes : le nombre de terminaux pouvant être connectés à chaque antenne doit être de 100 fois. Par ailleurs, le nombre d'antennes dépend essentiellement des fréquences exploitées, et les débits de données sont d'autant plus faibles.

La stratégie 5G offre une technologie à haut débit et une technologie d'antenne avancée afin de couvrir un réseau extrêmement amélioré permettant de garantir une connectivité à tout moment et partout [7].



Figure 1.1. Évolution des réseaux mobiles [7].

1.5. Architecture de la 5G

En réalité, la 5G est un environnement dynamique, homogène et flexible pour plusieurs technologies avancées supportant une large variété d'applications. La 5G fait appel à une architecture plus intelligente, avec des réseaux d'accès sans fil (RAN) qui ne sont plus soumis aux limites de la proximité de la station de base ou d'une infrastructure complexe. La 5G permet d'ouvrir la voie à un réseau d'accès sans fil (RAN) virtuel, flexible et décentralisé, avec de nouvelles interfaces offrant des points d'accès aux données supplémentaires.

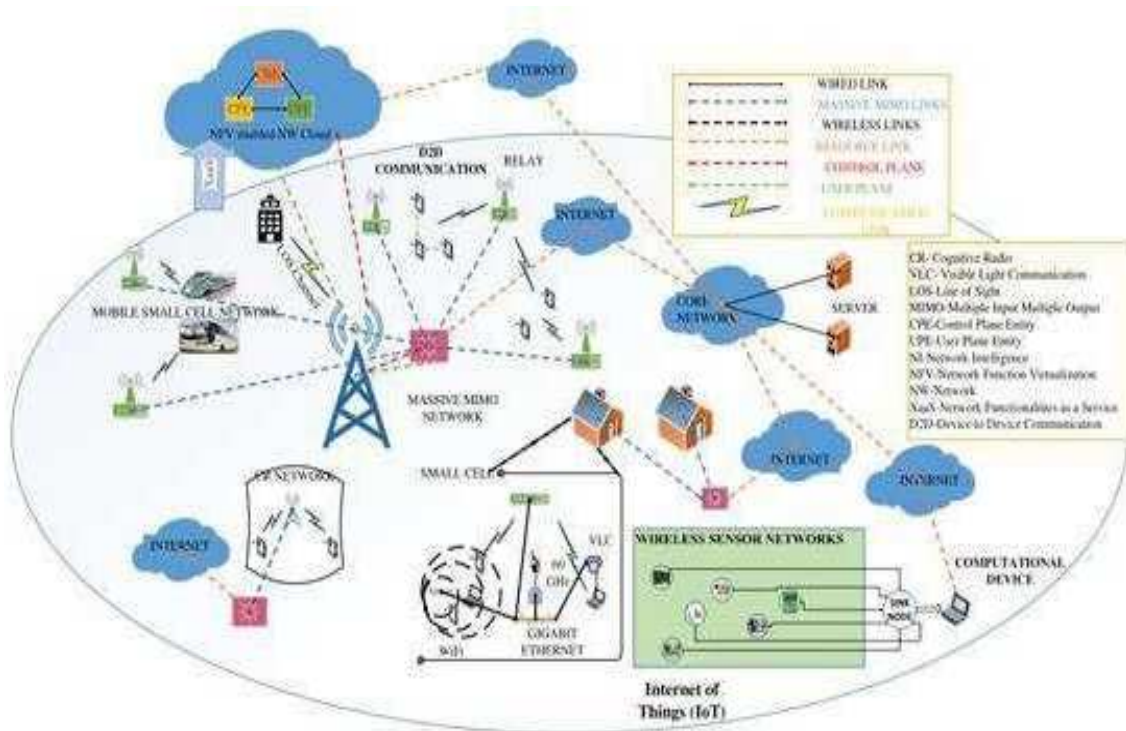


Figure 1.2. Architecture générale de réseau cellulaire 5G.

1.6. Vision de la 5G

Le concept de la 5G est une technologie mobile évoluée qui englobe une gamme complète d'applications et de nouveaux concepts de systèmes afin de renforcer l'efficacité du spectre et de l'énergie et de mettre l'accent sur l'internet des objets par le biais d'une couverture réseau améliorée, pour décrire ci-après les exigences des systèmes sans fil de la 5G (voir le Tableau 1.2) [8].

1.6.1. Applications

En effet, la technologie 5G fait partie des derniers systèmes de connectivité Internet, qui se caractérise par une transmission de données ultra-rapide et une bonne fiabilité avec une latence faible. Elle possède de nouvelles applications et de nouveaux services visant à améliorer significativement les performances du réseau et à fournir des solutions et des défis à venir concernant le développement de la technologie moderne dans différents domaines. Par conséquent, de nombreux organismes ont suggéré de nombreux cas d'utilisation représentés dans l'Internet mobile et l'Internet des Objets (ou IoT : Internet of Things), les principaux facteurs du développement futur de la technologie de cinquième génération pour les communications par téléphone cellulaire, et ils apporteront un large panel de cas d'utilisation (voir la Figure 1.3) [9].

Caractéristiques principales	Définition	Valeurs
Débits de données maximums	Débit maximal réalisable par utilisateur	20 Gbits/s
Débit de données éprouvé par l'utilisateur	Débit minimum de données réalisable pour un utilisateur en milieu de réseau réel	0.1–1 Gbits/s
Latence	Temps écoulé entre la transmission d'un paquet de données à partir du nœud source et sa réception au nœud de destination	1 ms par voie hertzienne
Mobilité	Vitesse reliée entre un récepteur et un émetteur dans des conditions de performance données	500 km/h
Densité de connexion	Nombre total de périphériques connectés par unité de surface	10^6 / km ²
Rendement énergétique	Quantité de bits qui peuvent être transmis par joule d'énergie	100 fois comparé avec IMT – Avancé
Efficacité du spectre	Débits de données par unité de ressource spectrale par cellule (ou par unité de surface).	3–5 fois comparé avec IMT – Avancé

Tableau 1.2. Capacités et valeurs clés 5G de l'UIT-R [9].

Dans ce cadre, on cite ci-dessous certains domaines d'applications :

1. **Santé** : comporte de nombreuses améliorations mineures apportées au complexe, notamment la surveillance des exercices, les capteurs de santé grand public, la connectivité sans fil dans les hôpitaux, la surveillance des patients, la télémédecine et la chirurgie à distance [10].
2. **Agriculture** : Le progrès dans ce domaine consiste à employer des capteurs et des actionneurs, par exemple pour déterminer la quantité de sol, la température et le vent afin de superviser la progression des cultures.
3. **Véhicules** : Ce champ a été développé par le biais de la communication intelligente sans fil, notamment sur les routes ordinaires, ce qui assure la correspondance entre les routes et les accidents.



	Aujourd'hui	Transition vers la 5G	Avec la 5G
 Réseau de radio-communication mobile à large bande	Internet, audio et vidéo partout	Outils supplémentaires	Expériences réelles avec 4K, AR (réalité augmentée) et VR (réalité virtuelle)
 Mobilité, transport et logistique	Informations à la demande	Informations en temps réel, mise en réseau des véhicules	Commande autonome
 Sécurité publique	Communication de données	Transmission des plans de bâtiments, photos et vidéos	Analyse en temps réelle de vidéos en haute définition, drones
 Production	Automatisation des processus	Surveillance à distance	Télécommande et commande de robot depuis le nuage
 Energie	Appareils de mesure et réseau électrique intelligent	Gestion des ressources et automatisation	Intelligence des machines et contrôle en temps réel
 Santé	Mise en réseau des médecins et des patients	Soins en ligne: Surveillance et administration de médicaments	Opérations à distance

Figure 1.3. Évolution des applications de la 4G vers la 5G.

1.6.2. Domaines d'utilisation

Les domaines concernés comprennent trois grands types répartis par l'UIT-R, détaillés ci-après :

a. Large bande mobile améliorée (EMBB : Enhanced Mobile Broadband)

Le but recherché consiste à pouvoir faire face à la forte augmentation de l'utilisation du haut débit mobile pour des applications de vidéo 3D, de vidéo HD et de télé-réalité virtuelle, en vue d'améliorer les performances et de desservir une zone d'utilisateurs dense où les exigences de transmission sont faibles et la densité de trafic très élevée.

b. Communications massives de type machine (MMTC : Massive Machine Type Communications)

Cette technologie se distingue par une latence très faible, une grande fiabilité et une transmission plus rapide des services du réseau, ce qui offre la capacité de gérer un nombre très important de connexions telles que les échanges d'informations entre les participants au trafic par le biais de la transmission de véhicule à véhicule ou de véhicule à personne afin d'assurer la sécurité du trafic, ou encore les applications destinées aux villes intelligentes, à l'agriculture intelligente et à la surveillance à distance du réseau de capteurs pour la gestion de divers services.

c. Communications ultra-fiables et à faible temps de latence (URLLC : Ultra-reliable and low –latency communications)

Cette application est caractérisée par une latence faible où la fiabilité et le temps de réponse sont importants, pour les applications orientées dans cette catégorie est la voiture mobile, les services d'urgence et de sécurité sont également concernés, et par conséquent la transmission doit être aussi rapide que possible [10].

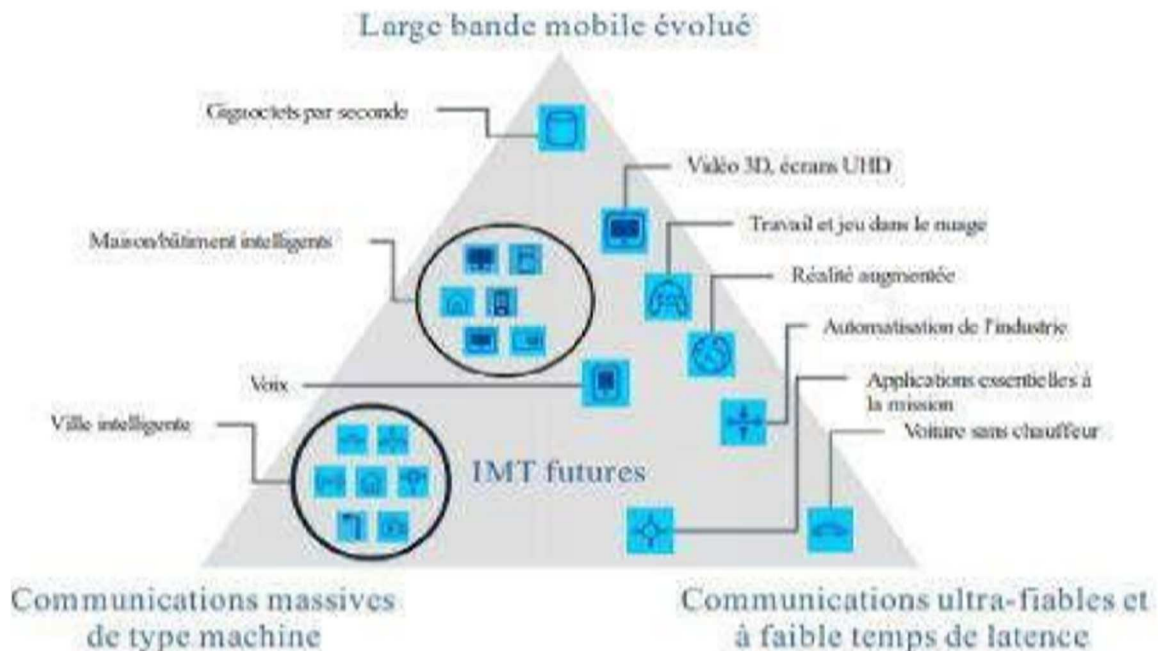


Figure 1.4. Scénarios d'utilisation des IMT pour 2020 et au-delà.

1.7. Service innovant

En fonction des capacités de l'infrastructure 5G, les services de celle-ci seront en mesure de garantir des expériences fiables aux utilisateurs, en plus de la bande passante suffisante offerte par cette technologie, ce qui permet de faciliter l'émergence de services pour les périphériques de contrôle à distance et l'Internet des objets (IoT).

1.7.1. Objets connectés

Se distingue par la communication entre les objets et les personnes, en raison de sa diversité, comme le réseau électrique intelligent, les villes intelligentes, l'agriculture intelligente, le réseau énergétique intelligent et la vidéo-surveillance, qui permettent à des centaines de milliards de périphériques différents de se connecter sur un réseau qui constitue un Internet réel et efficace pour toutes choses [9].

1.7.2. MIMO massive

Il s'agit de la mise en œuvre d'antennes multiples à une échelle massive [11]. Cette technologie se caractérise par un nombre important d'antennes intelligentes, dans le but d'obtenir des gains de multiplexage élevés et une grande capacité de canal.

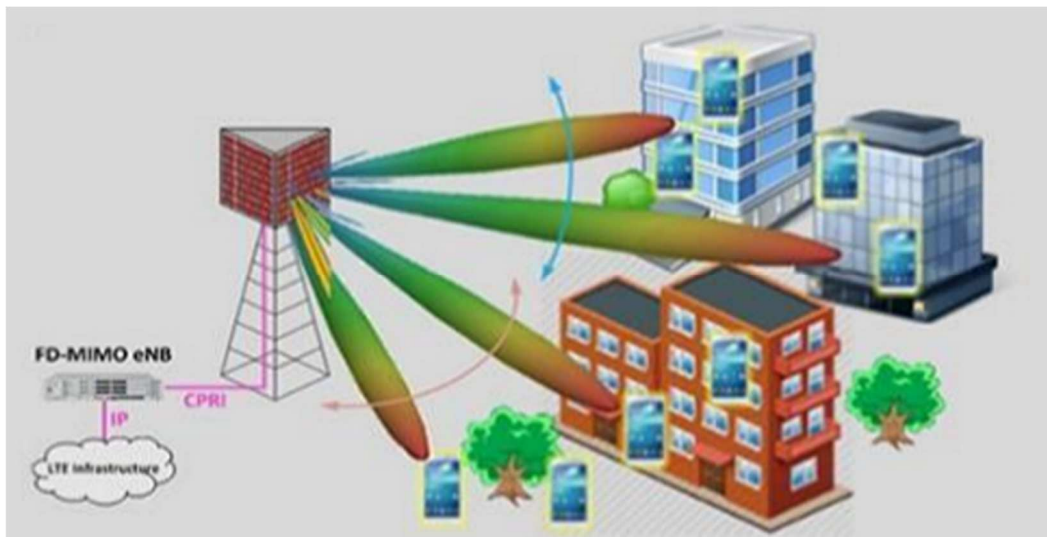


Figure 1.5. MIMO massive.

Les avantages de la technologie MIMO massive sont les suivants :

- Il peut améliorer l'efficacité énergétique d'un ordre de 100 fois et augmenter la capacité du système de dix fois ou plus ;

- Il est possible de concevoir des composants caractérisés par un faible coût et une faible consommation d'énergie pour les systèmes de MIMO massive ;
- MIMO massive permet en effet de réduire significativement la latence sur l'interface air ;
- MIMO massive à accès simple et multiple.

1.7.3. Radiocommunications

Les radiocommunications permettent une entrée efficace dans le même spectre et un schéma de transmission correct. Les exigences pour ce type de technologies sont la gestion des ressources radio effectuée par la distribution et dépendent de la radio logicielle [12,13].

a. Bandes millimétrique

Les ondes millimétriques [14] représentent les ondes radio qui ont été employées pour la couverture des réseaux qui comprennent des fréquences de 30 à 300 avec des longueurs d'onde dans la gamme millimétrique (1 à 10 mm) et sont prévues pour être exploitées dans les communications à longue portée, y compris la transmission de données à grande vitesse, l'imagerie radar, la sécurité de l'inspection et l'identification des matériaux ainsi que beaucoup plus [15]. Elles présentent les avantages suivants :

- Elles offrent des rendements et des paiements élevés, ce qui réduit le risque d'atténuation ;
- Débit de données élevé ;
- Elles réduisent la latence, notamment entre les périphériques.

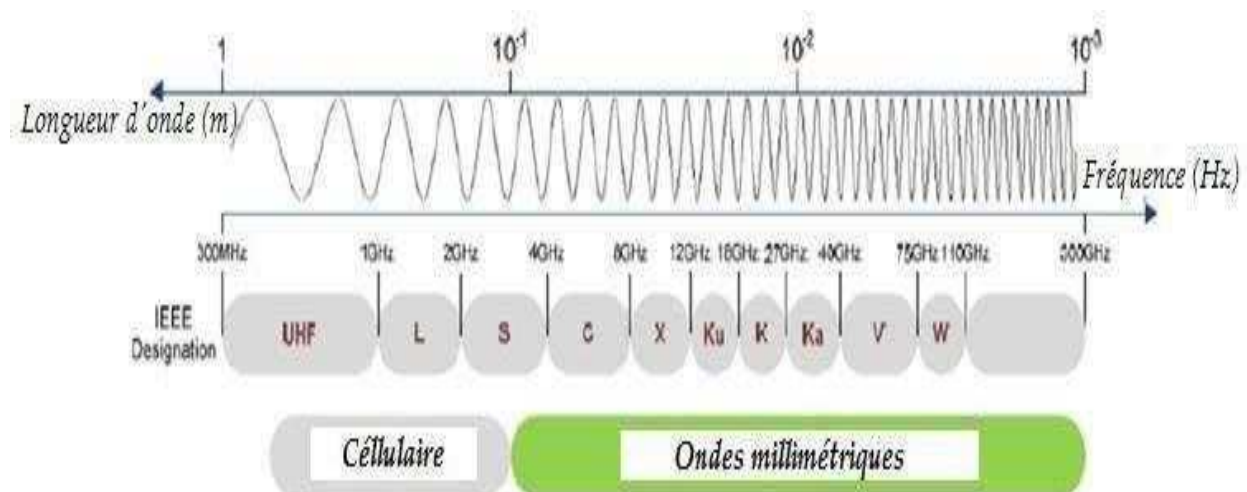


Figure 1.6. Micro-ondes et spectre de fréquences ondes millimétriques.

b. Méthodes duplex

Le full duplex [16] offre la possibilité de multiplier par deux la capacité des réseaux sans fil et se caractérise par une liaison série qui permet de réceptionner et d'émettre des données en même temps [17]. Il présente plusieurs avantages :

- Amélioration de la coordination des interférences ;
- Nouvelles solutions de relais ;
- Efficacité du spectre ;
- Filtrage.

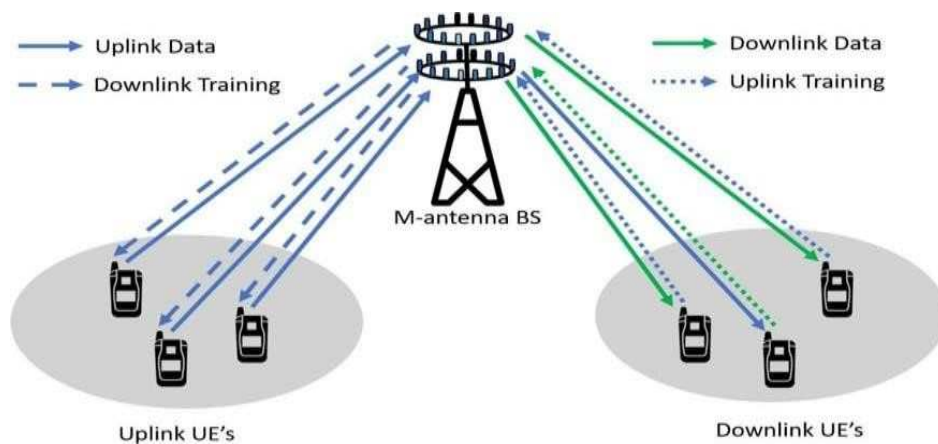


Figure 1.7. Technologie full-duplex [18].

c. Petites cellules

Les petites cellules constituent une partie essentielle des réseaux hétérogènes [7] qui contiennent au moins 10 petites cellules pour chaque grand site. La réduction du nombre de cellules et la réutilisation du spectre permettent d'augmenter fortement la capacité totale du réseau [19].

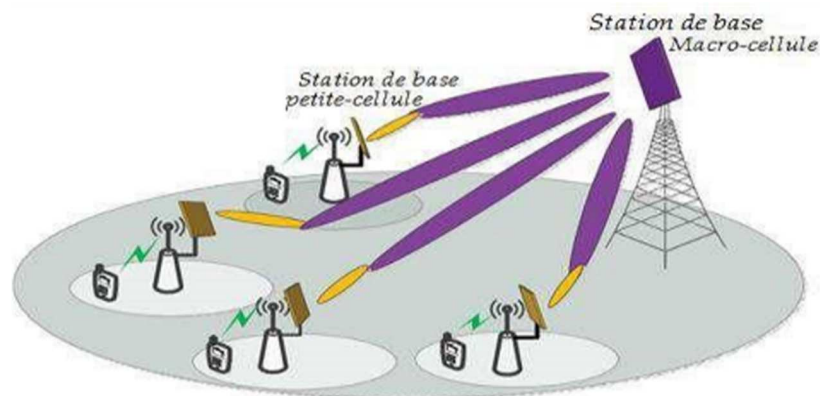


Figure 1.8. Petites cellules.

1.8. Fréquences utilisées pour la 5G

La 5G à faible bande passante fonctionne sur des fréquences inférieures à 2 GHz, on la considère comme l'une des plus anciennes fréquences, elle est légèrement lente et similaire à la 4G [20], mais elle garantit une bonne couverture car elle présente de bonnes conditions de propagation. En effet, la technologie 5G à bande moyenne comporte des fréquences allant de 2 à 10 GHz et couvre la plupart des fréquences cellulaires et wifi actuelles [20]. Par ailleurs, la technologie 5G exploite une large bande passante sur huit canaux avec une fréquence de 100 GHz. En outre, les ondes millimétriques n'ont jamais été exploitées auparavant pour des applications grand public ; il s'agit d'ondes réelles comprises entre 20 et 100 GHz [20].

1.8.1. Rôle des IMT pour 2020 (5e génération) et au-delà

La recommandation ITUR-M-2083-0 décrit en détail le cadre du développement futur des IMT à l'horizon 2020 et au-delà. Les systèmes IMT doivent donc continuer de contribuer à :

a. Un nouveau marché pour les technologies de l'information et de la communication

Il est probable que le développement des futurs systèmes d'IMT favorisera la création d'une industrie intégrée des TIC. On peut citer, parmi les cas possibles : la mise à disposition de services de réseaux personnalisés pour les entreprises et les institutions, la collecte et l'analyse de réseaux pour les entreprises et les institutions, la collecte et l'analyse de méga-données et de groupes de réseaux sociaux sur les réseaux sans fil [21].

b. Comblent la fracture numérique

Il aidera à combler les lacunes dues à la croissance de la fracture numérique et peut soutenir des systèmes de communication mobile faciles à déployer et durables, afin d'atteindre l'objectif, tout en développant l'énergie et en assurant une efficacité maximale [21].

c. Nouvelles méthodes de communication

L'IMT améliorera la capacité de partager tout type de contenu à tout moment, en tout lieu et sur tout périphérique, et les utilisateurs pourront partager davantage de contenu sans être limités par le temps et le lieu [21].

d. Nouvelles formes d'éducation

L'IMT peut modifier les méthodes d'enseignement en facilitant l'accès aux ouvrages numériques ou au stockage des connaissances dans les nuages sur l'internet, ce qui contribue aux applications d'apprentissage en ligne [21].

e. Améliorer l'efficacité énergétique

L'IMT peut modifier les méthodes d'enseignement en facilitant l'accès aux ouvrages numériques ou au stockage des connaissances dans les nuages sur l'internet, ce qui contribue aux applications d'apprentissage en ligne [21].

f. Changements sociaux

Le réseau à large bande permet la formation et l'échange rapides d'opinions publiques sur une problématique sociale ou politique via le service de réseaux sociaux, et la formation d'opinions. Un grand nombre de personnes connectées grâce à leur capacité à échanger des informations à tout moment et en tout lieu constitue un important moteur de changement social [21].

g. Nouvel art et culture

L'IMT appuiera à la fois les créateurs et les supporters dans la création d'œuvres d'art ou, d'autre part, la participation à des spectacles ou à des activités de groupe ou de co-création, et les personnes connectées dans le monde virtuel peut former de nouveaux types de communautés et créer leur propre culture [21].

1.9. Conclusion

Les technologies de cinquième génération offrent aux utilisateurs une expérience efficace en proposant des applications et des services à large bande à haut débit, avec des améliorations notables en matière de fiabilité et une réduction considérable de la latence à moins de 1 ms. Cette technologie offre la possibilité de mettre en œuvre des réseaux filaires et sans fil convergents et devrait être à la tête du déploiement de la technologie de cinquième génération après 2020, et la GSMA estime que les connexions de la technologie de cinquième génération devraient atteindre 1,1 milliard de personnes, soit environ 12 % du total des connexions mobiles en 2025.

CHAPITRE 2

Technologies 60 GHz, Propagation du signal et Modèle de mobilité

2.1. Introduction

Au fil de l'évolution technologique, les ondes radio pourront être exploitées comme support d'information par un nombre croissant de services. Alors que les clients souhaitent des débits de données plus élevés et des équipements de plus petite taille, la bande de fréquences des ondes millimétriques apparaît comme une bonne solution. La bande des 60 GHz a fait l'objet d'un intérêt tout particulier. Du fait de l'absorption d'oxygène à 60 GHz, cette bande offre de faibles distances de réutilisation des fréquences, ce qui la rend spécialement intéressante pour les réseaux locaux radio et pour les systèmes micro-cellulaires à haute capacité. En effet, la réglementation initiale de la bande 60 GHz imposait une largeur de bande minimale de 7 GHz sans licence au sein de la bande [59 à 66] GHz pour des applications à courte distance. Le fait que la largeur de bande sans licence (ou ISM) de 7 GHz soit accessible dans le monde entier a entraîné de nouvelles activités de recherche internationales. Des groupes de travail sur les normes internationales relatives aux réseaux personnels sans fil (ou WPAN) à 6 GHz ont été créés. Au mois de juillet 2003, l'IEEE a créé la norme 802.15.3 pour aborder les radiocommunications à 60 GHz, et au cours de la même année, le groupe IEEE 802.15.3c a été constitué pour définir les exigences techniques initiales des systèmes sans fil multi-Gigabit [22,23].

Suite à cette introduction, on va présenter brièvement les technologies sans fil autour de la fréquence 60 GHz et leur apport en faisant une comparaison avec les autres technologies existantes. Puis, on présentera les caractéristiques d'un canal de propagation. Enfin, une présentation des modèles de mobilité dans les réseaux locaux sans fil clôturera ce chapitre.

2.2 Technologies 60 GHz appliquées aux réseaux sans fil

Les télécommunications sans fil se sont bien développées depuis la première manifestation transatlantique de transmission par radio réalisée par Marconi entre l'Angleterre et le Canada en 1901. Au tout début, elles étaient principalement exploitées par l'armée et les compagnies maritimes. Plus tard, elles ont été facilement adaptées à un usage commercial, notamment pour les services de radiodiffusion (AM, FM et télévision terrestre), les services de téléphonie cellulaire, la localisation GPS et les réseaux locaux et personnels sans fil (WLAN et WPAN).

Les systèmes de communication sans fil sont désormais des éléments indispensables de notre environnement quotidien, et ils évoluent régulièrement pour améliorer la qualité de vie des clients. On compte parmi les dernières technologies sans fil les "ondes millimétriques". Il est important de se référer à la technologie des ondes. En effet, les ondes millimétriques existent depuis plusieurs décennies, mais elles ont été principalement développées pour des applications militaires.

Lors de ces dix dernières années, le développement d'une technologie de communication fortement intégrée et à très faible coût a fait de la technologie des ondes millimétriques une technologie très attrayante pour de nombreux clients, les applications sont diverses dans les universités et l'industrie. En général, cette technologie est considérée comme étant un élément de la recherche et du développement du spectre. Les ondes électromagnétiques entre 30 et 300 GHz correspondent à une longueur d'onde de 10 mm à 1 mm, comme le montre la Figure 2.1. Dans le présent projet, l'accent sera mis sur la bande de fréquences radio de 60 GHz [24,25].

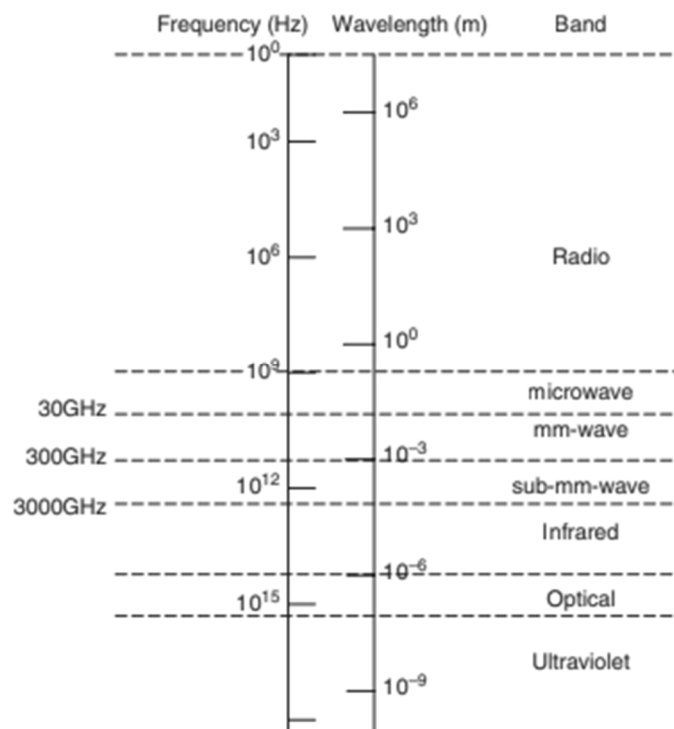


Figure 2.1. Spectre électromagnétique [24].

2.3. Equipements qui intègrent le 60 GHz

La société TP Link a en effet annoncé en 2017 la sortie du premier routeur WiFi tri-bande 2,4/5/60 GHz, à savoir le TP Link Talon AD7200 (voir la Figure 2.2). Par ailleurs, ce produit fait partie des premiers routeurs à incorporer la technologie IEEE 802.11ad. Cette dernière permet d'atteindre des vitesses de 4,6 Gbit/s, soit 4 fois plus rapidement que les routeurs les plus performants utilisant la norme IEEE 802.11ac. Le routeur Talon AD7200 est également doté d'une interface 802.11ac afin que les périphériques actuels puissent continuer à s'y connecter. De plus, il possède toutes les fonctionnalités modernes des routeurs haut de gamme [26].



Figure 2.2. Routeur Talon AD7200 opérant à 2.4/5/60 GHz [26].

En outre, la perte de trajet élevée à la fréquence de 60 GHz autorise la réutilisation de fréquences plus hautes dans tout environnement intérieur, ce qui donne lieu à un réseau à très haut débit. La petite taille de la radio 60 GHz offre également la possibilité d'installer plusieurs antennes au niveau du terminal de l'utilisateur, ce qui est généralement difficile, sinon impossible, à des fréquences inférieures. Comparativement aux systèmes 5 GHz, les systèmes 60 GHz ont un facteur de forme près de 140 fois plus petit et sont donc facilement intégrables dans les produits électroniques grand public. En dépit des divers avantages offerts, les télécommunications à 60 GHz présentent un certain nombre de problèmes critiques qui doivent être résolus. La Figure 2.3 montre les débits de données et les exigences de portée de différents systèmes WLAN et WPAN [24,27-29].

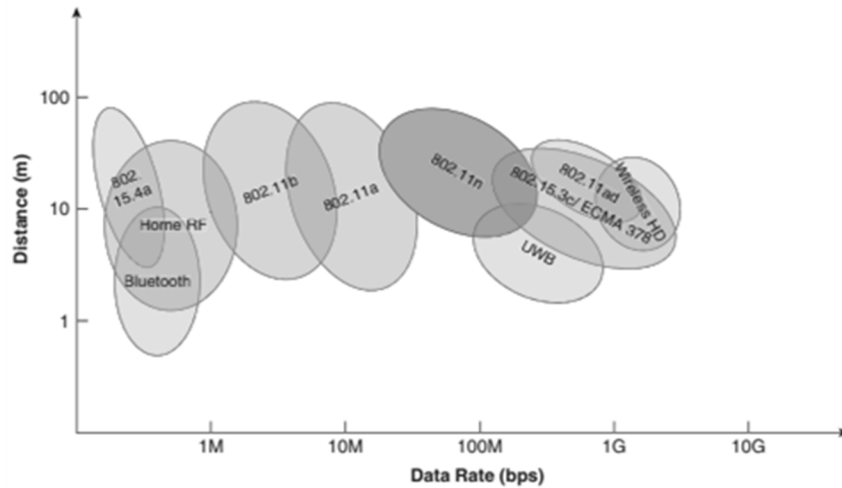


Figure 2.3. Débit dépendant de la portée pour les normes WLAN et WPAN [24].

2.4. Réglementation et attribution des fréquences

Cette partie présente la situation actuelle de la réglementation et de la normalisation mondiales pour la bande des 60 GHz. Les instances réglementaires des États-Unis, du Japon, du Canada et de l'Australie ont déjà établi des bandes de fréquences et des réglementations pour le service à 60 GHz, alors qu'en Corée et en Europe, des efforts notables sont en cours. Toutefois, le tableau 1.3 récapitule les attributions de fréquences accordées et proposées et les principales spécifications des réglementations radio dans un certain nombre de pays. Il convient de noter que, bien qu'une puissance d'émission maximale de 27 dBm soit autorisée aux États-Unis, la puissance d'émission réelle peut être limitée par la capacité des amplificateurs de puissance (ou PA), notamment dans le cas d'antennes simples. En règle générale, la sortie maximale du PA de 60 GHz ne peut dépasser environ 10 dBm [24].

Région	Bande-passante sans-licence (GHz)	Puissance de transmission (dBm)	PIRE (dBm)	Gain d'antenne maximum (dBi)
USA/Canada	7	27 (max)	40 (moy) 43 (max)	33 (max) si la P_{Tx} est de 10 dBm
Japon	7	10 (max)	58 (max)	47
Corée	7	10 (max)	27 (max)	17
Australie	3.5	10 (max)	51.7 (max)	41.8
Europe	9	13.01 (max)	57	30

Tableau 2.1. Plan des bandes de fréquences et les limites sur la puissance d'émission, la PIRE et le gain d'antenne pour différents pays [24].

2.4.1. Amérique du Nord

En 2001, la FCC a attribué 7 GHz à la bande [54 à 66] GHz pour une utilisation sans licence. Concernant les limites de puissance, les réglementations de la FCC autorisent la transmission avec une densité de puissance moyenne de $9 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ à 3 mètres et une densité de puissance maximale de $18 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ à 3 mètres de la source rayonnante. À ces valeurs correspondent une PIRE moyenne et maximale de 40 dBm et 43 dBm, respectivement. En plus, la FCC a précisé une puissance de transmission totale maximale de 500 mW pour une bande passante de transmission de plus de 100 MHz. Il convient de noter que la puissance de transmission maximale est limitée à 10 dBm après prise en compte des questions de sécurité RF. Deuxièmement, chaque transmetteur doit communiquer l'identification de l'émetteur au moins une fois, dans un délai de 1 seconde après la transmission du signal. Il faut savoir que la réglementation de la bande des 60 GHz au Canada, appliquée par Industrie Canada, Gestion du spectre et télécommunications (ou IC-SMT), est conforme à celle des États-Unis [24,30,31].

2.4.2. Japon

En 2000, au Japon, le Ministère de la gestion publique, des affaires intérieures, des postes et des télécommunications (ou MPHPT) a publié un règlement sur les radiocommunications dans la bande des 60 GHz permettant une exploitation sans licence dans la bande des [59 à 66] GHz. La gamme [54,25 à 59] GHz est attribuée pour une consommation sous licence. Pour une application sans licence, la puissance de transmission maximale est limitée à 10 dBm et le gain d'antenne maximal permis est de 47 dBi. À la différence de l'Amérique du Nord, la réglementation japonaise exige que la bande passante maximale de transmission ne dépasse pas 2,5 GHz. Il n'y a pas de spécifications concernant l'exposition aux rayonnements RF et les exigences en matière d'identification des émetteurs [24,32-34]. Pour de la documentation supplémentaire et les dernières mises à jour de la réglementation japonaise, veuillez-vous référer à [35].

2.4.3. Australie

Après la publication des réglementations au Japon et en Amérique du Nord, les autorités australiennes des communications et des médias (ou ACMA) ont procédé à des démarches semblables afin de réglementer la bande des 60 GHz en 2005. En revanche, seule la largeur de bande de 3,5 GHz dans [59,4 à 62,9] GHz est allouée à une utilisation sans licence. Les puissances d'émission et PIRE maximales sont respectivement

limitées à 10 dBm et 51,7 dBm. Les transmetteurs de communication de données opérant dans cette bande de fréquences ne peuvent être déployés que sur terre ou en mer [24,36]. Pour davantage d'informations et les dernières mises à jour réglementaires en Australie, veuillez consulter la référence [37].

2.4.4. Corée

Le groupe d'étude des fréquences d'ondes millimétriques (ou MFSG) a été formé en juin 2005 sous les auspices de l'Association coréenne de promotion de la radio. Le MFSG a recommandé un spectre sans licence de 7 GHz dans [57 à 64] GHz sans aucune limitation sur les types d'applications à exploiter. En ce qui concerne les applications intérieures, la puissance d'émission maximale est de 10 dBm, conformément à ce qui se fait au Japon et en Australie, et le gain d'antenne maximal admissible est de 17 dBi. Concernant les applications extérieures, la puissance d'émission est limitée à -20 dBm et 10 dBm pour les bandes de fréquences [57 à 58] GHz et [58 à 64] GHz, respectivement, tandis que le gain d'antenne maximal est de 47 dBi. Tout dispositif qui exploite des fréquences dans la bande [57 à 64] GHz doit en outre transmettre lui-même le code d'identification du transmetteur, afin de permettre aux autres dispositifs de détecter pleinement les pannes et de s'en protéger, à une exception près : tout système fixe point à point [24,38,39]. Pour un complément d'information et les dernières mises à jour de la réglementation coréenne, veuillez-vous reporter à [40].

2.4.5. Europe

L'Institut européen des normes de télécommunications (ETSI) et la Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications (CEPT) ont collaboré étroitement en vue d'établir un cadre juridique permettant le déploiement de dispositifs sans licence à 60 GHz. En règle générale, la bande [59 à 66] GHz a été affectée aux services mobiles sans décision réglementaire spécifique. La recommandation T/R 22-03 de la CEPT a temporairement attribué la bande [54,25 à 66] GHz aux systèmes mobiles et fixes terrestres. En 2004, le Comité européen des radiocommunications (ou ERC) a considéré l'utilisation de la bande [57 à 59] GHz pour les services fixes sans planification des fréquences. Par la suite, le Comité des communications électroniques (ECC) de la CEPT a recommandé l'utilisation de services fixes point à point dans la bande [64 à 66] GHz. Dans un deuxième temps, l'ETSI a suggéré à l'ECC de considérer la réglementation à 60 GHz pour les applications WPAN. Dans le cadre de cette

proposition, 9 GHz de spectre sans licence sont attribués pour une exploitation à 60 GHz. Cette bande correspond à l'union des bandes actuellement approuvées et proposées par les principaux pays, comme le montre la Figure 2.4. En outre, un spectre minimal de 500 MHz est nécessaire pour le signal transmis avec une PIRE maximale de 57 dBm. Aucune spécification relative à la puissance d'émission maximale et au gain d'antenne maximal n'est donnée.

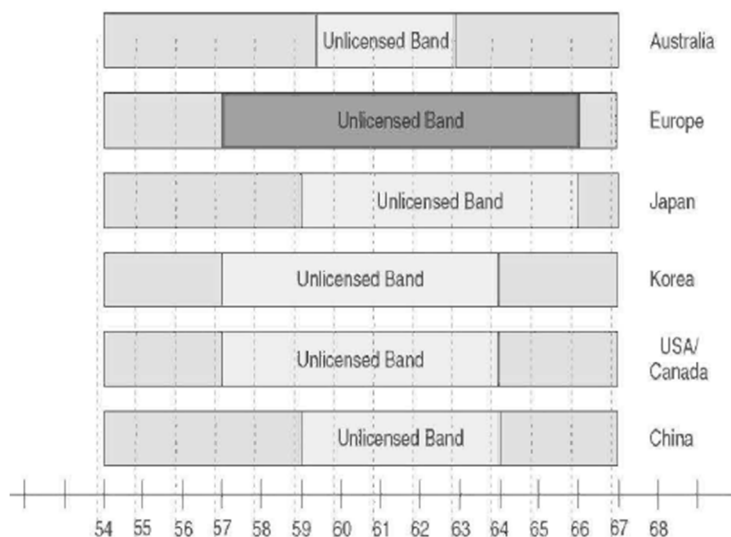


Figure 2.4. Attribution et exploitation des fréquences mondiales de la bande passante de 60 GHz [24].

Pour les applications extérieures, la CEPT a recommandé en octobre 2009 une PIRE maximale de 25 dBm avec une densité spectrale de puissance maximale de -2 dBm/MHz, sachant qu'une installation extérieure fixe n'est pas autorisée. En ce qui concerne les applications intérieures, une PIRE maximale de 40 dBm avec une densité spectrale de puissance maximale de 13 dBm/MHz est spécifiée. Il est difficile de savoir quand la réglementation finale entrera en vigueur, mais la plupart des tendances actuelles semblent encourageantes pour la mise en œuvre de la technologie 60 GHz [24,41-45]. Pour obtenir des informations complémentaires et connaître les dernières mises à jour de la réglementation en Europe, reportez-vous à [46].

2.5. Caractérisation du canal de propagation

Au sein des systèmes de communication sans fil, les informations sont émises à l'aide d'une onde électromagnétique se propageant entre l'émetteur et le récepteur. Il y a des

types de mécanismes qui contrôlent l'effet de l'onde avec le milieu qui provoque des trajets multiples, tels que la diffusion et la réflexion, la diffraction, la Figure 2.5 suivante illustre ce phénomène :

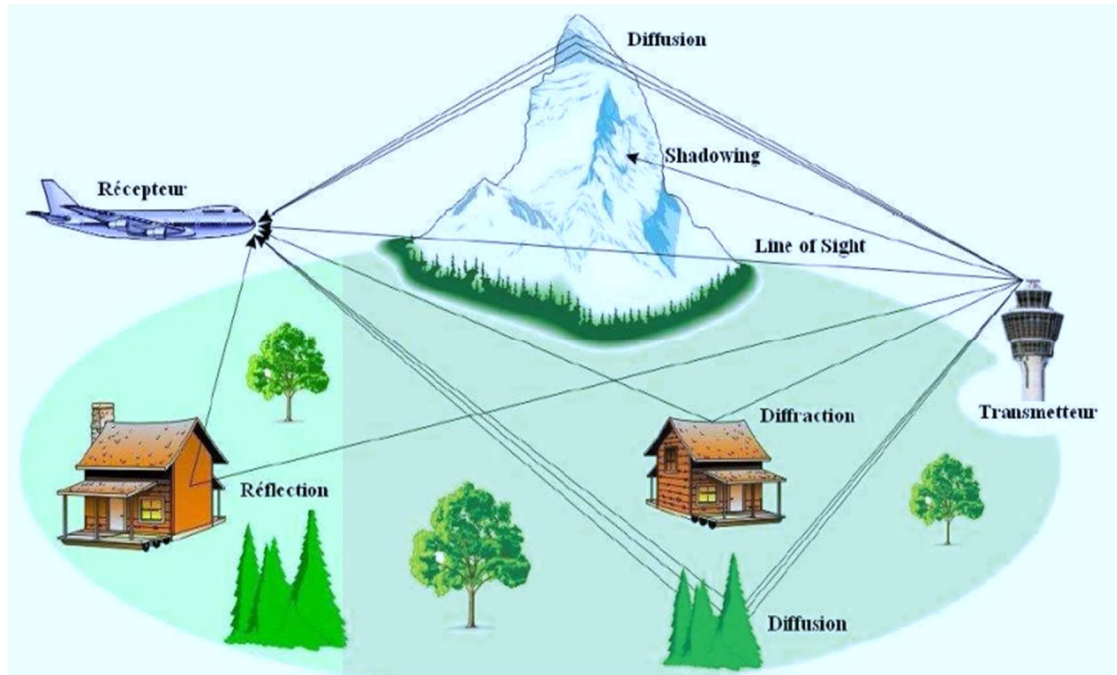


Figure 2.5. Les différents mécanismes de propagation.

2.6. Modèle de propagation

2.6.1. Propagation en espace libre

Avant de présenter en détail la notion d'espace libre, il convient de définir ce qu'est un canal de propagation. En transmission par micro-ondes, le signal $e(t)$ émis par l'antenne émettrice est propagé à travers le milieu de transmission, il passe à travers les ondes électromagnétiques et est ensuite reçu par l'antenne réceptrice. Au cours de la transmission, le signal $e(t)$ se transforme en signal $s(t)$. À cause des interférences et des changements causés par le support de transmission, les ondes électriques sont affectées. En conséquence, l'espace où cette transition se produit est appelé "canal de propagation", comme illustré à la Figure 2.6.

Il arrive que l'on mélange "canal de propagation" et "canal de transmission", ce dernier comportant plus d'antennes que le précédent. On parle alors de schéma de propagation, ce qui consiste à visualiser l'évolution. Dans un environnement donné, la

puissance de la transmission entre un émetteur et un récepteur est basée sur la distance entre les deux éléments.

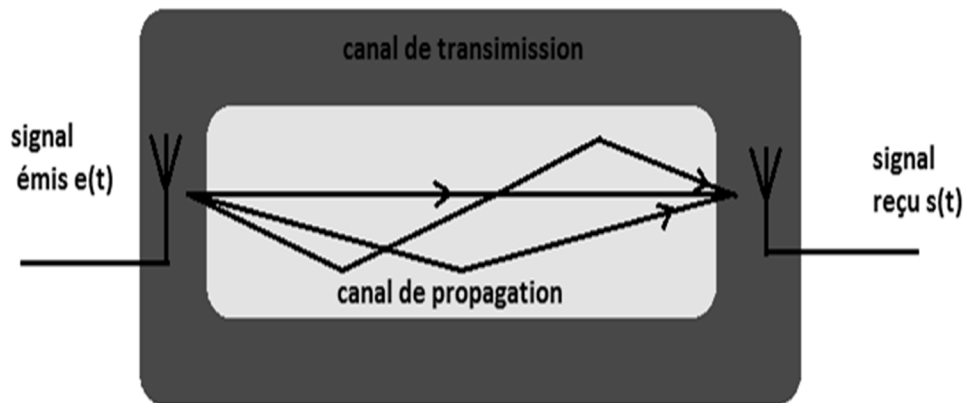


Figure 2.6. Représentation d'un canal de propagation.

Il est indispensable que le support soit libre, autrement dit que l'espace entre les deux antennes soit " libre ", ce qui signifie qu'aucun objet ou corps étranger n'interfère avec la transmission du signal direct entre les deux antennes [47].

Pour déterminer que la zone située entre les deux antennes doit être " libre ", le concept de l'espace libre fait appel à la première zone de Fresnel, comme le montre la Figure 2.7.

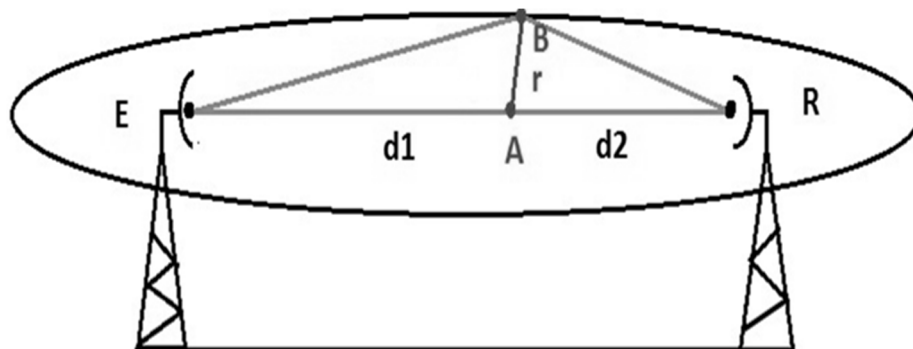


Figure 2.7. Ellipsoïde de Fresnel.

Sur la Figure 2.7, on peut voir deux antennes E et R qui sont écartées d'une distance $d_1 + d_2$. Ensuite, la formule mathématique permettant de déterminer le rayon r (ou $[AB]$) du premier ellipsoïde de Fresnel. La notation et les paramètres employés proviennent de ceux de la Figure 2.7.

$$BE + BR = ER + \frac{\lambda}{2} \rightarrow \Delta d = \frac{\lambda}{2} \text{ et } \Delta\varphi = \pi \quad (2.1)$$

$$\sqrt{d_1^2 + r^2} = \sqrt{d_2^2 + r^2} = d_1 + d_2 + \frac{\lambda}{2} \quad (2.2)$$

$$r = \sqrt{\lambda \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.3)$$

Si la zone ne comporte aucun objet étranger de rayon r , l'espace en question est considéré comme "libre" et le modèle de propagation peut être appliqué pour répondre aux exigences. Grâce à ce modèle, la puissance reçue peut être simplement évaluée à l'aide de la formule FRIIS, également connue sous le nom d'équation des télécommunications :

$$Pr(d) = \frac{Pt \cdot Gt \cdot Gr \cdot \lambda^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot d^2} \quad (2.4)$$

Où

Pr : Elle correspond à la puissance reçue par l'antenne de réception en fonction de la distance (d) entre les deux antennes ;

Pt : représente la puissance émise ;

Gt : désigne le gain de l'antenne d'émission ;

Gr : désigne celui de l'antenne de réception.

Les gains sont calculés selon la formule suivante :

$$G = \frac{4\pi}{\varepsilon^2} \quad (2.5)$$

ε : est la surface intérieure par laquelle l'antenne réceptrice est capable de capter l'onde émise.

λ : correspond à la longueur d'onde du signal transmis.

En revanche, la propagation dans un environnement libre n'est qu'un idéal théorique. En conséquence, les transmissions exécutées dans la pratique peuvent être perturbées par des interférences multiples causées par tous les facteurs existant dans l'environnement réel. Ainsi, la trajectoire du signal peut subir une variation et une multiplication de sa trajectoire. La notion de trajectoire multiple sera abordée prochainement [48].

2.6.2. Trajets multiples

Il est impossible d'appliquer en pratique le modèle de propagation en milieu libre présenté ci-dessus. En effet, quand un signal radio est transmis, il peut emprunter plusieurs chemins de propagation (voir la Figure 2.8), le principal de ces chemins étant celui où le chemin direct envoie le plus d'énergie. Selon l'environnement, l'impact sur les ondes et le nombre de chemins sont plus ou moins importants [48].

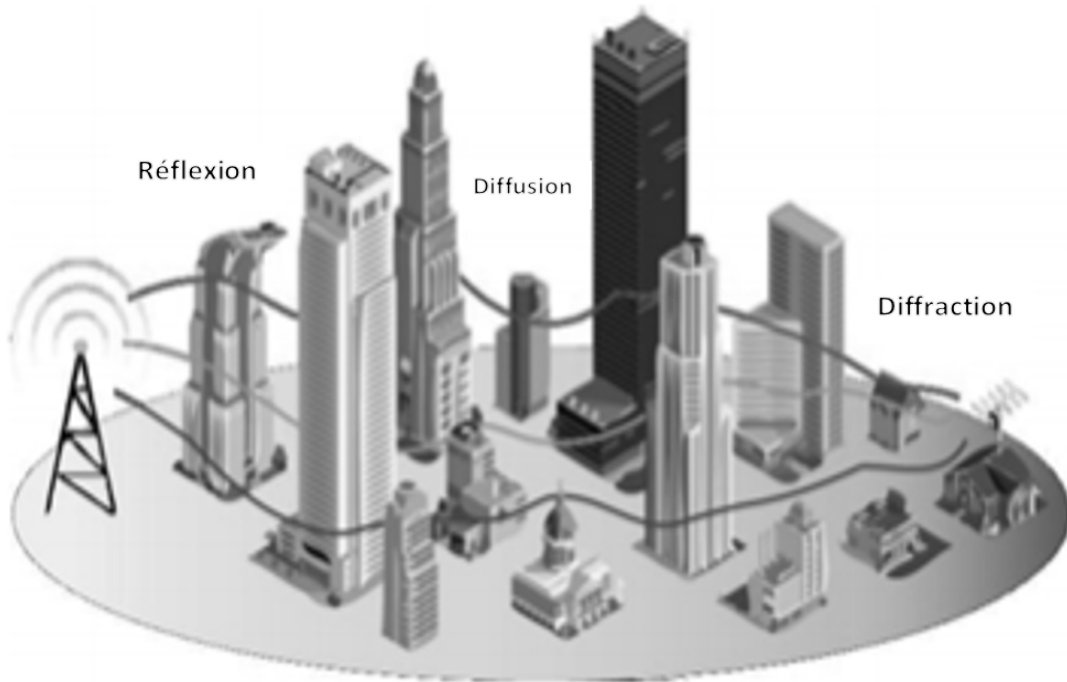


Figure 2.8. Propagation par trajets multiples dans un environnement "extérieur".

Par exemple, en prenant l'exemple d'une mine, on va voir l'aspect physique de ce mur très irrégulier ; en effet, comme on a vu précédemment, il met en évidence la réflexion de l'onde et double donc le nombre de trajets. Il existe deux types de chemins : le chemin direct ou ligne de vue (ou LOS, Line Of Sight) dont l'amplitude d'évanouissement est déterminée par la distribution de Rice (voir la Figure 2.9). Et le second chemin indirect ou sans ligne de visée (ou NLOS, None Line Of Sight). Il n'existe aucune ligne de visée entre l'émetteur et le récepteur. Dans ce cas, la densité de probabilité de l'amplitude totale de l'évanouissement du signal reçu évolue selon la loi de Rayleigh (voir la Figure 2.10) [49]. Dans le cadre de notre projet, les deux chemins sont employés afin de prédire la puissance reçue à l'utilisateur IoT-5G, à savoir : LOS et NLOS.

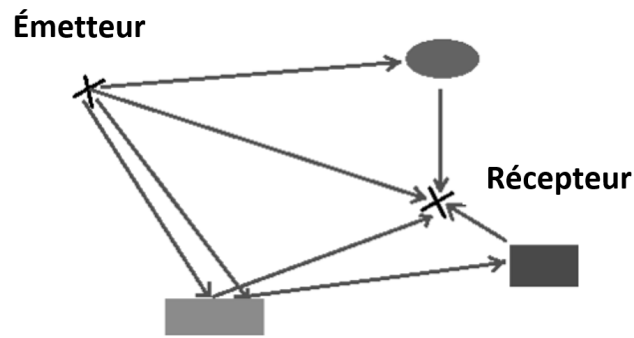


Figure 2.9. Propagation multi-trajets LOS [49].

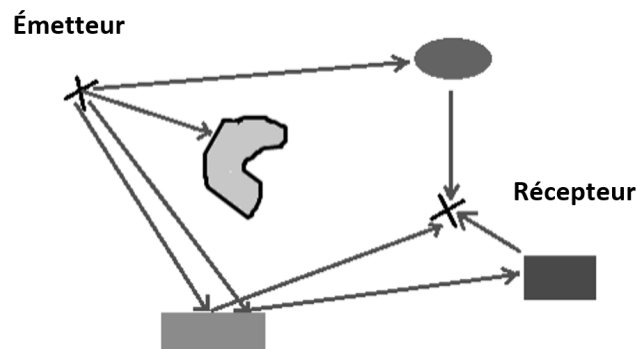


Figure 2.10. Propagation multi-trajets NLOS [49].

La Figure 2.11 donne un aperçu des différentes formes de phénomènes auxquels peuvent être soumis les signaux radio. On évoque la réflexion, la diffraction, la diffusion et les guides d'ondes que nous détaillerons plus tard [50,51].

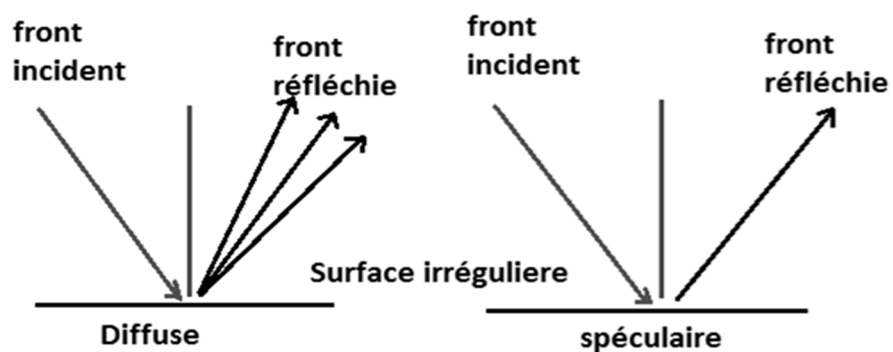


Figure 2.11. Fonctionnement des réflexions spéculaires et diffuses [52].

a. Réflexion

Tout comme dans le cas de la réflexion (voir la Figure 2.12), la réfraction se manifeste aussi lorsqu'il s'agit de grands obstacles par rapport à λ . En effet, la surface de l'obstacle

sert à séparer deux milieux aux caractéristiques électriques différentes. La réfraction fait donc référence à la transmission des ondes à travers les obstacles (murs, cloisons). En comparaison avec l'onde incidente, cela va engendrer un changement de direction de l'onde qui traverse l'obstacle et une atténuation de la puissance [48].

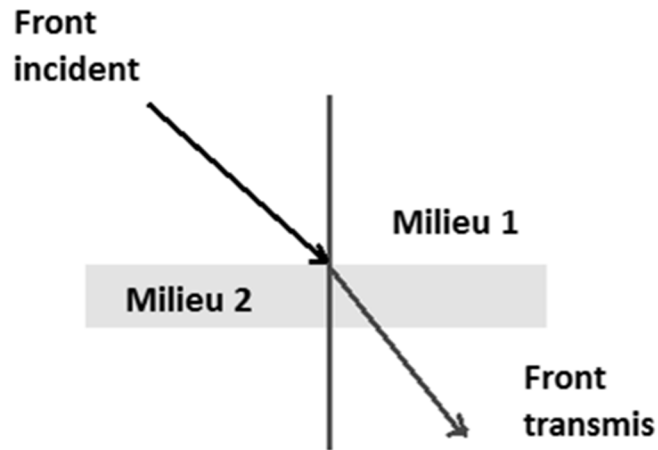


Figure 2.12. Mécanisme de réflexions ou de transmission [52].

L'onde émise est soumise à deux types de réflexions :

- **Réflexion spéculaire** : On notera que dans ce cas, cette onde incidente produira une seule onde réfléchie, si bien que cette dernière conservera toute l'énergie du signal. Toutefois, dans les faits, Il est possible qu'une partie de l'énergie soit absorbée ou diffusée à la surface de contact, un phénomène appelé transmission, on en déduit que la qualité de la réflexion est essentiellement axée sur la qualité de la surface de contact. Il est alors possible de déterminer si l'onde a été réfléchie et si la taille du défaut du miroir est inférieure à l'amplitude de la dispersion [48].
- **Réflexion diffuse** : En effet, ce type de phénomène correspond aux situations où la surface de contact possède une trop grande irrégularité, ce qui implique que la taille du défaut est beaucoup plus grande que la longueur d'onde. Dans un tel cas, l'onde incidente est réfléchie en plusieurs ondes partageant la puissance initiale [48].

b. Diffraction

Il est possible de franchir des obstacles. De fait, l'onde émise est en mesure de suivre le contour de l'obstacle puis de rétablir sa trajectoire, ce qui signifie que la direction et la

puissance d'atténuation de la trajectoire seront changées. Ces changements sont plus ou moins importants selon la nature et la taille de l'obstacle (voir la Figure 2.13) [48].

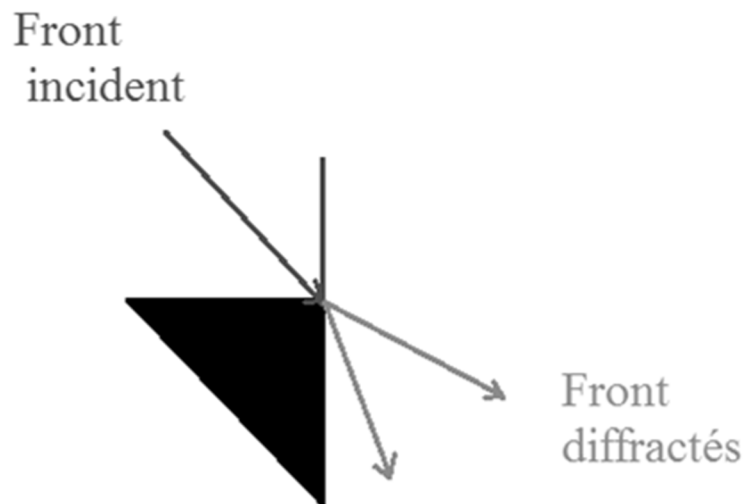


Figure 2.13. Mécanisme de diffraction [52].

c. Diffusion

Le signal transmis rencontre, comme le fait apparaître la figure 2.14, de petits obstacles (de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde) similaires à la poussière dans l'air. Le phénomène est comparable à la réflexion diffuse, mais le nombre d'ondes réfléchies est plus important ici [48].

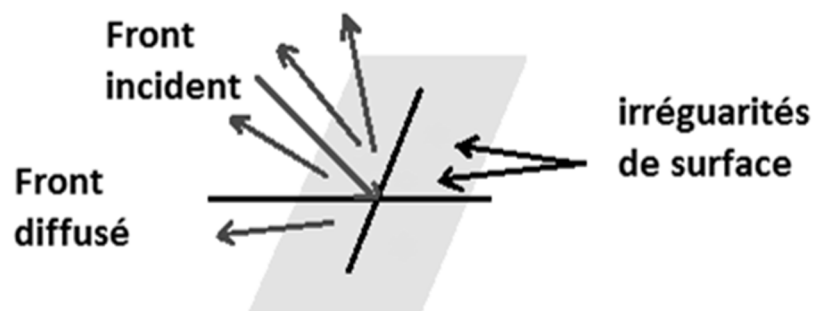


Figure 2.14. Mécanisme de diffusion [52].

d. Guidage d'ondes

On observe ce phénomène lorsque le milieu de propagation des ondes possède une surface lisse et parallèle. En suivant la surface, on constate que le signal est constamment réfléchi. En présence d'obstacles, les changements de trajectoire et de niveau de puissance ont un impact sur l'onde transmise, comme on vient de le percevoir.

Désormais, il est question d'un autre phénomène que subit un signal au cours de sa propagation appelé "fading" [48].

2.7. Évanouissements

Au cours de la propagation d'une onde dans l'air, elle croise différents obstacles le long de son chemin de propagation, ce qui entraîne des perturbations du signal. En présence de ces dernières, on observe des interruptions dans la propagation de l'onde. On appelle ce phénomène l'effet de fading. Il y a deux types d'évanouissement : l'évanouissement à petite échelle et l'évanouissement à grande échelle.

La Figure 2.15 illustre la puissance reçue en tant que fonction de la distance. Les deux courbes correspondantes de la Figure 2.15 sont respectivement l'atténuation moyenne du signal, également appelée "PathLoss", l'évanouissement à grande échelle, également appelé "Shadowing", et l'évanouissement à petite échelle [48].

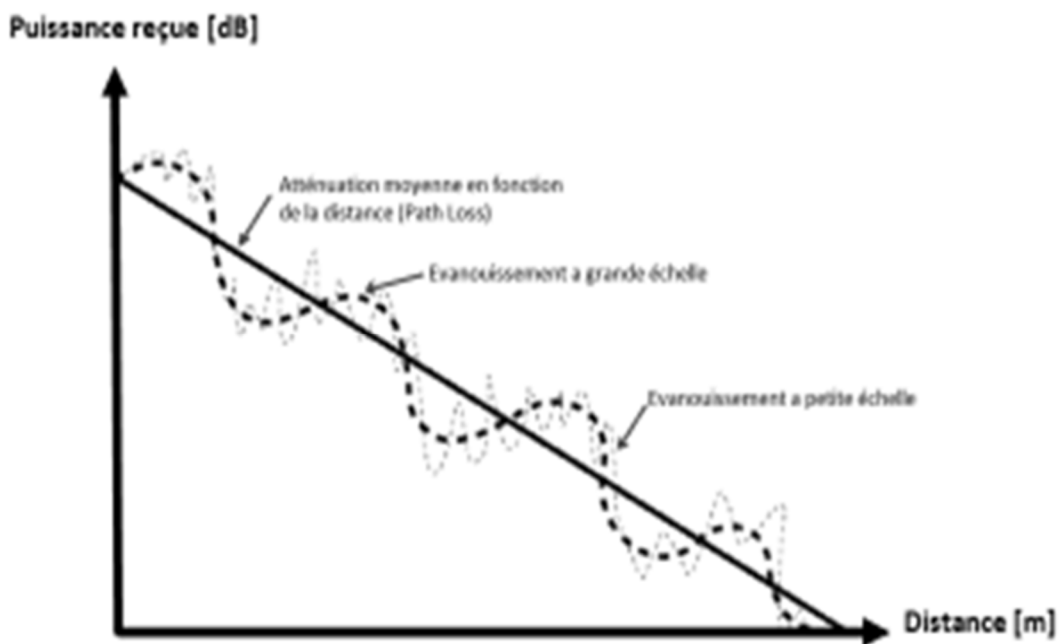


Figure 2.15. Puissance reçue [dB] vs. Distance [m] [52].

On classe les canaux en fonction du type d'évanouissement et de la nature des changements de canal en temps et en fréquence. Cette classification est illustrée dans l'organigramme ci-dessous (voir la Figure 2.16) [52].

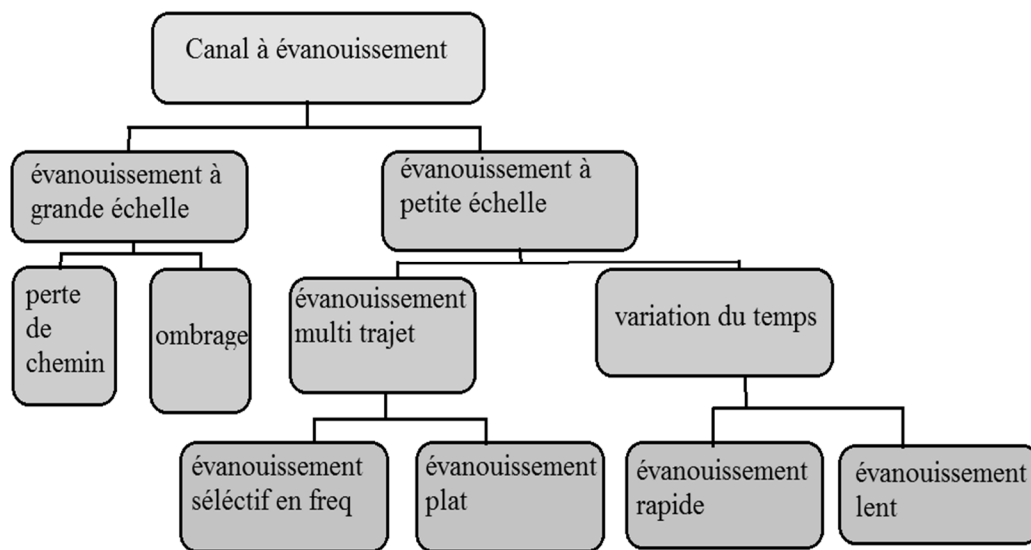


Figure 2.16. Classification des canaux à évanouissement [52].

2.7.1. Évanouissement à grande échelle

Les évanouissements à grande échelle peuvent être caractérisés par des variations de la puissance du signal mesurée lors d'un déplacement sur de grandes distances (plusieurs fois la longueur d'onde). Ces variations de puissance dépendent de la distance entre les deux antennes et de leur emplacement l'une par rapport à l'autre dans l'environnement. À titre d'exemple, pour les antennes directionnelles, si elles ne sont pas alignées, on peut constater un évanouissement. La même chose est vraie si les antennes sont en position LOS ou NLOS [48]. Pour davantage de détails, consultez les références suivantes [52-55].

2.7.2. Évanouissement à petite échelle

En effet, il se produit lorsque le récepteur se déplace par rapport à la source de rayonnement sur de très petites distances, de façon à ce que la puissance instantanée du signal varie sensiblement, ce qui provoque cet effet d'évanouissement.

Le signal reçu est en fait la somme de plusieurs signaux en provenance des différents chemins que peuvent emprunter les ondes radio. Ces chemins, dont la longueur varie, dépendent des réflexions des objets présents dans l'environnement.

Dans le but de réaliser une étude du phénomène d'évanouissement sur une suite de mesures, il est indispensable d'exploiter des " distributions " qui permettent d'établir la loi statistique de l'enveloppe du signal reçu.

Comme évoqué aux paragraphes précédents, les deux distributions les plus fréquemment employées sont la distribution de Rayleigh si les antennes émettrices et réceptrices ne sont pas en ligne de vue (NLOS), et la distribution de "Rice" si les antennes sont en ligne de vue directe (LOS) [52]. Les théories des télécommunications étant particulièrement vastes, et pour mieux comprendre les évanouissements à petite échelle, veuillez consulter les références suivantes [52-55].

2.8. Mobilité dans les réseaux radio

Différentes approches ont été proposées dans la littérature à partir de différents modèles de mobilité aléatoire et de critères connus de description des nœuds mobiles. Les résultats de ces modèles ont été utilisés pour analyser les performances d'un réseau mobile d'entreprise spécialisé et pour créer des scénarios optimaux dans le monde réel.

Dans le secteur des communications sans fil, la puissance du signal reçu est une mesure de la puissance reçue des signaux en espace libre ou à l'intérieur. En général, cette mesure est effectuée en radiofréquence afin de déterminer la distance et la position estimées d'un nœud mobile. Dans le cadre du suivi d'un objet mobile en temps réel (position) ou de l'estimation de la distance, une réception constante des mesures RSS est indispensable afin d'obtenir la position exacte d'un objet. Toutefois, il existe dans la littérature de nombreux algorithmes pouvant être exploités (modèle de mobilité) pour évaluer la position d'un objet en mouvement. Les modèles suivants sont notamment cités :

- Modèle de mobilité à cheminement aléatoire (ou RWMM) ;
- Modèle de mobilité par points de cheminement aléatoire (ou RWPM) ;
- Modèle de mobilité des groupes de points de référence (ou RPGMM) ;
- Modèle de mobilité de Gauss-Markov (ou GMM).

Un modèle de mobilité vise en principe à donner une description du modèle de mouvement du nœud d'un objet mobile, qui correspond à sa position, sa vitesse et sa direction actuelles au fil du temps. Au cours de ce projet, le modèle considéré et examiné est le modèle de mobilité de Gauss-Markov (ou GMM). Il a été présenté à l'origine par les auteurs, Liang et Haas, en 1999 et était destiné à l'analyse d'un nœud de communication sans fil mobile dans les réseaux de services de communication personnels (ou PCSN). Ce modèle a été largement employé, en particulier dans les

réseaux ad-hoc, pour mieux comprendre, veuillez consulter les références suivantes [56-58].

2.9. Conclusion

Dans le présent chapitre, on a présenté une vue générale de la technologie des ondes millimétriques autour de 60 GHz. On a ensuite rappelé le concept de propagation des signaux RF dans un environnement bien déterminé, en considérant les différents problèmes susceptibles d'être observés en phase de propagation du signal, et enfin, les modèles de mobilité dans les réseaux radio ont été décrits dans une vision globale. Dans le prochain chapitre, l'objectif est de présenter l'application de l'algorithme proposé dans le but d'améliorer les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G autour des ondes millimétriques 60 GHz.

CHAPITRE 3

Résultats et interprétations

3.1. Introduction

Les acquis théoriques précédents présentés dans les deux chapitres 1 et 2 ont permis de concrétiser une application qui améliorera les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G autour des ondes millimétriques 60 GHz. Cependant, l'algorithme de l'application proposée est évalué par des simulations et des résultats à l'aide de MATLAB 2017a.

À cet effet, on présentera différents résultats de simulations exécutées sur un réseau WLAN-IoT 5G proposé, qui sont nécessaires pour examiner la variation des performances, à savoir la position et la vitesse d'un utilisateur secondaire IoT-5G et le rapport signal/bruit (ou SNR) entre le point d'accès du réseau WLAN-IoT 5G et l'utilisateur secondaire IoT-5G, le taux de transmission maximal de bout en bout d'information et le temps de transmission requis des paquets d'information.

3.2. Algorithme proposé

Les effets aléatoires de l'évanouissement et de l'ombrage par trajets multiples dans un milieu donné peuvent affecter la nature du canal de propagation. Pour ce faire, le lien avec le plus petit SNR peut être considéré. Le but principal de ce travail est d'améliorer le lien du SNR et le taux de transmission maximal de bout en bout d'information et de réduire le temps de transmission requis des paquets d'information entre l'utilisateur primaire IoT-5G et l'utilisateur secondaire IoT-5G au niveau du spectre utilisé tout en considérant que l'utilisateur secondaire IoT-5G se déplace dans un réseau WLAN-IoT 5G. Toutefois, ce projet présente un algorithme en deux phases de mise en œuvre :

En ce qui concerne la première phase, elle se déroule en trois étapes :

1. **Première étape** : On utilisera comme modèle de mobilité dans ce projet le modèle de mobilité aléatoire de Gauss-Markov (ou GMMM) [56-58].
2. **Deuxième étape** : Concernant les modèles de propagation, il convient de faire appel au modèle d'ombrage log-normal (ou LNS : Log-Normal Shadowing) avec LOS et NLOS pour prédire la puissance du signal reçu au niveau de l'utilisateur secondaire IoT-5G [43]. Il faut ensuite déterminer le rapport signal/bruit (ou SNR) entre le point d'accès du réseau WLAN-IoT 5G (ou l'utilisateur primaire IoT-5G) et l'utilisateur secondaire IoT-5G.
3. **Troisième étape** : Après avoir prédit la puissance du signal reçu à l'utilisateur secondaire IoT-5G dans un environnement encombré, on va se baser sur un

estimateur récursif simple (ou ERS) afin d'estimer la puissance du signal reçu au niveau de l'utilisateur secondaire IoT-5G avec une stabilité de mesure accrue et meilleure [58]. Ensuite, on peut estimer le lien du rapport signal/bruit (ou SNR) entre le point d'accès du réseau WLAN-IoT 5G et l'utilisateur secondaire IoT-5G.

En ce qui concerne la deuxième phase :

Dans cette phase, les performances du réseau WLAN- IoT 5G sont analysées à la lumière des indicateurs suivants :

1. Le taux de transmission maximal (ou TTM) de bout en bout d'information entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l'utilisateur secondaire IoT-5G.
2. Le temps de transmission requis (ou TTR) des paquets de données à travers la bande passante exploitée du point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G à l'utilisateur secondaire IoT-5G.

3.2.1. Modèle de mobilité de Gauss-Markov

Dans un premier temps, il s'agit d'estimer la position et la vitesse d'un utilisateur secondaire IoT-5G (ou US_{IoT-5G}) se déplaçant dans la couverture d'un réseau WLAN-IoT 5G (ou le point d'accès ici nommé UP_{IoT-5G} : utilisateur primaire IoT-5G). Par la suite, on estime la distance de liaison entre le nœud de l' US_{IoT-5G} et l' UP_{IoT-5G} et on l'applique dans la seconde étape. Dans cette section, on présente les détails du modèle choisi. Le modèle GMMM est représenté par les formules suivantes [56-58] :

$$\begin{cases} V_{US_{IoT-5G}}(t) = \varepsilon * V_{US_{IoT-5G}}(t-1) + (1 - \varepsilon) * \bar{V}_{US_{IoT-5G}} + (\sqrt{1 - \varepsilon^2}) * W_{V_{US_{IoT-5G}}(t-1)} \\ D_{US_{IoT-5G}}(t) = \varepsilon * D_{US_{IoT-5G}}(t-1) + (1 - \varepsilon) * \bar{D}_{US_{IoT-5G}} + (\sqrt{1 - \varepsilon^2}) * W_{D_{US_{IoT-5G}}(t-1)} \end{cases} \quad (3.1)$$

Où $V_{US_{IoT-5G}}(t)$ et $D_{US_{IoT-5G}}(t)$ représentent respectivement la vitesse et la direction de la trajectoire du nœud d'utilisateur secondaire IoT-5G, au temps t , $\bar{V}_{US_{IoT-5G}}$ et $\bar{D}_{US_{IoT-5G}}$ représentent des constantes indiquant les valeurs moyennes de la vitesse et de la direction, respectivement, et $W_{V_{US_{IoT-5G}}(t-1)}$ et $W_{D_{US_{IoT-5G}}(t-1)}$ correspondent à des variables aléatoires appartenant à une distribution gaussienne de moyenne nulle et d'écart type σ . La nature aléatoire du GMMM est produite au moyen d'un paramètre de configuration ε ($0 \leq \varepsilon \leq 1$).

Dans chaque intervalle de temps, la position visée de l' US_{IoT-5G} peut être déduit de la position, de la vitesse et de la direction réelles du mouvement. Plus concrètement, en

admettant que le US_{IoT-5G} se déplace sur les axes X et Y , alors à l'instant t de l'intervalle, la position de ce dernier peut être établie à l'aide des formules d'état ci-après [40-42] :

$$\begin{cases} x_{US_{IoT-5G}(t)} = x_{US_{IoT-5G}(t-1)} + V_{US_{IoT-5G}(t-1)} * \cos D_{US_{IoT-5G}(t-1)} \\ y_{US_{IoT-5G}(t)} = y_{US_{IoT-5G}(t-1)} + V_{US_{IoT-5G}(t-1)} * \sin D_{US_{IoT-5G}(t-1)} \end{cases} \quad (3.2)$$

Où $(x_{US_{IoT-5G}(t)}, y_{US_{IoT-5G}(t)})$ et $(x_{US_{IoT-5G}(t-1)}, y_{US_{IoT-5G}(t-1)})$ sont les coordonnées aux instants t et $(t - 1)$, respectivement ; D_{t-1} et V_{t-1} correspondent à la direction et à la vitesse de l' US_{IoT-5G} , respectivement, à l'instant $(t - 1)$.

3.2.2. Estimateur récursif simple (ou ERS)

La localisation des objets (ici, c'est l' US_{IoT-5G}) dans les réseaux de communication sans fil fondés sur les fréquences radio est fréquemment exécutée à l'aide de la puissance du signal reçu, qui est exploitée pour estimer la distance entre un mobile (ici, c'est l' US_{IoT-5G}) et un point d'accès (ici, c'est l' UP_{IoT-5G}). En prévision de l'utilisation de la radiofréquence pour localiser des objets et estimer des distances, il faut relever certains défis, tels que l'atténuation du signal, le bruit, les effets de trajets multiples, les obstacles physiques, les erreurs de fabrication des périphériques, la température, etc. À cause de ces difficultés et de leur interférence avec les autres signaux reçus, il est difficile de détecter le signal. En outre, cette seconde étape a aussi pour but d'estimer le SNR entre l'émetteur (ou UP_{IoT-5G}) et le récepteur (ou US_{IoT-5G}), pour toute distance qui les sépare, comme illustré à la Figure 3.1 [58,59].

La présente section expose la méthode d'estimation appliquée dans le modèle de réseau WLAN-IoT 5G proposé. Le Tableau 3.1 ci-dessous récapitule les principaux aspects de cette méthode.

<p>Pour $(x_0 (US_{IoT-5G}), y_0 (US_{IoT-5G}))$ à $(x_i (US_{IoT-5G}), y_j (US_{IoT-5G}))$ faire:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Estimer la distance entre l'US_{IoT-5G} et l'UP_{IoT-5G} ($\hat{d}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$). 2. Prédire la puissance du signal reçu au niveau de l'US_{IoT-5G} ($\hat{P}_{r(US_{IoT-5G})}$) dans un environnement encombré. 3. Prédire l'incertitude du rapport signal/bruit entre l'UP_{IoT-5G} et l'US_{IoT-5G} ($\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$) dans un environnement encombré. <p>Fin de pour</p>
--

Tableau 3.1. Éléments clés de la méthode d'estimation.

Tout d'abord, le modèle de réseau WLAN-IoT 5G est composé d'un UP_{IoT-5G} et un US_{IoT-5G} , et le paramètre fondamental permettant de séparer l' UP_{IoT-5G} et l' US_{IoT-5G} est le canal de détection (où le signal primaire 5G se propage). De plus, l'état actuel du canal doit

être évalué par l'incertitude du rapport signal/bruit ($\overline{SNR}_{(US_{10T-5G}, UP_{10T-5G})}$) à chaque lien entre l' UP_{10T-5G} et l' US_{10T-5G} (voir la Figure 3.1). Par conséquent, l'évaluation de l'incertitude du $\overline{SNR}_{(US_{10T-5G}, UP_{10T-5G})}$ doit faire appel à des paramètres tels que la distance ($\hat{d}_{(US_{10T-5G}, UP_{10T-5G})}$) entre l' US_{10T-5G} et l' UP_{10T-5G} , l'estimation du $\hat{P}_r(US_{10T-5G})$ au niveau de l' US_{10T-5G} et la puissance du bruit (P_{Noise}). Néanmoins, lorsque l' US_{10T-5G} se déplace dans un milieu encombré, un mécanisme de moyenne pondérée est nécessaire pour assurer une mesure stable de la puissance du signal reçu au niveau de l' US_{10T-5G} . Dans cette perspective, un estimateur récursif simple (ou ERS) est employé. Le procédé d'estimation est figuré par les points suivants :

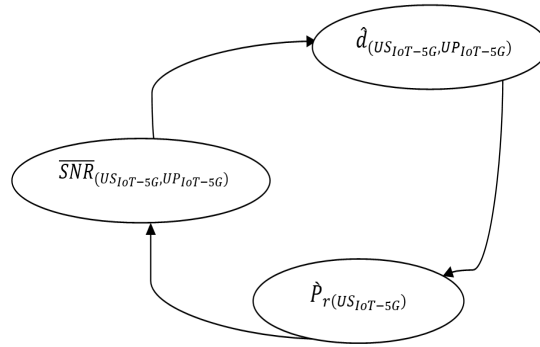


Figure 3.1. Cycle d'estimation.

a. Estimation de la distance

On utilise la distance euclidienne pour évaluer la distance entre deux nœuds l' US_{10T-5G} et l' UP_{10T-5G} ; elle est formulée comme suit [58,59] :

$$\hat{d}_{(US_{10T-5G}, UP_{10T-5G})} = \sqrt{(x_i(UP_{10T-5G}) - x_i(US_{10T-5G}))^2 + (y_j(UP_{10T-5G}) - y_j(US_{10T-5G}))^2} \quad (3.3)$$

Où les coordonnées $(x_i(US_{10T-5G}), y_j(US_{10T-5G}))$ d'un US_{10T-5G} sont déterminés à l'aide de GMMM et les coordonnées $(x_i(UP_{10T-5G}), y_j(UP_{10T-5G}))$ d'un UP_{10T-5G} sont fixées à (0, 0).

b. Puissance du signal reçu estimée à l' US_{10T-5G}

La puissance du signal reçu estimée en [dB] de l' UP_{10T-5G} vers l' US_{10T-5G} est formulée comme suit [58,59] :

$$\hat{P}_r(US_{10T-5G}) = P_t(UP_{10T-5G}) - \left(PL_0 + 10PLE_{(LOS/NLOS)} \log_{10} \left(\frac{\hat{d}_{(US_{10T-5G}, UP_{10T-5G})}}{d_0} \right) \right) \quad (3.4)$$

À partir de l'équation (3.3), on considère que le modèle de perte de trajectoire log-distance est expliqué comme suit :

$$\left[\frac{\hat{P}_r(US_{IoT-5G})(\hat{d}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})})}{P_r(US_{IoT-5G})(d_0)} \right]_{[dB]} = -10PLE_{(LOS/NLOS)} \log_{10} \left(\frac{\hat{d}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}}{d_0} \right) \quad (3.5)$$

$$P_r(US_{IoT-5G})(d_0) = P_t(UP_{IoT-5G}) - PL_0 \quad (3.6)$$

$$PL_0 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (3.7)$$

En outre, pour avoir le modèle des effets d'ombrage log-normal, on doit ajouter un élément supplémentaire $X_{\sigma(LOS/NLOS)}$ dans le modèle de perte de trajectoire log-distance, et ce dernier modèle correspondant :

$$\left[\frac{\hat{P}_r(US_{IoT-5G})(\hat{d}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})})}{P_r(US_{IoT-5G})(d_0)} \right]_{[dB]} = -10PLE_{(LOS/NLOS)} \log_{10} \left(\frac{\hat{d}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}}{d_0} \right) + \dots \quad (3.8)$$

$$\dots + X_{\sigma(LOS/NLOS)}$$

Où, $\hat{P}_r(US_{IoT-5G})$, $P_t(UP_{IoT-5G})$, PL_0 , $\hat{d}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$, λ et $PLE_{(LOS/NLOS)}$ (ou $n_{(LOS/NLOS)}$), sont : la puissance du signal reçu estimée à l' US_{IoT-5G} en [dB], la puissance de transmission par l' UP_{IoT-5G} en [dB], la perte de trajectoire en fonction d'une distance de référence d_0 en [dB], la distance estimée entre l' US_{IoT-5G} et l' UP_{IoT-5G} en [m], la longueur d'onde du signal primaire de l' UP_{IoT-5G} en [mm] et l'exposant de perte de trajectoire en ligne de visibilité (ou, line-of-sight (LOS)) ou hors de la ligne de visibilité (ou, non-line-of-sight (NLOS)), respectivement, et $X_{\sigma(LOS/NLOS)}$ représente une variable aléatoire gaussienne distribuée à moyenne nulle avec un écart-type $\sigma_{(LOS/NLOS)}$ en [dB].

Cependant, une technique fiable doit être appliquée pour détecter la puissance du signal reçu estimée au niveau de l' US_{IoT-5G} plus stable dans un milieu encombré. Ici, un estimateur récursif simple est appliqué comme le montre la formule ci-dessous :

$$\hat{P}_r(US_{IoT-5G})(t) = [\Delta \cdot \hat{P}_r(US_{IoT-5G})(t)] + [(1 - \Delta) \cdot \hat{P}_r(US_{IoT-5G})(t - 1)] \quad (3.9)$$

Où, Δ ($0 < \Delta \leq 1$) est le facteur de pondération [58,59].

c. Estimation de l'incertitude du rapport signal/bruit

L'estimation de l'incertitude du $\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$ du lien entre deux nœuds l' UP_{IoT-5G} et l' US_{IoT-5G} est exécutée comme suit [58,59] :

$$\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})} [dB] = \frac{\dot{P}_r(US_{IoT-5G})}{P_{Noise}} \quad (3.10)$$

$$\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})} [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{\dot{P}_r(US_{IoT-5G})}{P_{Noise}} \right) \quad (3.11)$$

$$\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})} [dB] = \dot{P}_r(US_{IoT-5G}) [dB] - P_{Noise} [dB] \quad (3.12)$$

3.3. Résultats des simulations et interprétations

3.3.1. Simulations

Dans cette section, on a effectué une série de simulations sur ordinateur à l'aide du logiciel MATLAB R2017a. Le présent travail a pour objectif d'améliorer les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G (ou UP_{IoT-5G}) au voisinage des ondes millimétriques 60 GHz (voir la Figure 3.2) en temps réel, en prenant en compte que l'environnement de WLAN-IoT 5G est encombré, avec les effets de la mobilité de l' US_{IoT-5G} selon trois scénarios possibles, voir le Tableau 3.2. De plus, les paramètres considérés dans le cadre de nos expériences sont énumérés dans le Tableau 3.3 [60-62].

	Modèle de propagation	Canal d'observation
Scénario (A)	Perte de trajectoire en espace libre (ou PTEL)	AWGN
Scénario (B)	Perte de trajectoire log-normal shadowing (n_{LOS})	AWGN
Scénario (C)	Perte de trajectoire log-normal shadowing (n_{NLOS})	AWGN

Tableau 3.2. Scénarios proposés de détection locale du signal primaire UP_{IoT-5G} .

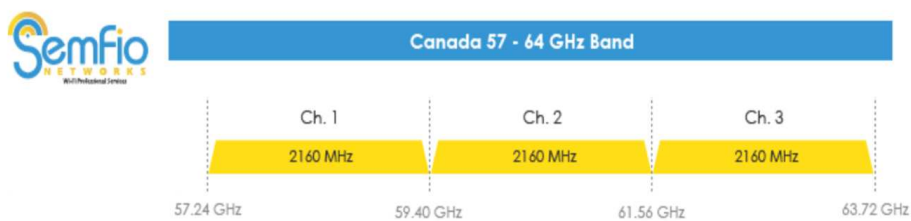


Figure 3.2. 3 canaux disponibles dans la bande 60 GHz au Canada [63].

3.3.2. Résultats et interprétations

Dans le cadre de ce travail, les premières étapes par lesquelles sont passées nos expériences (voir le Tableau 3.1) consistent à estimer la puissance du signal reçu à l'utilisateur secondaire IoT-5G (ou US_{IoT-5G}) ainsi que le rapport signal/bruit entre l' UP_{IoT-5G} et l' US_{IoT-5G} . Pour y parvenir, il faut d'abord estimer la position de l' US_{IoT-5G} par rapport à un point de repère qui

sera l' UP_{IoT-5G} (ou point d'accès de réseau WLAN-IoT 5G), puis la vitesse de l' US_{IoT-5G} à l'aide du GMMM.

Paramètres	Valeurs
Couverture de la zone UP-5G	50 x 50 [m ²]
Fréquence utilisée	60.48 [GHz]
Bande passante	2.16 [GHz]
Taille des données transmises (ou TDT)	100 [Mb]
Puissance de transmission de l'UP-5G	15 [dBm]
Puissance du bruit au niveau de l'US-5G	-139 [dBm]
Exposant de perte de trajectoire	$n_{LOS} = 2.17$ et $n_{NLOS} = 3.01$
Distance de référence	1.0 [m]

Tableau 3.3. Paramètres de simulations [60-62].

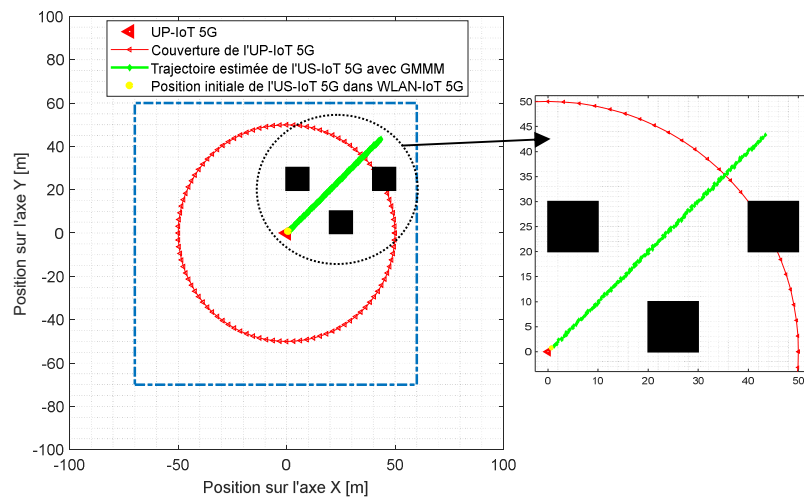


Figure 3.3. Trajectoire estimée de l' US_{IoT-5G} via l'utilisation de l'algorithme GMMM.

Le mouvement de l' US_{IoT-5G} dans la zone de couverture de point d'accès de réseau WLAN-IoT 5G est illustré à la Figure 3.3 pour les trois modèles de propagation proposés (voir le Tableau 3.2). L' US_{IoT-5G} démarre son mouvement à la position $(\sqrt{2}, \sqrt{2})$ et reste en mouvement jusqu'à $t = 200$ s ; il y a une distance d , égale à 1.0 m entre la position initiale de l' US_{IoT-5G} (symbole du point jaune) et de la position fixée de l' UP_{IoT-5G} (symbole du triangle rouge), qui a (0, 0). Par ailleurs, les paramètres GMMM suivants ont été définis pour réaliser ce mouvement, à savoir : l'intervalle de temps était de 1 s, $\varepsilon = 0.075$, $\bar{V}_{US_{IoT-5G}} = 0.3$ m/s et $\bar{D}_{US_{IoT-5G}}$ initialement $\frac{\pi}{4}$.

Suivant la Figure 3.3, l' US_{IoT-5G} a été installé dans un espace fermé de 130×130 [m²], comme le montre le contour carré pointillé de couleur bleu, tandis que les trois contours carrés noirs correspondent à des obstacles dans le réseau WLAN-IoT 5G par rapport à l' US_{IoT-5G} . Il est en outre évident que l' US_{IoT-5G} emprunte une trajectoire semi-aléatoire (voir la partie zoomée de la Figure 3.3).

La Figure 3.4 illustre la vitesse estimée de l' US_{IoT-5G} à l'aide de l'algorithme GMMM. Toutefois, il a été conclu que selon les formules de l'algorithme GMMM (3.1), les coordonnées $(x_{US_{IoT-5G}}(t), y_{US_{IoT-5G}}(t))$ sont estimées par le biais de la vitesse $V_{US_{IoT-5G}}(t)$ et de la direction $D_{US_{IoT-5G}}(t)$ de l' US_{IoT-5G} . Donc, la vitesse de déplacement par unité de temps de l' US_{IoT-5G} dans la zone de couverture du réseau WLAN-IoT 5G (ou de l' UP_{IoT-5G}) est illustrée à la Figure 3.4. Il en résulte que la vitesse décroît de $t = 1$ s avec $V = 1.074$ m/s à $t = 145$ s avec $V = 0,3079$ m/s.

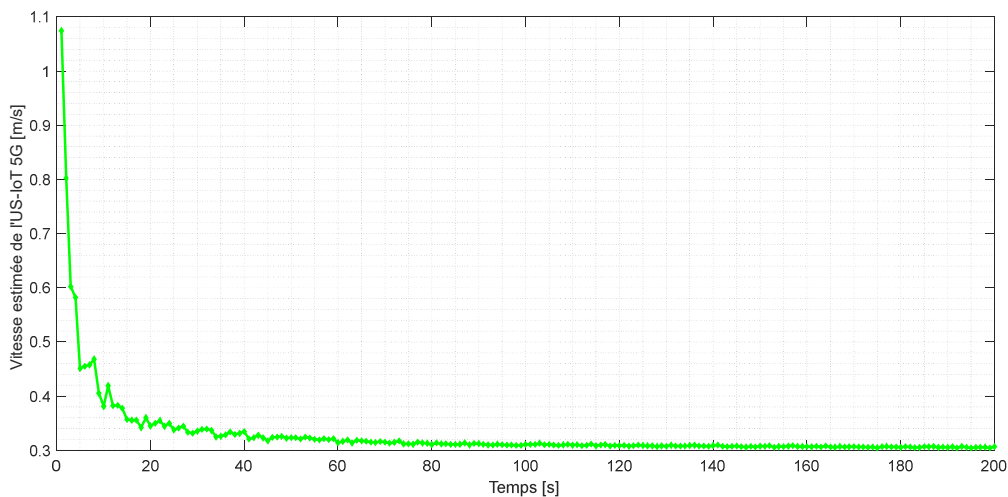


Figure 3.4. Vitesse estimée de l' US_{IoT-5G} via l'utilisation de l'algorithme GMMM vs. Temps [s].

En outre, il est à noter que du temps $t = 146$ s à $t = 200$ s, la vitesse moyenne de déplacement de l' US_{IoT-5G} reste égale à 0.3073 m/s. En conséquence, la vitesse de l' US_{IoT-5G} demeure à peu près constante dans la période allant de 146 s à 200 s.

Sur la Figures 3.5, on peut observer le rapport signal/bruit estimé entre l' US_{IoT-5G} et l' UP_{IoT-5G} (ou $\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$), dans le cadre des trois scénarios proposés (voir le Tableau 3.2). On estime la valeur du $\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$ du signal reçu au niveau de l' US_{IoT-5G} à l'aide de l'algorithme proposé, comme il est indiqué à la Figure 3.1 et au Tableau

3.1. D'après la Figure 3.3, il est évident qu'à mesure que l' US_{IoT-5G} se déplace vers l'extrémité de la zone de couverture du rayonnement, qui se trouve loin de l' UP_{IoT-5G} , le $\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G},UP_{IoT-5G})}$ du signal reçu au niveau de l' US_{IoT-5G} est diminué (consulter la Figure 3.5).

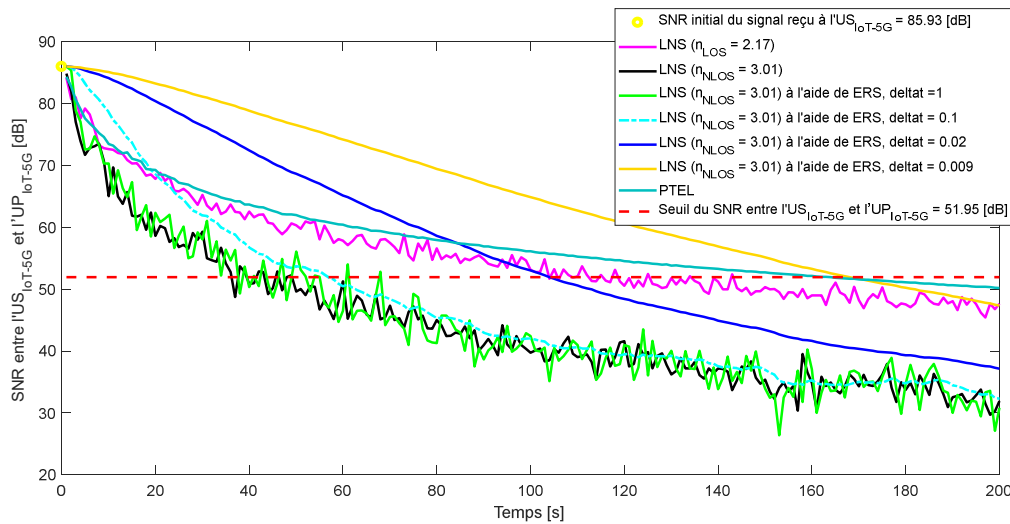


Figure 3.5. Rapport signal sur bruit entre l'US-5G et l'UP-5G [dB] vs. Temps [s].

Au cours de cette étape, on emploie un estimateur récursif simple (ou ERS). Comme résultat, l'impact de la valeur appropriée de Δ (delta, voir la formule (3.9)) pour une estimation correcte du $\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G},UP_{IoT-5G})}$ du signal reçu à l' US_{IoT-5G} a été examiné, il est apparu que Δ est étroitement lié à la variation du $\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G},UP_{IoT-5G})}$ entre l' US_{IoT-5G} et l' UP_{IoT-5G} .

De surcroît, il est clairement observé que les oscillations de la variation sont considérées assez importantes quand aucune moyenne ne peut être considérée, c'est-à-dire que la valeur de Δ est égale à 1. Par contre, lorsque la valeur de Δ est égale à 0.1, 0.02 et 0.009, la valeur estimée du $\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G},UP_{IoT-5G})}$ du signal reçu à l' US_{IoT-5G} est tout à fait acceptable. Il est cependant nécessaire d'obtenir une meilleure stabilité. Pour parvenir à cet objectif, il est possible de constater que si l'on applique le moyennage avec une valeur de Δ égale à 0.009, la valeur estimée du $\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G},UP_{IoT-5G})}$ du signal reçu à l' US_{IoT-5G} est moins sensible aux changements rapides des oscillations au niveau des fluctuations (pour chaque position de l' US_{IoT-5G}).

Pour conclure, cette phase a pour but de déterminer une valeur appropriée de Δ , permettant la meilleure estimation du $\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G},UP_{IoT-5G})}$ du signal reçu à l' US_{IoT-5G} . En réalité, Δ est

une fonction du paramètre d'ombrage σ . On note que l'algorithme proposé est moins sensible aux variations brusques lorsqu'une valeur moyenne de $\Delta = 0.009$ est effectuée. Par conséquent, une estimation stable est nécessaire pour améliorer la fiabilité de la performance de la détection du signal primaire autour de la fréquence de 60.48 GHz (voir le Tableau 3.2).

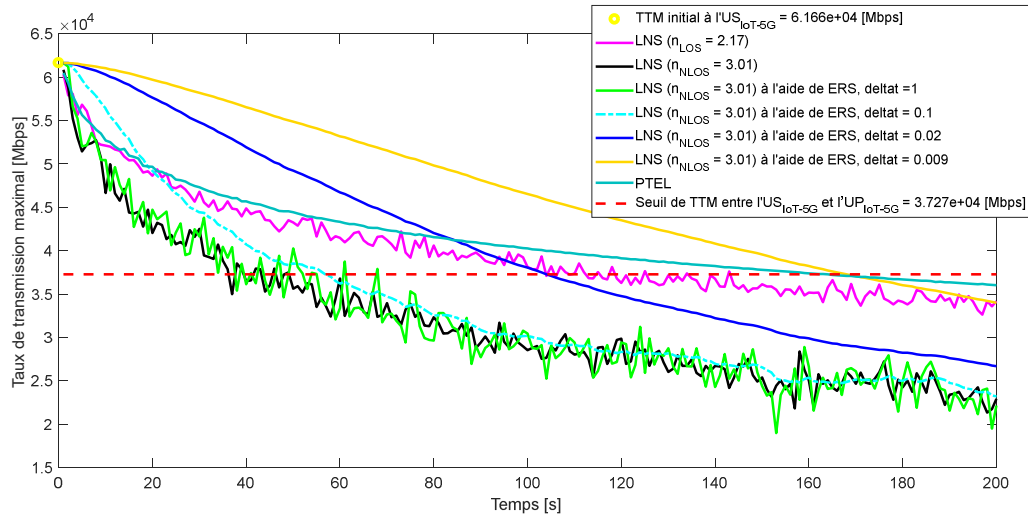


Figure 3.6. TTM entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} [Mbps] vs. Temps [s].

Conformément à l'algorithme proposé, la seconde phase vise à analyser et à examiner l'amélioration des performances d'un réseau WLAN-IoT 5G pour un signal détecté autour de la fréquence de 60.48 GHz. Les résultats des performances désirées, à savoir : le taux de transmission maximal de bout en bout entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} , et le temps de transmission requis des paquets de données dans la bande passante exploitée (ici, est de 2160 MHz) entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} , sont présentés sur les Figures 3.6 et 3.7, dans le cas où l' US_{IoT-5G} se déplace dans la zone de couverture de l' UP_{IoT-5G} , pour les trois modèles de propagation proposés (voir le Tableau 3.2).

a. Effet de la mobilité de l' US_{IoT-5G} sur les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G

Au vu des résultats précédemment obtenus dans la première phase, il apparaît qu'il y a une nette influence sur les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G dans les trois scénarios proposés (voir le Tableau 3.2), voir les deux Figures 3.6 et 3.7 qui donne les résultats du taux de transmission maximal de bout en bout entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} , et le temps de transmission requis des paquets de données dans la bande passante

exploitée (ici, est de 2160 MHz) entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} , pour un signal primaire autour de la fréquence 60.48 GHz.

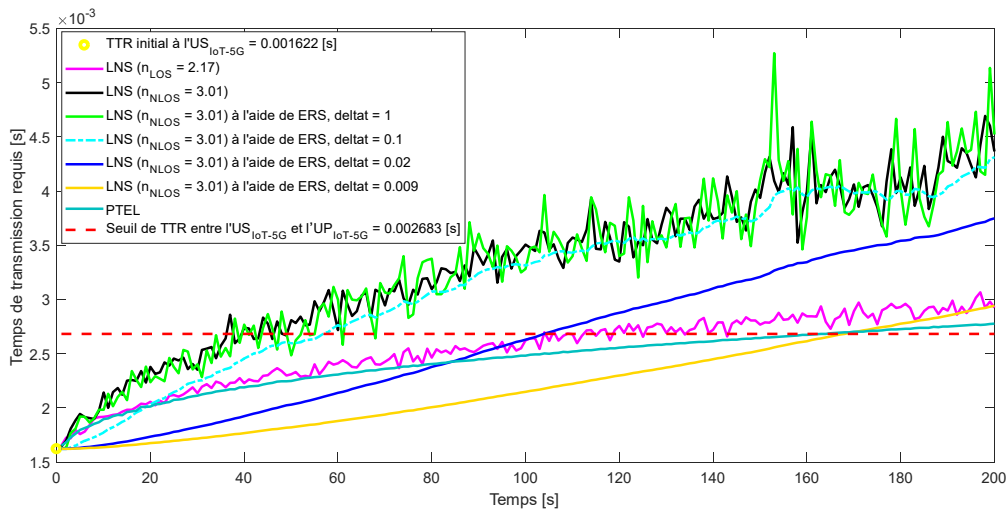


Figure 3.7. TTR entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} [s] vs. Temps [s].

Il est important de noter que lorsque le $\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$ de la liaison entre l' UP_{IoT-5G} et l' US_{IoT-5G} est détérioré, le taux de transmission maximal de bout en bout entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} est également détérioré, et le temps de transmission requis des paquets de données sous la bande passante exploitée (ici, est de 2160 MHz) entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} (ici, est de 2160 MHz), est probablement accru. En conséquence, les analyses que l'on peut trouver sur les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G dans les trois scénarios proposés, que la mobilité de l' US_{IoT-5G} dégrade significativement les performances de la transmission d'information effectuée, mais légèrement, car la bande passante autour de la fréquence 60.48 GHz est très large.

b. Effet de l'ERS sur les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G

La mobilité de l' US_{IoT-5G} dans un réseau WLAN-IoT 5G et la détection d'un signal primaire à 60.48 GHz (selon les valeurs de $\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$) dans un environnement encombré (voir les trois modèles de propagation proposés dans le Tableau 3.2), ont un effet considérable dans le contexte de la détection du spectre 5G. Il est donc suggéré de faire appel à un estimateur récursif simple (ou ERS) en vue d'améliorer les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G autour de la fréquence de 60.48 GHz. Après avoir effectué le test de l'utilisation d'un ERS, il a

été constaté que l'ERS offrait certains avantages à l'algorithme proposé. En outre, les Figures 3.6 à 3.7 expliquent l'impact du facteur de pondération Δ sur les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G recommandé. On peut noter que les résultats de la simulation correspondent au titre de notre projet.

Les performances de la transmission d'informations dans le réseau WLAN-IoT 5G réalisé par l' US_{IoT-5G} sont considérablement améliorées dans un environnement encombré, en particulier pour le troisième modèle de propagation (voir le Tableau 3.2). Il a également été noté que la variation du facteur de pondération Δ présentait une incidence positive significative sur le taux de transmission maximal de bout en bout entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} , et sur le temps de transmission requis des paquets de données sous la largeur de bande exploitée (ici, 2160 MHz) entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} , (voir les Tableaux 3.4 et 3.5), ce qui prouve l'importance de notre contribution aux réseaux WLAN-IoTs 5G.

Δ	1	0.1	0.02	0.009
$\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$ [dB]	35.34	34.7	41.15	52.74
$TTM_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$ [Mbps]	$2.53 \cdot 10^{+04}$	$2.49 \cdot 10^{+04}$	$2.95 \cdot 10^{+04}$	$3.78 \cdot 10^{+04}$
$TTR_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$ [s]	0.003944	0.004016	0.003387	0.002642

Tableau 3.4. Amélioration des performances d'un réseau WLAN-IoT 5G à $t = 139$ s, dans le troisième scénario.

À $t = 163$ [s]	$\overline{SNR}_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$ [dB]	$TTM_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$ [Mbps]	$TTR_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$ [s]
Scenarios (A)	51.97 dB	$3.729 \cdot 10^{+04}$	0.002682
Scenarios (B)	47.44 dB	$3.404 \cdot 10^{+04}$	0.002938
Scenarios (C)	34.35 dB	$2.46 \cdot 10^{+04}$	0.004057
Scenarios (C) amélioré / $\Delta = 0.009$	52.74 dB	$3.784 \cdot 10^{+04}$	0.002642

Tableau 3.5. Comparaison des performances d'un réseau WLAN-IoT 5G dans différents scénarios.

Il ressort clairement des Figures 3.6 et 3.7 et des Tableaux 3.4 et 3.5 que lorsque le facteur de pondération Δ peut atteindre la valeur de 0.009, le taux de transmission maximal de bout en bout entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} peut être amélioré et, par conséquent, le temps de transmission requis des paquets de données peut être réduit dans la

bande passante exploitée (ici, 2160 MHz) entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} . Pour plus de détails, les trois cas de scénarios proposés (voir le Tableau 3.2) ont été comparés dans le Tableau 3.5 avec $\Delta = 0.009$.

c. Impact de la variation de la taille des données transmises sur les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G

Dans cette sous-section, la taille des données transmises (ou TDT) du point d'accès WLAN-IoT 5G vers l' US_{IoT-5G} a été variée au cours des trois scénarios mentionnés dans le Tableau 3.5 avec des instants différents (consulter la Figure 3.8), et cela dans le but d'analyser la performance du temps de transmission requis des paquets de données sous la bande passante exploitée (ici 2160 MHz) entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} .

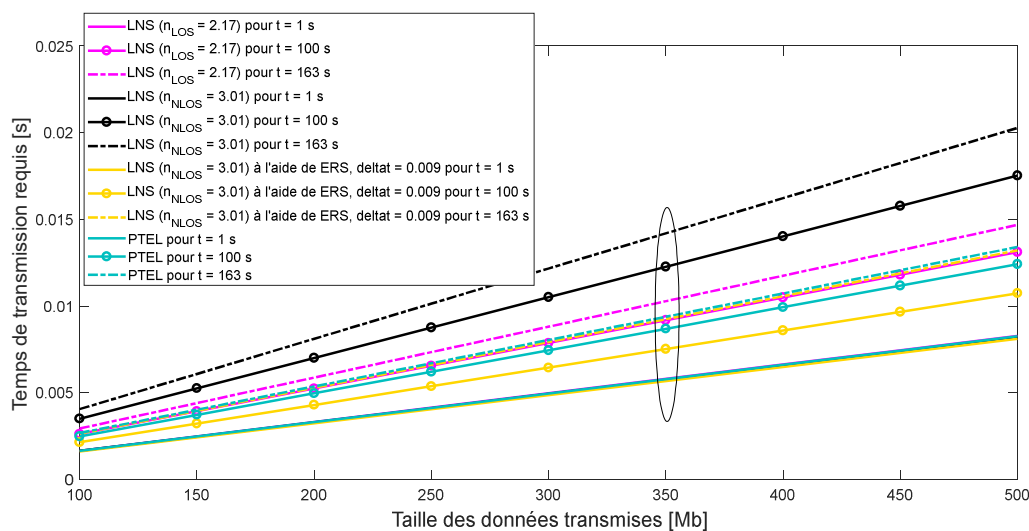


Figure 3.8. TTR entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} [s] vs. TDT [Mb].

Toutefois, les résultats obtenus à la Figure 3.8 montrent que l'augmentation de la taille des données transmises peut influencer défavorablement sur le temps de transmission requis des paquets de données transmises sous la bande passante exploitée (ici 2160 MHz) entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} . À titre d'exemple, le Tableau 3.6 affiche des résultats intéressants et les plus importantes sont récapitulées dans la dernière ligne du Tableau 3.6.

	$TTR_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$ [s] à t = 1 [s]	$TTR_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$ [s] à t = 100 [s]	$TTR_{(US_{IoT-5G}, UP_{IoT-5G})}$ [s] à t = 163 [s]
Scenarios (A)	0.005785	0.008692	0.009386
Scenarios (B)	0.005799	0.009178	0.01028
Scenarios (C)	0.005751	0.01227	0.0142
Scenarios (C) amélioré / $\Delta = 0.009$	0.005677	0.007519	0.009248

Tableau 3.6. Comparaison des performances TTRs dans un réseau WLAN-IoT dans différents scénarios avec des instants différents pour une TDT = 350 [Mb].

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, il est démontré l'efficacité de l'algorithme proposé afin d'améliorer les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G autour des ondes millimétriques 60 GHz en temps réel, tout en considérant l'impact environnemental et la mobilité de l' US_{IoT-5G} . Cependant, sur le plan des résultats remarquables, on obtient les points ci-après : la fiabilité de détection du signal primaire de fréquence 60.48 GHz a été évaluée, le taux de transmission maximal de bout en bout entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} a été augmenté et le temps de transmission requis des paquets de données a été réduit sous la largeur de bande exploitée (ici, 2160 MHz) entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et l' US_{IoT-5G} .

Conclusion générale

Le développement et la normalisation des réseaux à ondes millimétriques (R-5G) ont récemment apporté l'une des plus grandes innovations des dernières décennies dans le domaine des communications WLAN-IoT. Néanmoins, la transition vers les ondes millimétriques implique de nouveaux enjeux de recherche [64].

Comme la plupart le savent, le Wi-Fi opère sur la bande 2.4 GHz ou 5 GHz. Mais en réalité, il existe d'autres protocoles 802.11 qui exploitent d'autres bandes de fréquences (900 MHz, 60 GHz, ...). Aujourd'hui, on parlera de la réglementation de l'utilisation de la bande de fréquence 60 GHz pour les applications de la technologie IoT [63].

Cependant, la technologie IoT emploie comme type de réseau dans le but de partager leur ressource, un réseau de WLAN, et on également sait que les performances les plus importantes pour cette technologie sont : le taux de transmission maximal et le temps de transmission requis pour les données partagées entre les utilisateurs d'un réseau WLAN-IoT. De ce fait, on a proposé un algorithme qui va améliorer les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G autour des ondes millimétriques de 60 GHz. En conclusion, que grâce à l'utilisation de l'algorithme, on a augmenté le taux de transmission maximal de bout en bout entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et US_{IoT-5G} et par conséquent, on a réduit le temps de transmission requis des paquets de données sous la largeur de bande exploitée (ici, 2160 MHz) entre le point d'accès au réseau WLAN-IoT 5G et US_{IoT-5G} .

En ce qui concerne les travaux futurs, il est possible d'envisager un autre axe de recherche : en vue d'améliorer les performances de la mobilité du spectre dans les réseaux à ondes millimétriques autour de la fréquence de 28 GHz, il s'agira d'exploiter le même algorithme proposé dans ce projet comme début de recherche.

Références Bibliographiques

- [1] Singh, H., Prasad, R. & Bonev, B. The Studies of Millimeter Waves at 60 GHz in Outdoor Environments for IMT Applications: A State of Art. *Wireless Pers Commun* 100, 463–474 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11277-017-5090-6>
- [2] <https://www.objetconnecte.com/5g-quel-impact-sur-linternet-des-objets-iot/> (consulter le 11/06/2022).
- [3] Abu Saada, Mohammed H. (2017). Design of Efficient Millimeter Wave Planar Antennas for 5G Communication Systems. *الجامعة الإسلامية - غزة*. <http://hdl.handle.net/20.500.12358/18951>
- [4] A. Gohil, H. Modi and S. K. Patel, "5G technology of mobile communication: A survey," 2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP), 2013, pp. 288-292, doi: 10.1109/ISSP.2013.6526920.
- [5] Hu, F. (Ed.). (2016). *Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19698>
- [6] P. Latina, "Comienza China pruebas de tecnología 5G » número 7," *La Habana, Cuba*, 5 janvier 2016.
- [7] Rodriguez, J. (2015). *Fundamentals of 5G Mobile Networks* (1st ed.). Wiley. Retrieved from <https://www.perlego.com/book/993859/fundamentals-of-5g-mobile-networks-pdf> (Original work published 2015).
- [8] E. Hossain, M. Rasti, H. Tabassum and A. Abdelnasser, "Evolution toward 5G multi-tier cellular wireless networks: An interference management perspective," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 118-127, June 2014, doi: 10.1109/MWC.2014.6845056.
- [9] Wei Xiang, Kan Zheng, and Xuemin Sherman Shen. 2016. *5G Mobile Communications* (1st. ed.). Springer Publishing Company, Incorporated.
- [10] Afif Osseiran, Jose F. Monserrat, and Patrick Marsch. 2016. *5G Mobile and Wireless Communications Technology* (1st. ed.). Cambridge University Press, USA.
- [11] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, February 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736761.
- [12] <https://www.infoworld.com/article/2681580/tomorrow-s-5g-cell-phone.html> (consulter le 11/06/2022).
- [13] Badoi, CI., Prasad, N., Croitoru, V. et al. 5G Based on Cognitive Radio. *Wireless Pers Commun* 57, 441–464 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11277-010-0082-9>.

- [14] F. MAGNE, "Télécommunications haut débit en ondes millimétriques," Techniques-Ingénieur, date de publication : 10 mai 1998. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-traitement-du-signal-et-ses-applications-tiatb/archive-1/telecommunications-haut-debit-en-ondes-millimetriques-e6250/proprietes-et-particularites-e6250niv10001.html>
- [15] <https://www.electronics-notes.com/> (consulter le 11/06/2022).
- [16] N. H. Mahmood, M. G. Sarret, G. Berardinelli and P. Mogensen, "Full duplex communications in 5G small cells," 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2017, pp. 1665-1670, doi: 10.1109/IWCMC.2017.7986534.
- [17] DEHEMCHI M et BOUHAFER A. (2019). Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G. Université 8 mai 1945 – GUELMA. <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/4031>
- [18] Chataut, Robin, and Robert Akl. 2020. "Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction" *Sensors* 20, no. 10: 2753. <https://doi.org/10.3390/s20102753>.
- [19] T. Nakamura et al., "Trends in small cell enhancements in LTE advanced," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 2, pp. 98-105, February 2013, doi: 10.1109/MCOM.2013.6461192.
- [20] <https://www.lebigdata.fr/5g-tout-savoir> (consulter le 11/06/2022).
- [21] <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083-0-201509-I/fr> (consulter le 11/06/2022).
- [22] G. Lovnes, J. J. Reis and R. H. Raekken, "Channel sounding measurements at 59 GHz in city streets," 5th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Wireless Networks - Catching the Mobile Future., 1994, pp. 496-500 vol.2, doi: 10.1109/WNCMF.1994.529139.
- [23] T. Zwick, C. Fischer, D. Didascalou and W. Wiesbeck, "A stochastic spatial channel model based on wave-propagation modeling," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 1, pp. 6-15, Jan. 2000, doi: 10.1109/49.821698.
- [24] S. Yong, A. Garcia and P. Xia, "60 GHz technology for Gbps WLAN and WPAN," Chichester, West Sussex: Wiley, 2011.
- [25] A.D. Oliver, "Millimeter wave systems – past, present and future," *IEE Proceedings*, 136(1), pp. 35–52, 1989.
- [26] <https://le-routeur-wifi.com/test-tp-link-talon-ad7200/> (consulter le 11/06/2022).

Références Bibliographiques

- [27] Yong, S.K., Chong, CC. "An Overview of Multigigabit Wireless through Millimeter Wave Technology: Potentials and Technical Challenges," J Wireless Com Network 2007, 078907 (2006). <https://doi.org/10.1155/2007/78907>.
- [28] FCC First Report and Order, 2002. http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf
- [29] C. Chong, F. Watanabe and H. Inamura, "Potential of UWB Technology for the Next Generation Wireless Communications," 2006 IEEE Ninth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, 2006, pp. 422-429, doi: 10.1109/ISSSTA.2006.311807.
- [30] FCC Code of Federal Regulation, Code of Federal Regulation title 47 Telecommunication, Chapter 1, part 15.255, October, 2004.
- [31] Spectrum Management and Telecommunications, Radio Standard Specification-210, Issue 6, Low-power Licensed-exempt Radio Communication Devices (All Frequency Bands): Category 1 Equipment, September, 2005
- [32] Regulations for Enforcement of the Radio Law 6-4-2 Specified Low Power Radio Station (12) 59–66 GHz band.
- [33] MPT, "Specified low power radio station 10," Millimeter wave transmission. MPT Bulletin, mo. 42/1989, 1989.
- [34] Ordinance for Regulating Radio Equipment 49-14-6 Specified Low Power Radio Station.
- [35] Ministry of Internal Affairs and Communications. <http://www.soumu.go.jp/english/index.html>.
- [36] Australian Communications and Media Authority (ACMA), "Radiocommunications (Low Interference Potential Devices)," Class License Variation 2005 (No. 1), August, 2005.
- [37] Australian Communications and Media Authority (ACMA) <http://www.acma.gov.au>.
- [38] Korean Frequency Policy & Technology Workshop, Session 7, pp. 13–32, November, 2005.
- [39] Ministry of Information and Communication of Korea, Frequency Allocation Comment of 60 GHz Band, April, 2006.
- [40] Korean Communications Commission <http://www.kcc.go.kr>
- [41] CEPT Recommendation T/R 22-03, "Provisional Recommended Use of the Frequency Range 54.25-66 GHz by Terrestrial Fixed and Mobile Systems," Athens,

- pp. 1–3, January, 1990.
<http://www.ero.dk/documentation/docs/doc98/official/pdf/TR2203E.PDF>
- [42] ERC Recommendation 12-09, "Radio Frequency Channel Arrangement for Fixed Service Systems Operating in the Band 57.0–59.0 GHz Which Do Not Require Frequency Planning," The Hague 1998 revised Stockholm, October, 2004.
- [43] ECC Recommendation 05-02, "Use of the 64–66 GHz Frequency Band for Fixed Services," June, 2005.
- [44] ETSI DTR/ERM-RM-049, "Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM): System Reference Document: Technical Characteristics of Multiple Gigabit Wireless Systems in the 60 GHz Range," March, 2006.
- [45] ERC Recommendations 70-03, 1997. <http://www.ero.docdb.dk>
- [46] European Radiocommunications Office. <http://www.ero.dk>.
- [47] H. D. Hristov, J. R. Urumov and M. J. Semov, "Ring-Shaped Dielectric Antenna," 1980 10th European Microwave Conference, 1980, pp. 109-113, doi: 10.1109/EUMA.1980.332815.
- [48] E.R. ANWAR, "Caractérisation à grande échelle d'un signal 60 GHz dans un environnement minier confinés," PFE pour l'obtention du grade de Maître en ingénierie (M.I.), à l'Université de Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2012.
- [49] A. CHOUMANE, "Synthèse d'un canal de propagation par système multi-antennes pour la caractérisation de terminaux mobiles à diversité," Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de LIMOGES, 2011.
- [50] L. Boithias, "Radio wave propagation," Éditeur : McGraw-Hill (1 mars 1988), ISBN-13 : 978-0070064331.
- [51] M. Schwartz, "Principles of electrodynamics," Publisher : Dover Publications; unknown edition (October 1, 1987), ISBN-13 : 978-0486654935.
- [52] A. Fatma, et K. Fatma-Zohra, "Etude et simulation d'un modèle de canal de propagation sans fil dans un environnement Indoor," M-PFE pour obtenir le grade de Master en ELN, option : TISE, à l'université de BLIDA, 2014.
- [53] N. Prayongpun, "Modélisation et étude de la capacité du canal pour un système multi-antennes avancé exploitant la diversité de polarisation," Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de JOSEPH FOURIER – GRENOBLE 1, 2009.
- [54] J. Ali, "Modélisation et émulation des canaux de propagation des systèmes MIMO," Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de technologie supérieure, 2004.

- [55] Y.S. Cho, J. Kim, W.Y. Yang, and C.G. Kang, "MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB," Wiley Publishing, 2010.
- [56] Tracy C, Jeff B, Vanessa D. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. *Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile AdHoc Networking: Research, Trends and Applications 2002*; 2:483–502.
- [57] Feng G, Shengjun X. A comparative study of mobility models in the performance evaluation of MCL. *IEEE Wireless and Optical Communication Conference*; 1999. p. 288-92.
- [58] H.E. Adardour et al., Improved local spectrum sensing in cluttered environment using a simple recursive estimator, *Computers and Electrical Engineering* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.11.037>.
- [59] B. Othmane et B.A. Adnane, "Estimation d'un signal primaire dans un réseau 5G par un utilisateur secondaire à base d'un détecteur d'énergie," PFE pour l'obtention du grade de Master en Télécommunications à l'Université de Tlemcen, 2020.
- [60] S. Sun et al., "Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications, " in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 5, pp. 2843-2860, May 2016, doi: 10.1109/TVT.2016.2543139.
- [61] K. Joongheon, L. Jae-Jin, & L. Woojoo, "Strategic Control of 60 GHz MillimeterWave High-Speed Wireless Links for Distributed Virtual Reality Platforms," in *Hindawi, Mobile Information Systems*, Volume 2017, Article ID 5040347, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/5040347>
- [62] Z. Zhang, & H. Yu, "Beam interference suppression in multi-cell millimeter wave communications," in *Digital Communications and Networks*, vol. 5, no. 3, 2019, pp. 196-202, <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2018.01.003>.
- [63] <https://semfionetworks.com/blog/60ghz-regulations-in-canada/> (consulter le 14/06/2022).
- [64] J. G. Andrews, T. Bai, M. N. Kulkarni, A. Alkhateeb, A. K. Gupta and R. W. Heath, "Modeling and Analyzing Millimeter Wave Cellular Systems," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 1, pp. 403-430, Jan. 2017, doi: 10.1109/TCOMM.2016.2618794.

Résumé

Ce projet vise à améliorer les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G en ondes millimétriques dans un environnement encombré, autour de la bande de fréquences sans fil de 60 GHz. Cependant, en raison des effets aléatoires de l'évanouissement et des trajets multiples, la nature du canal de propagation 5G peut être affectée, ce qui explique que le lien le plus faible en termes de SNR apparaisse et, par conséquent, les performances d'un réseau WLAN-IoT 5G peuvent être dégradées.

En effet, ce travail a pour principal objectif d'améliorer le lien SNR du signal reçu au niveau de l'utilisateur secondaire IoT-5G, le taux de transmission maximal de bout en bout entre le point d'accès WLAN-IoT 5G et l'utilisateur secondaire IoT-5G, ainsi que le temps de transmission requis des paquets de données, en considérant que l'utilisateur secondaire IoT-5G est en mouvement. Afin d'atteindre ces objectifs, on s'appuie sur l'utilisation d'un estimateur récursif simple (ou ESR).

Mots clés : 60 GHz, 5G, WLAN-IoT 5G, Utilisateur Secondaire IoT-5G, ESR.

Abstract

This project aims to improve the performances of a millimeter-wave WLAN-IoT 5G network in a congested environment at around the 60 GHz wireless frequency band. However, due to the random effects of the multipath and fading, the propagation 5G channel nature can be affected, which is why the weakest link in terms of SNR appears and, therefore, the performances of WLAN-IoT 5G network can be degraded.

Indeed, the main objective of this work is to improve the SNR link of the received signal at the secondary user IoT-5G, the maximum end-to-end transmission rate between the access point WLAN-IoT 5G and the secondary user IoT-5G, as well as the required transmission time of the data packets, considering that the secondary user IoT-5G is in motion. In order to achieve these objectives, a Simple Recursive Estimator (or SRE) is relied upon.

Keywords : 60 GHz, 5G, WLAN-IoT 5G, IoT-5G secondary user and SRE.

ملخص

يهدف هذا المشروع إلى تحسين أداء شبكة WLAN-IoT 5G ذات الموجة المليمترية في بيئة مزدحمة حول نطاق تردد لاسلكي 60 جيجاهرتز. ومع ذلك، نظرًا للتأثيرات العشوائية لتعدد المسارات والخبو، يمكن أن تتأثر طبيعة قناة الانتشار 5G، وهذا هو سبب ظهور الحلقة الأضعف من حيث نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR)، وبالتالي، يمكن أن يتدهور أداء شبكة WLAN-IoT 5G.

في الواقع، الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحسين ارتباط SNR للإشارة المستقبلية عند المستخدم الثانوي IoT-5G، والحد الأقصى لمعدل الإرسال من طرف إلى طرف بين نقطة الوصول WLAN-IoT 5G والمستخدم الثانوي IoT-5G، بالإضافة إلى وقت الإرسال المطلوب لحزم البيانات، مع الأخذ في الاعتبار أن المستخدم الثانوي IoT-5G في حالة حركة. من أجل تحقيق هذه الأهداف، يتم الاعتماد على مقدر تعاودي بسيط (أو SRE).

كلمات مفتاحية: 60 جيجا هرتز ، 5G ، WLAN-IoT 5G ، مستخدم ثانوي لـ IoT-5G و SRE.