

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

Université Mohammed Seddik Ben Yahia-Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electronique



Projet de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de
Master II en Télécommunication

Option : Systèmes des Télécommunications

Thème :

**Caractérisation et modélisation d'un canal radio
en bande millimétrique dans un milieu
industriel**

Présenté par :

M^{elle} Messaouda ZARA

M^{elle} Doha AFER

Encadré par :

Dr. Mohammed Zakarya ZAAIMIA

Promotion : Juin 2020.

Remerciements

Mes longues gratitudee sont réservées à ALLAH le plus compatissant et le plus miséricordieux qui nous a aidé dans nos études.

Nous adressons mes sincères remerciements à monsieur Z. ZAAIMIA qui à bien voulu assurer la direction de ce mémoire pour son soutien et ses précieux conseils aussi que son support moral pour tous nos programmes d'études.

Nous remercions vivement les membres de jury qui me feront l'honneur de juger ce travail.

Mes sincères remerciements iront aussi à toutes mes enseignants pour le savoir que nous avons acquis durant mes années d'études.

Nous voudrions également remercier chaleureusement tous ceux qui ont pu m'aider durant la réalisation de ce travail.

Enfin, nous exprimons mes profondes reconnaissances envers mes parents mes famille et tous mes amis.

Dédicace

Je dédie ce travail

*Mon Dieu de m'avoir donné le courage , et la pa-
tience,*

A mes très chers parents,

A mes sœurs bien aimées,

A mes chers frères,

À mes tantes et mes oncles,

A toute ma famille,

A tous mes amis et collègues,

A tous ceux qui me tiennent à cœur...

Messaouda



Dédicace

Je dédie ce travail

*À ma mère pour son amour, ses encouragements et
ses sacrifices,*

*À mon père pour son soutien, son affection et la con-
fiance qu'il ma accordée,*

À mon frère, mes sœurs et mon neveu Adem makin,

*À la mémoire de mes chères grands-mères et
grands-pères,*

À mes tantes et mes oncles,

À tous les membres de ma famille,

À tous mes amis,

À tous ceux qui m'aiment ...

2020



SOMMAIRES

REMERCIEMENTS.....	iv
DEDICACES	iv
SOMMAIRES.....	iv
LISTE DES FIGURES	iv
LISTE DES TABLEAUX	iv
GLOSSAIRE DES ACRONYMES	iv
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE 1 :

Généralités sur les ondes millimétriques et la 5G

1. Introduction	4
1.1 Ondes millimétriques.....	4
1.1.1 Potentiel des ondes millimétriques	5
1.1.2 Caractéristiques de propagation d'onde millimétrique.....	5
1.1.3 Standardisation de la bande millimétrique de 60 GHz :.....	8
1.2 La 5 ^{ème} génération	9
1.2.1 Définition	9
1.2.2 Le spectre de fréquence	10
1.2.3 Usage de la 5G.....	11
1.2.4 Standards de la 5G.....	12
1.2.5 Technologies de la 5G	13
1.2.5.1 L'utilisation des fréquences des ondes millimétriques.....	13
1.2.5.2 L'utilisation de petite cellules (Small-Cells).....	13

1.2.5.3 MIMO massif :	14
1.2.5.4 Antennes intelligentes et beamforming	15
1.2.5.5 La communication sans fil full-duplex	15
1.2.6 Domaine d'application de la 5G	16
1.3 Conclusion	16

CHAPITRE 2 :

Systemes et compagnes de mesure à 60 GHz

2.1 Introduction	17
2.2 L'état de l'art :	17
2.2.1 Standards à 60 GHz	17
2.2.2 Scénarios LoS et NLoS	20
2.2.3 Mesures, modélisation et caractérisation dans les milieux industriels	20
2.3 Caractérisation et modélisation du canal radio	22
2.3.1 Objectif du sondage, caractérisation, modélisation du canal radio	22
2.3.2 Technique de sondage du canal	23
2.3.2.1 Mesure à bande étroite	23
2.3.2.2 Mesure à large bande	23
2.3.3 Propriétés de la technique fréquentielle	26
2.4 Centre de données sans fils	27
2.4.1 Architecture d'un centre de données sans fils (WDC)	27
2.4.2 Objectif de transmission dans le centre de données sans fils	28
2.5 Mesure du canal de propagation WDC à 60 GHz	28
2.5.1 Etude du système SISO	28
2.5.2 Equipements et paramètres	29
2.6 Scénarios de mesure	31
2.6.1 Scenario XToR	32
2.6.2 Scenario NToR	33

2.7 Conclusion	33
----------------------	----

CHAPITRE 3 :

Caractérisation et modélisation d'un canal radio SISO

3.1 Introduction	34
3.2 Caractérisation du canal de propagation WDC 60 GHz.....	35
3.2.1 Caractérisation à grande échelle	35
3.2.1.1 Perte de trajet (Pathloss).....	35
3.2.1.2 Mesure et analyse des résultats.....	36
3.3.2 Modèle à deux trajets.....	39
3.3 Perte du trajet dans le cas XToR	43
3.3.1 Modèle log-distance :	43
3.3.2 L'ombrage ou évanouissement lent.....	45
3.4 Capacité du canal XToR.....	46
3.5 Synthèse des résultats	49
3.6 Conclusion.....	49
Conclusion générale	51
Liste des références	53
Résumé	

Liste des figures

Figures chapitre 1:

Figure 1.1: Atténuation spécifique de O ₂ et H ₂ O	6
Figure 1.2: Une illustration des différents mécanismes de propagation, à savoir réflexion spéculaire, diffusion diffuse et diffraction	7
Figure 1.3: Evolution des réseaux mobiles	9
Figure 1.4: Solution globale d'accès sans fil 5G consistant en l'évolution du LTE en combinaison avec une nouvelle technologie de radio accès	10
Figure 1.5: Spectre de 5G	10
Figure 1.6 : Canalisation de la bande autour de 60 GHz du standard IEEE.802.11ay.....	11
Figure 1.7: Différents catégories de 5G.....	12
Figure 1.8: Différents technologies de 5G	13
Figure 1.9: Réseaux à macro cellules et réseaux à petites cellules.....	14
Figure 1.10: Système MIMO en transmission multi-utilisateurs	14
Figure 1.11: Beamforming analogique.....	15
Figure 1.12: Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD.....	16

Figures chapitre 2 :

Figure 2.1 : Quatre canaux spécifiés de la norme 802.15.3c.....	18
Figure 2.2 : Technique de mesure dans le domaine fréquentiel	24
Figure 2.3 : Structure de WDC.....	27
Figure 2.4 : Exemple d'architecture WDC ou chaque rack correspond à un WTU.....	28
Figure 2.5: Canal SISO.....	29
Figure 2.6: VNA (AnritusMS-4647A)	29
Figure 2.7: Schémas d'un système de mesure par VNA.....	30
Figure 2.8 : Exemple de la magnitude d'une réponse fréquentielle	31

Figure 2.9: Les deux scénarios de déploiement de radio TOR 60 GHz	32
Figure 2.10 : Scénario XTOR.....	32
Figure 2.11 : Scénario NTOR.....	33

Figures chapitre 3 :

Figure 3.1 : Exemple de mécanisme de propagation des MPC	35
Figure 3.2 : Tables de positionnement de marque Velmex, utilisée pour régler la hauteur des antennes avec haute précision dans les axes xyz.....	37
Figure 3.3 : Schéma de canalisation de la bande autour de 60 GHz dans le monde [11]....	37
Figure 3.4 : Les pertes de trajets pour les six canaux	38
Figure 3.5 : Les pertes de trajets pour les cinq canaux agrégés.....	38
Figure 3.6 : La fonction de distribution cumulative (CDF) de β pour chaque position d'antenne Rx.....	41
Figure 3.7 Les caractéristiques de β en fonction de distribution cumulative (CDF) pour chaque positionnement d'antenne Tx et Rx dont le cas où scénario NTOR1	42
Figure 3.8 Présente les caractéristiques des paramètres β pour les cinq sous canaux en fonction de distribution cumulative (CDF) de scénario NTOR1	42
Figure 3.9 Les pertes de trajets de la bande de fréquence 8.64 GHz en scénario XToR	44
Figure 3.10 La fonction de distribution cumulative d'effet d'ombrage et la distribution normale en adéquation	46
Figure 3.11 Capacité du canal XToR en fonction des pertes en espace libre, et les pertes de modèle log-distance	48

Listes des tableaux

Tableau chapitre 1 :

Tableau 1.1: Standardisation de la bande de 60 GHz..... 8

Tableaux chapitre 2 :

Tableau 2.1: Réglage et paramètre du sondeur..... 30

Tableaux chapitre 3 :

Tableau 3.1: les paramètres utilisés pour calculer la perte de trajectoire 36

Tableau 3.2: les sous-bandes utiliser pour le calcul du scénario NTOR 37

Tableau 3.3: Paramètres du modèle à deux trajets 41

Tableau 3.4: Les valeurs du paramètre de modèle log distance 44

Glossaire des acronymes

BW	Bandwith
CDF	Cumulative distribution Function
CIR	Channel impulse Response
CTF	Channel Function Transfer
dB	Decibels
DC	Data Center
eMBB	enhanced Mobile Broadband
FDD	Frequency Division Duplex
FFT	Fast Fourier Transform
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ITU	International Telecommunication Union
Gbps	Giga bits per second
GHz	Gigahertz
GSM	Groupe spécial mobile
3GPP	3rd generation partnership project
5G	5 ^{ème} generation
LNA	Low Noise Amplifier - Amplificateur Faible Bruit
LoS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mmW	Millimeter wave bands
mMTC	massive Machine-Type Communication
MAC	Media access Control
MPC	Multi-Path Component
NR	New Radio
NR-U	New Radio-unlicensed
NLoS	Non Line of Sight
NToR	Neighbor ToR
OFDM	Orthogonal Frequency Division Modulation

PDP	Power Delay Profile - Profile de Puissance
PL	Path Loss
RF	Radio Frequency
Rx	Receiver
SISO	Single-Input Single-Output
SNR	Signal to Noise Ratio
TDD	Time Division Duplex
Tx	Transmitter
ToR	Top-of Rack
UWB	Ultra-Wideband
UHF	Ultra High Frequency
URLLC	Ultra-Reliable and low-latency
UIT	Union Internationale Telecommunications
UTI-R	Union Internationale Radio-Telecommunications
VNA	Vector Network Analyzer
WDC	Wireless Data Center
WIFI	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WTU	Wireless transmission unit
XToR	Cross-Aisle ToR

Introduction générale

Introduction générale

Contexte de l'étude

Dans le contexte actuel de la mondialisation des technologies et du savoir, le monde des télécommunications a connu un développement important, grâce à l'intégration des technologies sans fils et l'utilisation des ondes millimétriques à 60 GHz comme support d'information. Par ailleurs, l'environnement de propagation industriel indoor est différent par rapport à d'autres environnements classiques, par ses grandes dimensions et la présence des structures métalliques.

La caractérisation d'un canal de propagation nécessite une connaissance parfaite de ses propriétés, elle permet aussi de guider les choix d'architecture réseaux. En effet, l'évolution des performances d'un système de transmission sans fils est liée aux conditions de propagation entre les antennes d'émissions et de réceptions de l'environnement étudiée. Donc doivent être dimensionnés pour obtenir les meilleures parties des caractéristiques du canal radio et atténuer ses effets négatifs [1]. Malheureusement, la caractérisation du canal dans le cadre industriel est difficile et limitée, à cause de la structure et la nature de l'environnement étudié, ce qui entraîne des modèles qui passer par un sondage du canal de propagation et présentent sans doute les meilleures potentialités. On note que, l'estimation de la couverture du système radio et l'évaluation de la robustesse de la communication sont effectués par la modélisation des pertes en puissance par la propagation des ondes radio.

La technologie des ondes radio à 60 GHz est une technique la plus connue dans le champ des télécommunications sans fils. Cette bande satisfait pour les systèmes à très haut débit qui utilisent des ondes millimétriques autour de [1mm -10 mm], situés dans le spectre électromagnétique de 30 GHz jusqu'à 300 GHz. Elle offre des avantages majeurs tout en offrant une très bonne qualité de service. Il faut savoir aussi que l'implémentation de la technologie à 60 GHz dans les centres de données est une solution prometteuse pour assurer une transmission à haut débit entre les ToRs (Top of Rack), pour répondre aux besoins des utilisateurs en termes de la flexibilité, l'évolutivité, la rentabilité, et d'aider au dimensionnement des systèmes et d'éclairer les choix d'architecture réseaux [2].

Objectifs et plan de l'étude

L'objectif de cette étude porte sur la caractérisation et la modélisation du canal radio à bande millimétrique dans un centre de données indoor, afin de proposer des modèles de canal adaptés aux futurs systèmes à base de la technologie à 60 GHz et introduire des réseaux locaux sans fil WLAN (Wireless Local Area Network) pour communications à des distances inférieures à 10 m à l'intérieur des centres de données. Cette application sans fil forme une force motrice pour une liaison haut débit et fournis aux utilisateurs des connexions de réseau fiable avec grande vitesse.

Pour atteindre ces objectifs, des traitements statistiques des mesures du canal de propagation ont été effectués pour des scénarios différents, scénario NToR (Neighbor ToR) c-à-d la communication entre les racks contigus voisins en visibilité directe (LOS), et le scénario XToR (Cross-Aisle ToR) qui est la communication en visibilité directe entre deux ToR différents séparés par une allée sur une bande passante allant de 57 GHz à 70 GHz. Une caractérisation du canal en scénario NToR à deux trajets (le trajet réfléchi et le trajet direct LOS) a été effectuée en fonction des hauteurs des antennes Tx et Rx afin d'étudier l'influence de positionnement des antennes sur les pertes des trajets du canal de propagation. À notre connaissance, ce travail est le premier à traiter les gains et les pertes induits par les réflexions de premier ordre dans le cas de communications NToR. Une autre caractérisation du canal SISO (Single Input Single Output) en scénario XToR a été effectuée pour modéliser les pertes du trajet en fonction de la distance entre les antennes Tx et Rx.

Ce mémoire est constitué de trois chapitres, qui reprennent les étapes de notre démarche :

Le premier chapitre est un rappel sur les fondements de la bande millimétrique et la 5^{ème} génération. La première partie introduit la bande millimétrique à 60 GHz et présente les caractéristiques liées à la propagation, les normes et les standards. Nous décrivons ensuite comment arriver à la 5G, et nous citons les différents usages et le spectre de la bande de fréquence 57 GHz à 70 GHz, ainsi que les différentes technologies utilisées.

Le deuxième chapitre comporte un état de l'art sur la caractérisation et la modélisation dans les environnements existants. Ce chapitre décrit aussi les campagnes de mesures effectuées en laboratoire pour les cas d'usage des centres de données ainsi que l'équipement et les scénarios de mesures.

Le dernier chapitre de ce mémoire aborde la caractérisation des paramètres du canal SISO (Single Input Single Output) à 60 GHz, et décrit aussi les modèles statistiques qui ont été développées, et donne les résultats nécessaires de la caractérisation et la modélisation.

Enfin, une conclusion générale débouchant sur une série de recommandations et de perspectives termine ce mémoire.

Chapitre 1 :
Généralités sur les ondes millimétriques et la 5G

1 Introduction

La communication sans fil à onde millimétrique est apparue depuis longtemps pour améliorer la capacité et le taux de données de l'ordre de Gigabit/s. De manière inhérente, la demande croissante de la bande passante et la saturation des ressources spectrales font l'objet de nombreuses recherches consacrées pour assurer une transmission de données avec une faible latence et un haut débit, en utilisant des fréquences élevées de [30 GHz-300 GHz], associées à des ondes millimétriques de [1mm-10mm] pour satisfaire les futurs besoins des clients [3]. La communication à onde millimétrique est une partie importante de la 5^{ème} génération pour fournir des services de haute qualité.

Ce chapitre est consacré dans un premier temps à des généralités sur l'onde millimétrique, ensuite on présentera quelques propriétés et les standards de normalisation de la propagation d'onde millimétrique. Dans un deuxième temps nous aborderons la 5^{ème} génération, son usage, son spectre, et les différentes technologies de la 5G.

1.1 Ondes millimétriques

La bande millimétrique est une bande du spectre électromagnétique correspondant à des longueurs d'onde entre [1 mm-10mm] à une propagation sur la plage de fréquence de [30 GHz-300GHz]. En effet, la communication par les ondes millimétriques est une solution d'un avenir proche pour la transmission des réseaux cellulaires mobiles sans fil, les réseaux locaux sans fil, les réseaux personnels [4].

Nous allons lister succinctement les avantages et les inconvénients d'une utilisation de ces bandes millimétriques :

- L'utilisation d'une large bande passante de (30 GHz-300 GHz) par rapport aux autres ondes radio des réseaux sans fil.
- Faisceaux étroits : avec la même taille d'antenne, il est possible d'emballer plus d'éléments d'antenne aux fréquences mmW .
- Elle offre au moins une bande passante continue de 5 GHz au monde dans le cas de certaines bandes, comme la bande autour de 60 GHz.

Malgré ces avantages, la bande millimétrique fait face à certains inconvénients comme :

- Une courte portée.
- Une grande atténuation.

- Les ondes millimétriques sont absorbées facilement par le feuillage et les bâtiments, les pertes de puissances sont provoquées par les matériaux comme la brique, les vitres teintées, les murs intérieurs et les cabines.

1.1.1 Potentiel des ondes millimétrique

La pénurie de spectres millimétrique a déclenché des études et des efforts industriels pour utiliser des larges bandes de fréquences à des longueurs d'ondes très petites qui n'ont pas été utilisées auparavant ; combinées avec la technologie CMOS RF à faible puissance, permettant l'emplacement d'un grand nombre (≥ 32 éléments) d'antennes miniaturisées dans des petites surfaces [5].

La communication sans fil des ondes millimétriques souffre des caractéristiques de propagation, telles que les effets des pertes de trajet, l'effet d'ombrage, ainsi que de diverses atténuations importantes en raison d'obstructions. Pour cela les techniques associées à l'augmentation des fréquences diminuent l'impact de ces pertes, telles que les antennes directionnelles à gain élevé (formations des faisceaux, systèmes entrées multiples sorties multiples (MIMO)). Ces techniques doivent être modélisés pour garantir une transmission fiable [6].

Ce potentiel d'intérêt récent a conduit ces dernières décennies à des travaux considérables sur les systèmes cellulaires à ondes mmW. Autant dans l'industrie, les compagnes de mesures ont été lancées afin d'obtenir les caractéristiques spatiales et temporelles des bandes de fréquences mmW et développer des nouvelles techniques et procédures en bandes 60 GHz.

En outre, les spectres des fréquences millimétriques envisagent un grand nombre d'applications telles que : radioastronomie, radar, militaire, communication par satellite, pour les réseaux sans fil commerciaux, dans les environnements industriels à courte portée, communication point à point (ptp), et utilisée dans de la 5G.

1.1.2 Caractéristique de propagation des ondes millimétriques

Avant d'exploiter l'architecture d'un réseau, il faut tout d'abord prendre en compte les caractéristiques de propagation des ondes millimétriques. Les ondes millimétriques souffrent d'une perte de propagation par rapport aux autres ondes radio à basse fréquence, on note l'atténuation atmosphérique, les pertes en espace libre, les mécanismes de propagation qui limitent la propagation de ces ondes, sont définies comme suit :

➤ Pertes en espace libre

On parle d'un milieu de propagation comme un espace libre lorsque l'espace entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice doit être libre, c'est à dire; nous ne trouvons aucune source ou objet perturbant pendant la transmission du signal entre les deux antennes. Dans une zone d'ouverture fixe, une augmentation de fréquence provoque un affaiblissement en propagation des ondes millimétriques. Les signaux transmis en espace libre subissent une décroissance de puissance. La relation de perte en espace libre avec la fréquence de porteuse et la distance est proportionnelle.

➤ Atténuation atmosphérique

Un autre facteur est compté comme un effet qui perturbe la propagation des ondes millimétriques : c'est l'atténuation atmosphérique ou bien l'atténuation gazeuse. Cet effet naturel est causé quand les ondes radio rencontrent les molécules d'airs, et une partie de l'énergie de ces ondes est absorbée par les molécules, et génère une vibration proportionnelle à la fréquence porteuse.

Les ondes millimétriques sont absorbées par deux gaz, l'oxygène (O_2) et la vapeur d'eau (H_2O). D'un autre côté l'absorption de chaque gaz est différente, elle dépend des facteurs comme : la température, la pression, l'altitude et la fréquence porteuse . L'absorption d' O_2 pour la bande de fréquence 60 GHz vaut 15 dB/Km. Dans le cas général en courte distance, l'impact de l'atténuation atmosphérique en bande millimétrique est négligeable. La figure (1.1) représente l'atténuation spécifique de O_2 , H_2O en fonction de la fréquence.

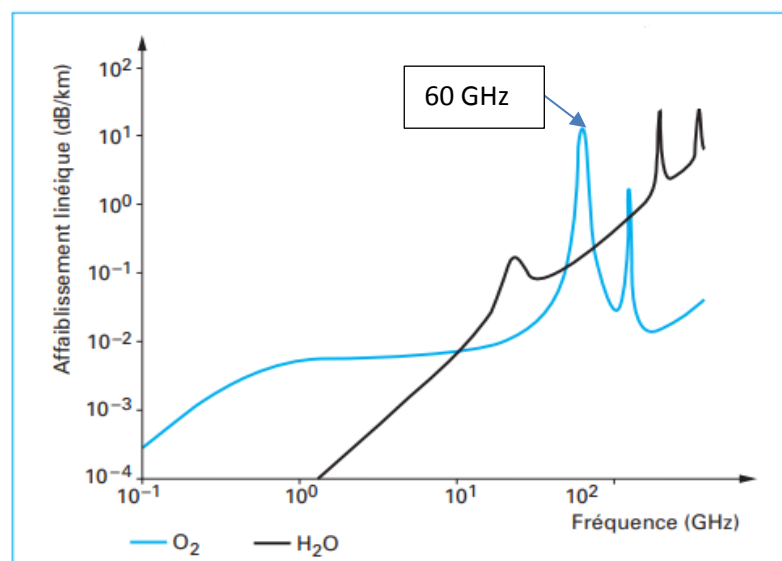


Figure 1.1: Atténuation spécifique de O_2 et H_2O en fonction de la fréquence.

➤ Mécanismes de propagation

En raison de courte longueur d'onde [1 mm-10mm], les signaux en mmW subissent divers mécanismes de propagation qui sont illustrés sur la figure (1.2), tels que la réflexion spéculaire du rayon, la diffusion, et la diffraction. Ces mécanismes sont radicalement différents de ceux des basses fréquences, donc ils doivent être soigneusement étudiés et modélisés.

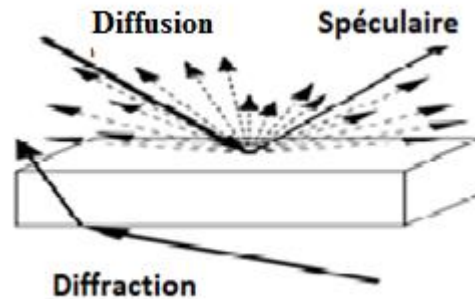


Figure 1.2 : Illustration des différents mécanismes de propagation, à savoir réflexion spéculaire, diffusion et diffraction [6].

Diffraction

La diffraction est le mécanisme de propagation des signaux radio, elle se produit lorsqu'un lien est bloqué par un obstacle possédant des arrêts, le signal dans ce cas est se propage presque dans toutes les directions de l'espace. On constate que la transmission par ce phénomène peut avoir lieu, en absence de visibilité directe (NLoS).

Réflexion et pénétration

Le canal de propagation à ondes millimétriques des environnements intérieurs et extérieurs est riche par la réflexion de nombreux matériaux malgré l'existence de diffraction et son effet négatif sur la puissance reçue au récepteur.

Dans le cadre de réalisation sur les fréquences 28, 38, 60 et 73 GHz, en observant plusieurs obstacles qui provoquent des pertes de trajets multiples sur les objets naturels et synthétiques. Nous citons parmi eux le corps humain, les murs des bâtiments, les lampadaires et les arbres.

Il existe d'autres obstacles qui causent des propagations des signaux à trajets multiples tels que le feuillage, les murs métalliques, les cages d'ascenseur, les bâtiments externes et les fenêtres externes modernes.

Alors pour créer des relations variables entre les divers environnements d'exploitation une clé des futurs systèmes à onde millimétrique est définie pour bien déterminer et traiter les composants multi trajets directs, réfléchis et dispersés les plus solides [4].

Diffusion

La diffusion est un phénomène de propagation qui apparait à cause des petites caractéristiques structurelles de taille comparable aux longueurs d'onde millimétriques, où chaque rayon réfléchi à une direction de réflexion différente conduisant à une réception de puissance dispersée, et à une plus faible réflexion spéculaire de surface.

Absorption

Les ondes millimétriques comparées aux radiofréquences utilisées en téléphonie mobile sont absorbées par les tissus sur une très faible profondeur, donc essentiellement au niveau de la peau. Ceci se traduit par une forte absorption d'énergie, même pour des valeurs de puissance incidente inférieures aux normes limites. Ainsi, plus de 95% de l'énergie est absorbée par la peau, ce qui fait de cet organe la principale cible des OMM et sûrement le point de départ des effets biologiques potentiels. Or, la peau n'est pas une barrière isolée du reste de l'organisme ; elle contient des vaisseaux sanguins et des terminaisons nerveuses qui communiquent avec l'ensemble du corps.

1.1.3 Standardisation de la bande millimétrique de 60 GHz

En raison du grand potentiel des communications mmW, des normes de l'industrie qui ont le rôle de développer la technologie de communication sans fil à 60 GHz, tels que IEEE 802.11ad, IEEE 802.15.3c, et ECMA-387. Le tableau (1.1) représente les trois principales normes et ses paramètres :

Tableau 1.1 Standardisation de la bande de 60 GHz.

Paramètres	IEEE 802.15.3C	ECMA-387	IEEE 802.11ad (OFDM)
Longueur de bande occupée	2.16 GHz	1.904 GHz	2.16 GHz
Nombre de sous – porteuse	512	512	512
Durée de FFT /IFFT	193.9 ns	197.53 ns	193.9 ns
Durée de préfixe cyclique	24.24 ns	24.70 ns	48.5 ns
Nombre de sous-porteuses données	336	360	336
Nombre de sous-porteuses DC pilote (Estimation de canal)	16	16	16
Nombre de sous-porteuses nulles	3	3	3
Type de modulation	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM	BPSK, SQPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM

1.2 La 5^{ème} génération

Cette partie vise à décrire le contexte actuel des communications de la 5^{ème} génération. La figure (1.3) représente l'évolution des réseaux mobiles.



Figure 1.3 : Évolution des réseaux mobiles [3].

L'idée de la 5G a commencé à se former en 2012 par le projet « télécommunications mobiles internationales (IMT) à l'horizon 2020 et au-delà » de l'UIT. En septembre 2015 UIT-R fait ses dernières retouches sur le projet de l'UIT pour utiliser la 5G.

Elle a été développée pour les systèmes de communication large bande et de faible latence [7], et offre à ses opérateurs un débit de données important, une très haute vitesse et une capacité élevée. Cette génération n'est pas considérée comme juste une technologie inventée, mais aussi comme un écosystème technologique de réseau sans fil. De plus nous pouvons dire que de passer d'une ancienne génération comme 3G et 4G vers la 5G signifie un changement à une capacité plus poussée que les autres générations.

1.2.1 Définition

La 5G est un élément de future communication qui utilise les bandes millimétriques pour la transmission des données, c'est-à-dire les bandes de fréquences (entre 6 GHz-300 GHz). Elle est basée sur la 4^{ème} génération avec une large bande passante de service et d'application sans fil comme le montre la figure (1.4). Le but de cette nouvelle génération est de donner une plateforme flexible pour de nouvelles analyses de modèle intégrant des industries verticales comme l'automobile, la fabrication, la cyber santé et divertissement.

Le réseau est découpé en domaine technologique comme réseau central, réseau transport, et d'accès ainsi que le domaine administratif, et commercial des différentes industries.

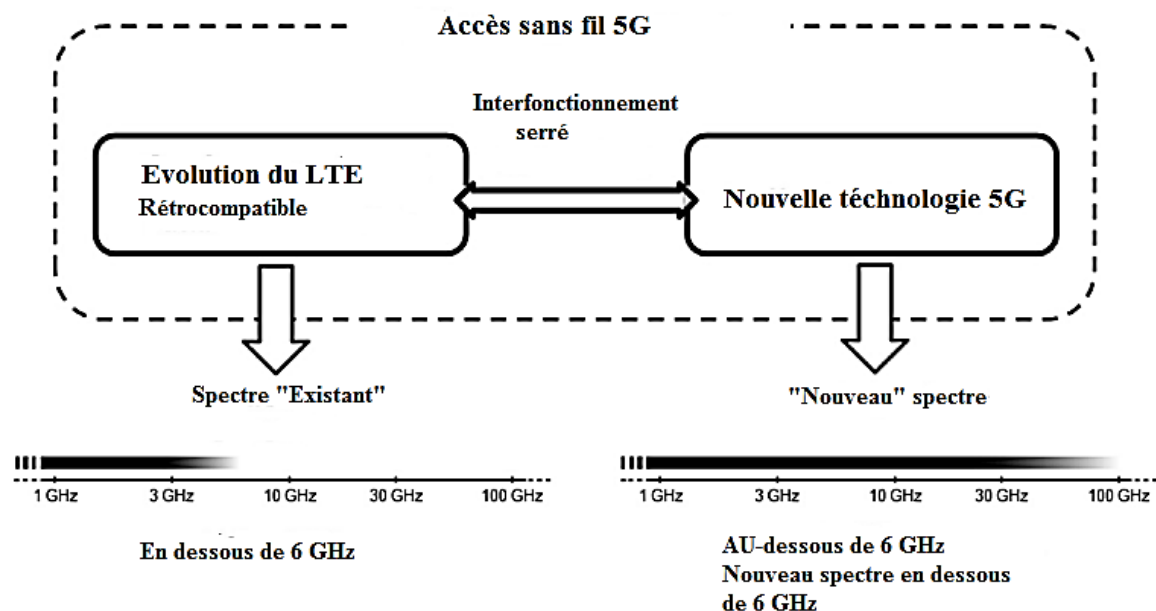


Figure 1.4 Solutions globales d'accès sans fil 5G : évolution du LTE en combinaison avec une nouvelle technologie d'accès radio 5G [8].

1.2.2 Le spectre de fréquence

L'Access mobile 5G permet d'augmenter les volumes de données mobiles pris en charge, la grande fiabilité, la faible latence, la quantité d'information, la qualité et l'efficacité d'utilisation du spectre sera un facteur de succès pour la 5G. Le spectre de fréquence de haut débit mobile entre « 6 GHz- 100GHz », avec une capacité des trafics de réseau mobile 1000 fois plus élevée que des autres technologies, la figure (1.5) montre le spectre de fréquence spécifié pour la 5G.

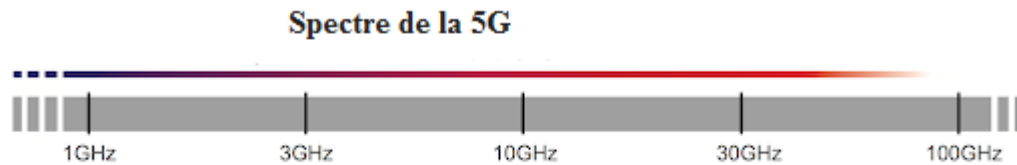


Figure 1.5: Spectre de fréquence spécifié pour la 5G.

On note que la demande encore plus élevée de débit nécessite d'exploiter la bande autour de 60 GHz dans le standard 5G NR-U (New Radio Unlicensed). La figure (1.5) et (1.6) montre la canalisation de la bande autour de 60 GHz du standard IEEE 802.11ay.

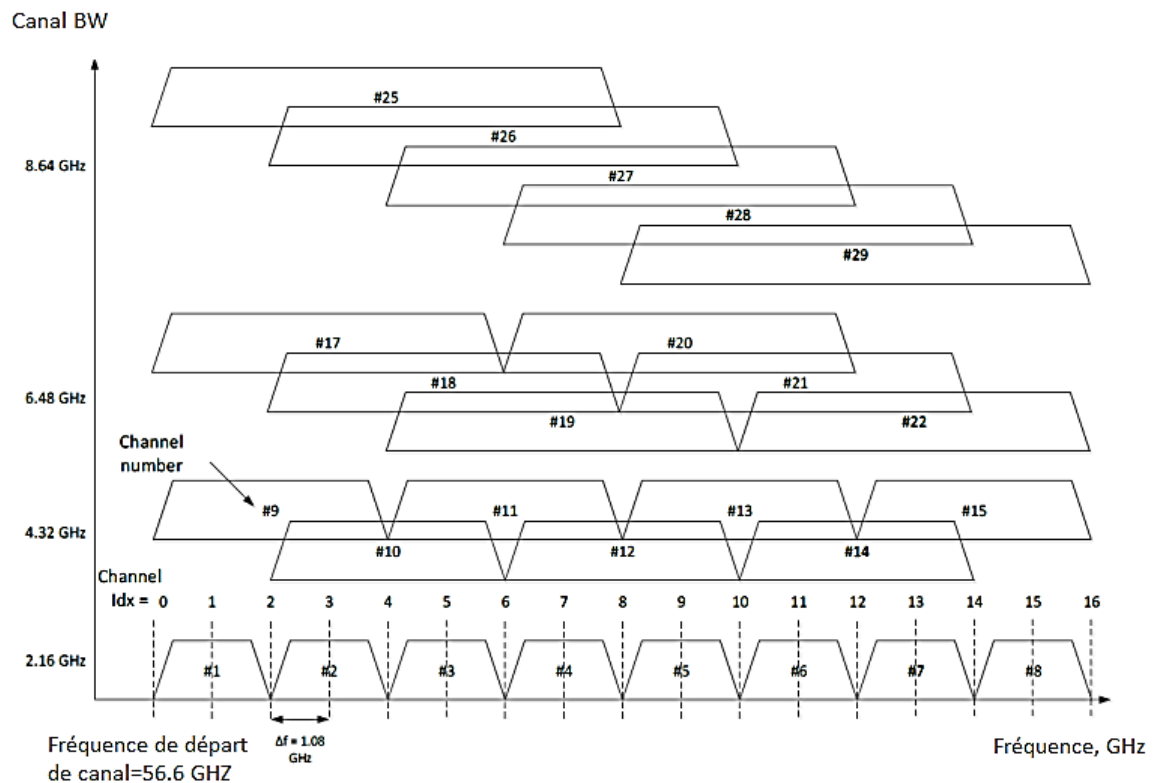


Figure 1.6: Canalisation de la bande autour de 60 GHz du standard IEEE 802.11ay [9].

1.2.3 Usages de la 5G

L'UIT a publié le diagramme (coin triangle) illustré dans la figure (1.7) pour identifier les services 5G. Les cas d'usages significatifs contiennent les services à venir des 5G (eMBB, mMTC, URLLC) [10] :

- eMBB : (enhanced Mobile Broadband) correspond à une évolution plus simple des services mobiles d'aujourd'hui : pour augmenter le débit de transmission de 2 Mbit/s jusqu'à 10 Gbit/s, permettant d'accroître le volume des données, l'utilisation dans les villes et industrielles intelligentes, internet of thing.

- mMTC : (massive Machine-Type Communication) est pour les applications sensibles correspond aux services caractérisés par un nombre massif de périphériques, par exemple des capteurs distants, les opérations médicales, des actionneurs et une surveillance de divers équipements pour un faible coût de périphérique, une consommation d'énergie très faible permettant une très longue validité de la batterie d'au moins plusieurs années.
- URLLC : (Ultra-Reliable and low-latency) sont les services de communication ultra faible pour le besoin critique avec une très faible latence et une fiabilité élevée, par exemple la sécurité de la circulation, contrôle automatique de l'automatisation d'usine.

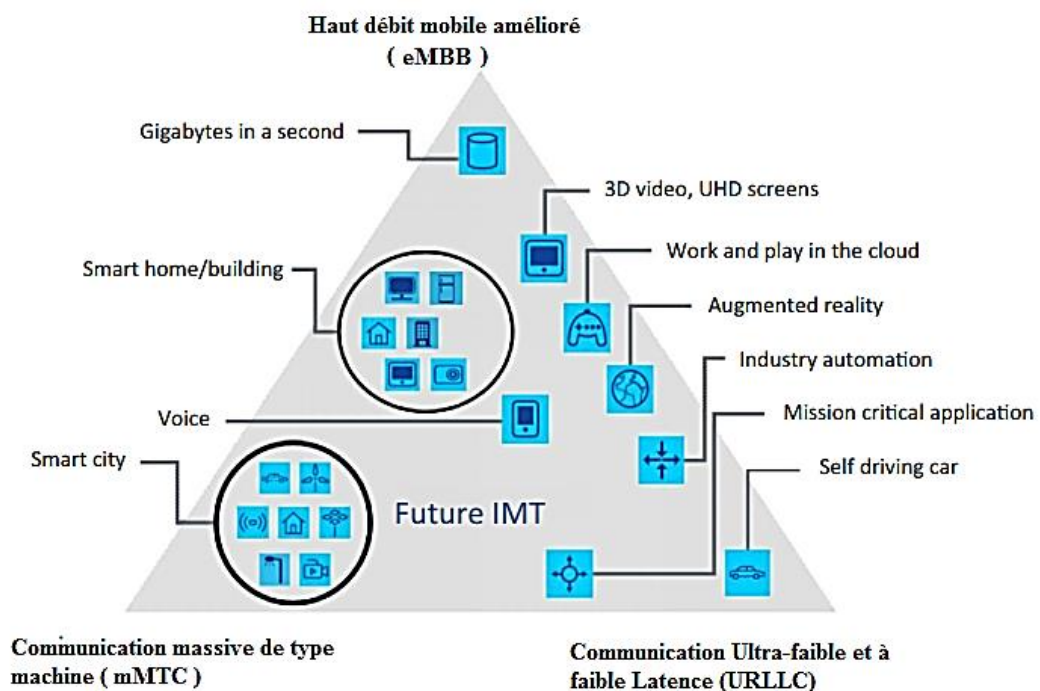


Figure1.7 : Différentes catégories de 5G [8].

1.2.4 Standards de la 5G

Les activités de normalisation de la 5G dans l'ITU, 3GPP, IEEE sont représentées ci-dessous :

- UTI-R : est un groupe de travail qui dirige le standard de radio communication de l'UIT-R en 2012 pour objectif de développer des exigences pour une interface de communication mobile 5G.
- IEEE : est un organisme de l'institut des ingénieurs électriciens et électroniciens qui permet de traiter les réseaux métropolitains, IEEE 802.15 pour les réseaux personnels sans fil (WPAN), IEEE 802.11 une norme de Gbit (IEEE 802.11ac pour les hautes fréquences), (IEEE 802.11ad et 802.11ay pour les ondes millimétriques de 60 GHz).

- 3GPP : est l'organisation de communication mobile qui a mis les spécifications techniques pour la 2G GSM, 3G, 4G LTE et 5G NR [8]. Les technologies 3GPP sont les plus largement déployées au monde.

1.2.5 Technologies de 5G

Les réseaux mobiles 5G devraient avoir une capacité de système énorme, moins de latence, et environ 1000 fois plus de dispositifs par kilomètre carré, entre autres exigences [11]. Pour satisfaire ces exigences, la figure (1.8) présente les différentes technologies pour les réseaux 5G.



Figure 1.8: Différente technologie de 5G [12].

1.2.5.1 L'utilisation des fréquences des ondes millimétriques

Les communications sans fils présentent des applications importantes aux utilisateurs et considérées comme une solution possible. Grâce à leur débit élevé et aux performances élevées ce qui satisfait les demandes des clients [12]. D'une manière générale, un système de haut débit exige l'existence d'une large bande passante, et donc une fréquence de porteuse plus élevée [12]. À cause de la saturation des autres bandes de fréquence, plusieurs recherches ont été faites pour choisir une bande passante plus large. La bande millimétrique est la solution possible qui correspond à des fréquences de 30 GHz à 300 GHz et une longueur d'onde de 1mm à 10 mm. Le secret est de choisir la bande millimétrique dont la largeur et la puissance sont élevées ce qui implique des fréquences élevées.

1.2.5.2 Utilisation de petite cellule (small-cells)

À cause de l'utilisation de la bande millimétrique pour la transmission des données à grand débit, le fait que les ondes millimétriques soient bloquées par les obstacles, l'utilisation des petites cellules (small cells) est la solution optimale qui devrait améliorer la couverture, la qualité et la capacité de service réseau grâce à la petite zone de couverture comparés aux macros cellules (Voir la figure (1.9)).

Par ailleurs, chaque cellule a la propriété d'avoir un rayon de couverture réduit, et aussi d'améliorer l'efficacité énergétique afin de garantir un débit de données plus élevé à ses utilisateurs [13].

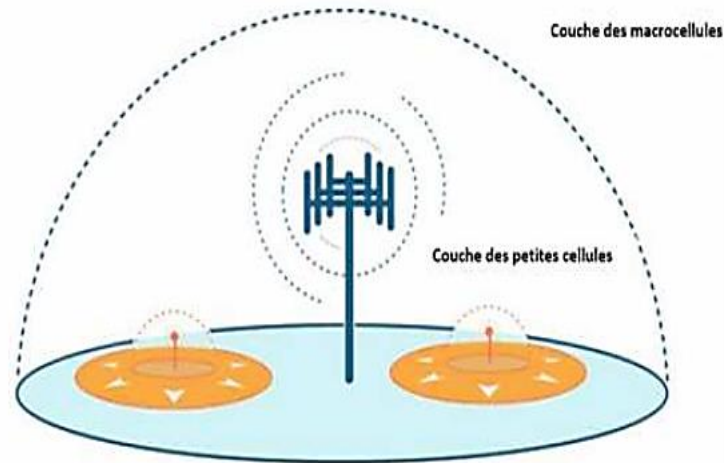


Figure 1.9 : Réseaux à macro cellules et réseaux à petites cellules [3].

La densification des zones de couvertures avec ces small cells dans les milieux urbains rentre pleinement dans les besoins actuels de la 5^{ème} génération pour améliorer leurs réseaux et supporter ces forts débits.

1.2.5.3 MIMO massif

Le MIMO massif est une technologie qui sert à la multiplication de nombre de canaux entre les antennes, comme montré sur la figure (1.10). Le principe de base de cette technologie consiste à augmenter le nombre de réseau d'antennes au niveau de la station de base qui transmet simultanément aux différents terminaux. La communication MIMO se fait par deux formats : la diversité spatiale et le multiplexage spatial :

- La diversité spatiale transmet les mêmes données sur des chemins différents par plusieurs antennes, et le récepteur reçoit des données traitées.
- Le multiplexage spatial : les données sont découpées en petites parties et envoyées par différents chemins, dans cette technique le débit augmente, mais à moindre fiabilité.

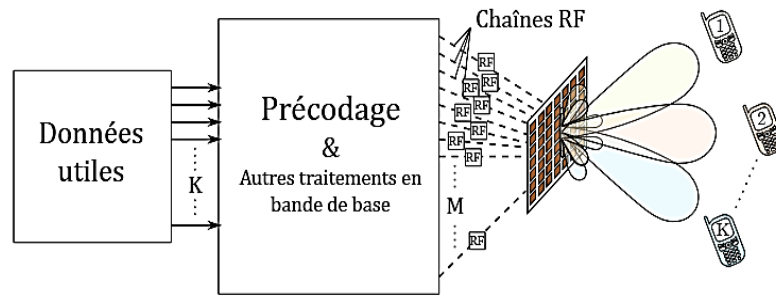


Figure 1.10 Système MIMO en transmission multi-utilisateur [13].

1.2.5.4 Antennes intelligente et beamforming

Le terme smart antennas est constitué d'un grand nombre d'antennes miniaturisées dans le but d'offrir un débit de données important et une capacité élevée de système de communication actuelle.

Cette technique gère la focalisation des faisceaux dans une direction donnée (beamforming), par le regroupement des mêmes flux de données de plusieurs antennes qui fait évoluer dynamiquement le diagramme de rayonnement, et augmenter l'efficacité de signal, moins de consommation d'énergie, et gérer les interférences et les évanouissements liés à des trajets multiples [13].

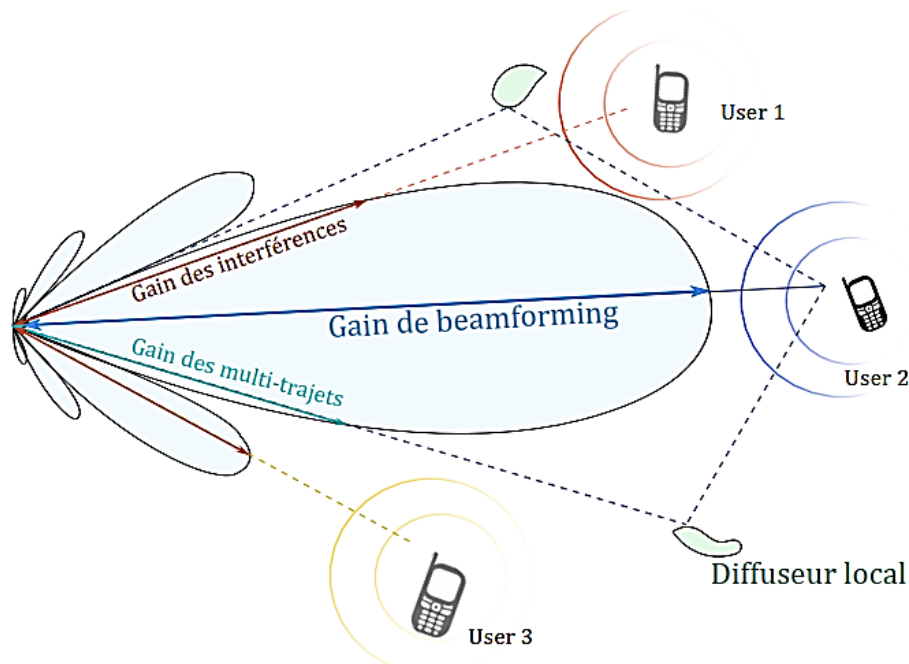


Figure 1.11 : Beamforming analogique [13].

1.2.5.5 Communication sans fil full-duplex

L'émission et la réception des données dans les systèmes des réseaux mobiles classiques se font dans des différentes bandes de fréquences en FDD-duplexage en fréquences, ou en TDD-duplexage en temps.

La communication full-duplex permet de limiter les interférences entre les stations radio, macro et small cells, et les terminaux d'une façon d'utiliser une seule fréquence pour assurer simultanément l'émission et la réception des données [12]. La figure (1.12) est une représentation full-duplex, comparée au FDD et TDD .

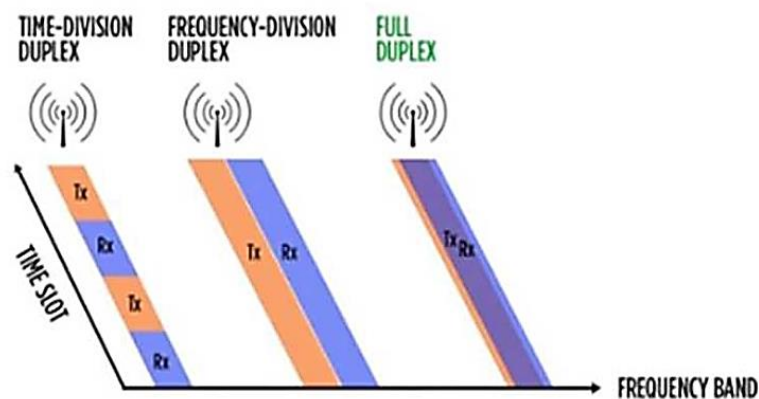


Figure 1.12: Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD [3].

1.2.6 Domaines d'applications de la 5G

La technologie 5G possède des pas de transformations immenses afin de faciliter nos vies. En effet, les systèmes de la 5^{ème} génération deviennent indispensable pour satisfaire les demandes des personnes qui utilisent une quantité importante de données dans le transport, l'automobile, les services public, interopérabilité et intégration, soin de santé...etc.

1.3 Conclusion

Avec l'explosion des nouveaux systèmes de communication, les bandes mmW deviennent une solution prometteuse pour les réseaux mobiles de 5G afin d'augmenter la capacité du canal. La saturation des bandes passantes a obligé les chercheurs de trouver une nouvelle bande plus large. Les ondes millimétriques avec ses riches avantages comme les fréquences élevées et ses larges bandes passantes sont devenues une technologie du siècle pour les nouvelles générations mobiles, grâce à sa longueur d'onde petite. Ces fréquences peuvent utiliser des nouvelles techniques comme le massif MIMO et la formation des faisceaux.

La 5G est une nouvelle génération comptée comme une révolution de la communication mobile sans fil. Il est noté que le réseau cellulaire 5G présente des défis par rapport aux anciennes générations, par une capacité et un débit plus élevé, une latence plus faible, une connectivité massive des appareils, une réduction des coûts et une qualité d'expérience cohérente.

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques de la bande mmW pour les communications Gigabits, ensuite nous avons présenté la 5^{ème} génération de communication mobile. Cette génération est utilisée pour des communications à faible latence.

Chapitre 2 :
Systemes et compagnes de
mesure à 60 GHz

2.1 Introduction

La technologie sans fil dans l'environnement industriel est devenue l'axe principal sur laquelle se base la révolution actuelle afin de traiter les problèmes du câblage en termes de la fiabilité, l'efficacité énergétique ainsi que la flexibilité [14]. D'un côté, l'utilisation de plusieurs câbles provoque des blocages, et des risques entre les machines. D'un autre côté, cette nouvelle technologie répond aux débits de données offerts par les normes câblées afin de passer vers une connexion sans fil rapide pour l'usage industriel.

Dans les dernières années la communauté des chercheurs à améliorer divers modèles du canal citant des scénarios spécifiques pour la technologie mmW, pour maîtriser les propriétés temporelles et spatiales du canal. Plusieurs compagnes de mesures ont été lancées afin de développer nouvelles méthodes. Des recherches ont été effectuées sur différentes bandes telles que la bande 30 GHz, 44 GHz, 50GHz [15], les premiers travaux ont été effectués sur les fréquences autour de 60 GHz en raison de leur utilisation pour les systèmes à courte portée dans les réseaux cellulaires 5G, et pour les réseaux mobiles à large bande.

Ce chapitre s'articule de la façon suivante : la première section est consacrée à l'étude de la caractérisation et la modélisation du canal radio, nous donnons une définition des différents types des standards ainsi que les techniques de sondage. Pour la deuxième section, nous nous intéresserons à la description du centre de données et la procédure utilisée. Dans la dernière section, nous établirons une revue sur le système et les scénarios de mesures effectuées dans un laboratoire.

2.2 Etat de l'art sur les standards, mesures, caractérisation et modélisation dans les environnements industriels

2.2.1 Standards à 60 GHz

La réalisation des circuits en fréquences millimétriques fait partie des derniers avancements microélectroniques, ces avancements conduisent à l'ouverture d'une bande sans licence de 60 GHz, et permet de garantir une souplesse dans la conception de systèmes RF, à cause de l'absence des contraintes de norme.

Par la suite nous parlerons des principales normes de la bande 60 GHz, et on se focalisera sur la norme 802.15.3c, puis on étudiera aussi les normes 802.11ad et 802.11ay.

IEEE 802.15.3c

La norme 802.15.3c pour les applications WPAN (Wireless Personal Area Network) dans le domaine millimétrique est spécifiée pour les grandes distances, elle définit la couche de contrôle (MAC) et la couche physique (PHY) [16]. Il y a deux possibilités différentes inclut pour la couche MAC, une pour les algorithmes des formations de faisceaux, et l'autre pour les réseaux d'antennes à 60 GHz pour avoir un gain élevé dans une direction arbitraire.

Les modes principales établis dans la norme IEEE 802.15.3c sont :

Le mode à seule porteuse (SC PHY) est basé sur les schémas de modulation mono porteuse afin de fournir trois classes de communication pour la partie codage soit pour un code RS (Reed-Solomon) ou un code de contrôle de parité LDPC (Low-Density Parity-Check). En donnant pour la première classe un débit supérieur à 1.5 Gbit/s, pour la communication mobile à faible coût, et pour la 2^{ème} classe un débit de 3 Gbit/s, enfin un débit supérieur à 5 Gbit/s pour les applications à hautes performances.

Le mode d'interface à haute vitesse (HSI PHY) basé sur la modulation multi porteuse OFDM, pour fournir un débit supérieur à 7 Gbit/s.

Le mode Audio Visual (A/V PHY) fournit deux classes : Une classe pour la transmission audio/vidéo non compressée à un débit de 3 Gbit/s, et d'autres modes à faible débit A/V PHY omnidirectionnel qui utilisent la modulation OFDM avec un codage convolutif intérieur et un codage RS.

De plus, un autre mode CMS (Common Mode Signalisation) établi par cette norme, c'est un mode de signalisation qui utilise le mode mono porteuse à un débit faible pour couvrir presque toutes les applications WPAN à 60 GHz, la figure (2.1) illustre les différents canaux du standard 802.15.3c.

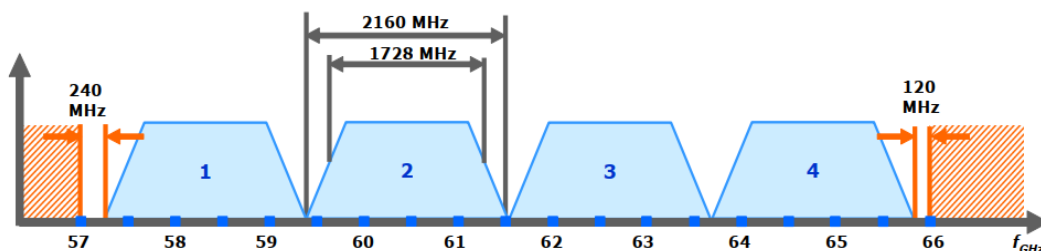


Figure 2.1: Quatre canaux spécifiés de la norme 802.15.3c [16].

IEEE 802.11ad

La norme 802.11ad est créée depuis 2013, c'est une évolution de la norme 802.15.3c pour les applications à courte distance. Elle présente les principes fondamentaux des

systèmes Wi-Fi afin de modifier les couches physiques et de la liaison, ainsi surmonter les défis reliés à la propagation des ondes millimétriques par l'intégration des nouvelles techniques et procédures. Ces nouveaux usages comprennent la synchronisation sans fil instantanée, l'échange de fichiers multimédias à haut débit entre les appareils mobiles sans infrastructure de réseau fixe et le remplacement de câbles sans fil, par exemple pour se connecter à des écrans sans fil haute définition [17]. La norme 802.11ad est utilisé pour les systèmes sans fil mono-antenne (SISO), et offre un débit de transmission d'environ 8 Gbit/s sur un canal de 2.16 GHz de bande passante [16,18].

IEEE 802.11ay

Le standard 802.11ay parmi les nouvelles normes WIFI, est initié en 2017, c'est l'extention de la norme IEEE 802.11ad qui fonctionne dans la bande 60 GHz. Elle présente une nouvelle description de la couche physique. Elle utilise la modulation OFDM par la division orthogonale des fréquences pour assurer la transmission entrée multiple sortie multiple(MIMO), cette norme spécifie pour les bandes passantes allant de 2.16 GHz à 8.64 GHz, et définit un débit de transmission avec différents modes jusqu' à 100 Gbit/s [16, 19].

La bande 60GHz sans licence peut fournir un spectre de 7 GHz dans la plupart des régions du monde, cette bande a été prévue par le standard IEEE 802.11ad dans le but de créer une couche de contrôle d'accès physique MAC (Media access Control).Par conséquent la demande de haut débit nécessite d'explorer des bandes de fréquences encore plus élevées [15]. C'est pour cela la technologie cellulaire à ondes millimétriques peut être insuffisante pour supporter les scénarios à grande bande passante dans les environnements extrêmes.

Standards 5G mobile

La communication 5G est orientée pour des nouvelles applications telles que les trafics urbains de véhicules autonomes [19], la santé électronique [20], stade de football [19], les drones [19], l'automatisation de l'industrie comme les centres de données [21], les mines souterraines [22]. Ces applications à haut débit nécessitent des demandes plus élevées de connectivité, latence ultra-faible et fiabilité élevée que ceux déployés dans les applications sans fil d'aujourd'hui. Pour répondre à ces exigences, la 5G est obligée de chercher à des larges bandes passantes telles que les bandes 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz, et 73 GHz, et en particulier pour les bandes 28, 38 et 60 GHz.

La bande 28 GHz a été prévue en 2017 aux États-Unis, elle comporte une liaison descendante et une liaison montante avec une signalisation de modulation 64-QAM, cela se traduit par une large bande passante RF (RFBW (Radio Frequency Bandwidth)).

La bande 38 GHz fait partie à la gamme de fréquences 2 (FR2) d'une courte portée et une bande passante élevée. La bande 38 GHz appartient aux bandes Ka avec une liaison montante de 37 GHz, une liaison descendante 40 GHz, et une bande passante de 50, 100, 200, ou 400 MHz. Cette bande utilise le mode duplexage par répartition dans le temps TDD (Time Division Duplexe).

Depuis mars 2017, le standard 3GPP (3rd generation partnership project) a évolué la nouvelle radio 5G NR-U (New Radio Unlicensed). Cette nouvelle technologie est une version au cour du développement, qui permet de fournir les fréquences de 57 GHz jusqu'à 71 GHz [19,18]. Les recherches actuelles des 5G NR-U sont basés sur les caractéristiques des protocoles et de la couche physique, cette dernière n'a pas encore effectué des études approfondies sur ces performances.

2.2.2 Scénarios LOS et NLOS

Le canal de propagation est l'endroit où se propagent les signaux sous forme de multi trajets à cause des obstacles qui entourent l'émetteur et le récepteur. Lors de la propagation à multi trajets on distingue deux situations de propagation : NLOS (None Line Of Sight) ça veut dire qui n'y a pas de visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur, et on a LOS (Line Of Sight) où la visibilité est directe entre l'émetteur et le récepteur.

2.2.3 Mesures, modélisation et caractérisation dans les milieux industriels

Un environnement industriel est riche en objets métalliques qui reflètent les ondes électromagnétiques, tels qu'une salle d'angiographie, usines, bateau, avion, centre de données, centre commercial, mine souterraine et tunnel...etc. La propagation dans les environnements industriels est très différente des environnements indoor conventionnels tels qu'un bureau, une sale, un couloir, ou une chambre. Parmi les principales différences, il existe ce qui est structurel comme (les hauteurs de plafond), et d'autres dépend de la nature de l'environnement (par exemple, les matériaux des murs et des sols et les surfaces métalliques) [23], d'où la nécessité des mesures pour la caractérisation et la modélisation du canal de propagation.

Malheureusement les travaux de la caractérisation des canaux sans fils dans le cadre industriel sont limités [23], ce qui exige de faire un ensemble de mesures de différents scénarios avec une grande valeur à haute précision, et mettre des modèles qui peuvent être utilisés au sein de la communauté. Donc on peut dire d'une autre manière qu'il est crucial de comprendre les caractéristiques de la propagation des canaux dans ces environnements particuliers avant de déployer des systèmes dans des scénarios industriels.

De nombreux travaux visent à caractériser et à modéliser les caractéristiques de propagation sans fils des canaux mmW pour les communications LOS et NLOS dans les environnements industriels non conventionnels. On peut citer les travaux réalisés pour la bande UWB (3.1 GHz-10.6 GHz) dans un milieu industriel [24, 25], et dans un avion C-130 militaire [26] en scénario intérieur (Indoor-LOS) et Indoor-NLOS. Aussi un grand nombre des travaux connexe dans ce domaine englobent les fréquences de 60 GHz en scénario Indoor-LOS pour des types des environnements divers telles que : cabine d'un Airbus - A340 et un kiosque [27,28], les mines souterraines [14] et [29,30], salle d'angiographie [31,32] et dans un hôpital [33,34,31]. Et également dans un centre commercial [35] et dans une grande salle de bureau [36] pour les fréquences de 60 GHz et 70 GHz. Toutes ces études utilisent un sondeur du canal basé sur un VNA pour effectuer les mesures du canal.

Plusieurs raisons existent qui favorise l'utilisation de la technologie 60 GHz et d'introduire le réseau sans fil dans les centres de données (DC), dans ce cadre, les fluctuations sont réduites grâce à la bande passante large disponible en 60 GHz, et le problème du câblage qui existe au DC est réglé. En effet, la bande 60 GHz permet une communication directe entre les racks [37].

L'utilisation de la bande passante à 60 GHz dans les centres de données a plusieurs raisons, nous citons : le réglage du problème de la compactation qui existe au DC, et la possibilité d'une communication directe entre les racks en bande 60 GHz. Un DC est composé des commutateurs ToRs qui sont équipées par des dispositifs sans fil et des antennes directionnelles et un contrôleur central responsable à la surveillance des trafics et commuter les voies de migration entre les commutateurs ToRs.

Dans le contexte de la bande 60 GHz, nous citons les travaux de Halperin et al [37]. Ils ont utilisé des mesures et des simulations dans un DC par un banc d'essai de prototypage à 60GHz.

Il existe aussi un travail de Cui et al [38] où le DC a une topologie hybride est le responsable pour adresser la conception d'une architecture d'un réseau. Toutes ces études ont été effectuées dans des scénarios NToR et XToR en un environnement LOS. De plus, Katayama et al. [39] traitent un nouveau réseau sans fil qui utilise des liaisons mmW à faisceau dirigé en visibilité directe LOS à 60 GHz, une autre étude de Camillo et al [40] basé sur l'extraction des paramètres de modèle de canal quasi déterministe pour un centre de données par sondeur tridimensionnel bidirectionnel à 60 GHz.

Des études [25] ont effectués une caractérisation des canaux ultras large bande (UWB), avec l'utilisation des mesures de temps d'arrivées (ToA) dans un centre de données.

Chia-Lin Cheng et al [41] ont utilisés un modèle statistique ultérieur pour la caractérisation des canaux à 300 GHz d'une communication rack à rack (R2R) dans un centre de données. Des études sur les fréquences THz [41] utilisent la technologie Terahertz (la bande de 300 GHz) dans les centres de données dans le but d'améliorer les performances du système, et réduire le cout du câblage, avec une topologie hiérarchique.

Dans notre cadre d'étude, nous nous concentrons sur la caractérisation et la modélisation des canaux mmW à des scénarios XToR et NToR d'un centre de données pour la bande 60 GHz, nous nous somme basées sur les scénarios de mesures effectuées en laboratoire pour les scenarios XToR et NToR.

2.3 Caractérisation et modélisation du canal radio

2.3.1 O bjectif du sondage, caractérisation, modélisation du canal radio

Divers opérateurs des réseaux mobiles, les instituts de recherche, les universités et les acteurs industriels ont menés de vastes campagnes de mesures des canaux, pour l'objectif ultime d'élaborer un modèle complet de canal radio à une gamme de fréquences de 6 GHz jusqu'à 100 GHz pour tous les scénarios 5G pertinents. En effet la dérivation des modèles est définie par des campagnes de sondage des canaux qui pourraient fournir statistiquement des données de mesure fiables avec des informations directionnelles et des fréquences multiples pour des chaînes de transmission ne sont pas encore disponible, et posent un défi considérable aux fréquences élevées et aux ondes millimétriques, donc pour établir une base de données solide il faut mettre en commun les données mesurés [42,43].

D'une part, la dépendance de ces modèles est liée à la distance variée entre l'émetteur et le récepteur ainsi que la fréquence et les divers types de matériaux traversés par la propagation des ondes électromagnétiques. Durant la propagation de ces ondes il existe des relations avec les obstacles rencontrés (les murs, les fenêtres...etc) [42]. Ces derniers sont liés aux plusieurs indicateurs citons : la nature des matériaux rencontrés ainsi que leurs caractéristiques diélectriques et magnétiques, leurs dimensions et les caractéristiques de l'onde d'angle incidence de l'onde.

D'une autre part, dans le contexte du système de mesure, la caractérisation des sondeurs du canal radio est pour but de la précision et évaluer les erreurs intrinsèques du système, et établir une interprétation des données de mesure correcte et utiliser des paramètres spécifiés pour une évaluation plus approfondie [44]. Pendant la caractérisation et la validation de mesure, la différence entre les valeurs mesurées et les valeurs réelles provoque des erreurs systématiques. Parmi les causes principales de ces erreurs, nous citons le bruit thermique, le bruit de phase, le déséquilibre I/Q et les non-linéarités.

2.3.2 Techniques de sondage du canal

Plusieurs techniques de sondage sont utilisées pour étudier les caractéristiques des canaux selon la fréquence du canal et la largeur de bande des mesures. Ils peuvent être classés en bande étroite et bande large, dans les domaines temporel ou fréquentiel. Durant notre étude on s'intéressera à la méthode fréquentielle.

2.3.2.1 Mesures à bande étroit

Les mesures à bande étroite sont le moyen le plus simple de mesurer la perte de trajectoire et l'intensité du champ avec un taux d'échantillonnage probablement plus élevé que les mesures à large bande. En revanche les mesures à large bande peuvent fournir des informations quantitatives sur MPC (Multi -Paths Component) et la dispersion temporelle des canaux, souvent à un taux d'échantillonnage limité. Les mesures à bande étroite sont hors de portée de ce mémoire.

2.3.2.2 Mesures à large bande

En règle générale, les mesures à large bande utilisent une impulsion courte ou des trains d'impulsions avec un retard suffisant et une résolution temporelle pour distinguer les MPC. Une mesure à large bande du canal à 60 GHz affinée peut fournir efficacement des informations sur les statistiques de dispersion des trajets multiples et des retards. Parmi les techniques de sondage les plus courantes : la technique par (VNA), sondeur corrélateur coulissant, et la technique d'impulsions directes.

- **Analyseur de réseau vectoriel (VNA)**

L'analyseur de réseau vectoriel ou Vector Network Analyser (VNA) est l'outil le plus courant à la caractérisation du canal par balayage fréquentiel discret. Il est utilisé pour caractériser les quadripôles fonctionnant dans les hyperfréquences à travers les mesures des paramètres S et déterminer la fonction du transfert $H(f)$ par le paramètre S_{21} . Dans le cas du sondage de canal, il est nécessaire de connecter le port 1 à l'antenne d'émission et le port 2 à l'antenne de réception.

Cette technique de sondage du canal permet de mesurer la variation de la puissance et de la phase du signal transmis, et elle a été utilisée dans la plupart des travaux [20, 21, 23, 24, 25], La figure (2.2) montre le montage expérimental associé à cette technique de mesure.

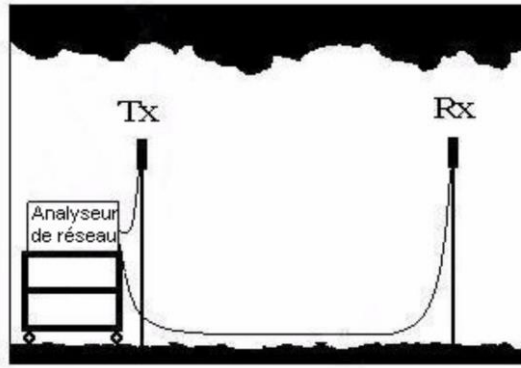


Figure 2.2 : Technique de mesure dans le domaine fréquentiel [45].

La bande passante BW (Band Width) d'intérêt est balayée avec un nombre discret de points de fréquences N_f pour construire une version échantillonnée de la fonction de transfert de canal (CTF). Elle est balayée avec une étape de fréquence Δ_f pour construire une réponse en fréquence à travers la bande passante par l'utilisation des filtres à bande étroite et acquérir à la fois l'amplitude et la phase au récepteur, l'utilisation de ces filtres en réception conduit à une très bonne plage dynamique de mesure, mais augmente le temps nécessaire à la détermination complète de la fonction de transfert.

Cette procédure a des résultats plus précis et plus dynamiques. Avant toutes les mesures, il faut faire une calibration pour établir des plans de référence du VNA. La méthode d'étalonnage de VNA la plus courante est l'étalonnage de type SOLT (short open load through).

Les mesures par VNA peuvent être longues, ce qui exige que le canal doit être statique, c'est-à-dire l'absence de mouvement humain. En outre les sondeurs des canaux basés sur le VNA sont limités en termes de distance en fonction des longueurs des câbles sur les côtés Tx et Rx (les deux antennes Tx et Rx doivent être connectées au VNA pour les exigences de balayage synchronisé, c'est-à-dire que les mesures de phase doivent être synchronisées).

Les paramètres importants à considérer lors de l'utilisation d'un sondeur de canal VNA sont les suivants :

- La bande passante BW est liée à la résolution temporelle Δt comme :

$$\Delta t = 1 / BW \quad (2.1)$$

- L'étape de balayage de fréquence Δ_f définit le retard excessif maximal mesuré comme :

$$\text{Retard excessif maximum} = 1 / \Delta_f \quad (2.2)$$

Où Δ_f est défini pour un nombre de points balayés N_f sur une BW donné comme :

$$\Delta_f = BW / (N_f - 1) \quad (2.3)$$

En raison des avantages de cette technique en termes de largeur de la bande d'analyse, cette méthode a été fréquemment utilisée lors de campagnes de sondage du canal ultra large bande (UWB) [44]. Cependant, la durée de la mesure est proportionnelle aux nombres de points de fréquences mesurés. Pour une bande d'analyse de plusieurs GHz, la durée de mesure de la bande GHz est dans les environs de dizaine de seconde. Cette technique est utilisée pour des canaux invariant dans le temps. Lors des mesures réalisées à l'aide d'un VNA il convient donc d'assurer que l'environnement reste statique pendant toute la durée de la mesure. Ce dernier est directement influencé par N_f , bande passante (BW), et les paramètres de moyenne. D'autre part, la distance émetteur-récepteur est limitée en raison de l'affaiblissement de puissance dû aux câbles.

Sondeur corrélateur coulissant

La technique des corrélateurs à glissement (SCS), généralement utilisée pour les mesures à longue distance, ne permet de mesurer que l'amplitude du signal reçu et le temps d'arrivée des MPC. Cette technique est utilisée pour les propriétés d'autocorrélation des séquences pseudo-aléatoires (PA) afin d'augmenter le rapport signal sur bruit.

Le sondeur par corrélation est donc composé d'un générateur de séquence PA au niveau de l'émetteur et d'un étage de transposition vers la fréquence de travail. Typiquement les sondeurs large bande émettent des signaux de l'ordre de la centaine de MHz. La fréquence d'horloge dans le cas de l'UWB augmente, mais la réalisation du sondeur devient plus sensible.

Au niveau du récepteur, après transposition du signal reçu en bande de base, plusieurs techniques d'acquisition sont possibles. La première consiste à utiliser un filtre analogique adapté à la séquence PA émise, ce principe permet de déterminer la réponse impulsionnelle en temps réel. Cependant la bande analysable est limitée par la bande passante du filtre et la dynamique reste faible. Une seconde technique consiste à numériser le signal reçu, puis à réaliser la convolution à l'aide d'un filtre numérique. Alors la bande maximale est limitée par la rapidité des convertisseurs analogiques numériques [46,1]. La technique SCS est beaucoup plus rapide (ce qui est idéal pour les canaux variables dans le temps), tandis que le sondeur VNA est basé sur la résolution des retards, il est défini par la durée de la puce, la technique SCS a été réalisée principalement dans des environnements extérieurs par l'utilisation des ondes millimétriques.

Système d'impulsions directes

Les sondeurs à système d'impulsions directes (DPS) sondent le canal à l'aide d'impulsions à large bande pour construire rapidement un profil de retard de puissance (PDP). Les DPS ont des réponses bruyantes qui limitent la plage dynamique de mesure.

En effet la technique par impulsions est la plus naturelle et consiste à émettre un signal de courte durée dans le temps et à effectuer une démodulation cohérente pour retrouver l'enveloppe complexe de la réponse impulsionnelle du canal. Cette technique a été utilisée pour la première fois dans les expériences de sondage de canal et a été reprise dernièrement pour le sondage ultra large bande.

Parmi les avantages de cette technique la simplicité, faible temps d'acquisition, qui permet de caractériser des canaux variant rapidement dans le temps. Cependant cette méthode comporte également plusieurs défauts. Tout d'abord l'émission d'une forte puissance pendant un temps très court pose des problèmes technologiques, donc il est délicat d'utiliser cette technique pour des grandes distances où en configuration NLOS. Enfin cette technique demande une synchronisation parfaite entre l'émetteur et le récepteur [46,1].

2.3.3 Propriété de la technique fréquentielle

La technique fréquentielle présente plusieurs propriétés, nous pouvons citer [47].

- Le VNA joue un rôle d'un émetteur et récepteur en même temps donc il est facile à mettre en œuvre.
- Tous les effets de composants de mesure comme les câbles, les antennes, les amplificateurs de puissance sont annulés grâce à la phase de calibration.
- Le module et la phase de la réponse fréquentielle sont obtenues directement.
- La possibilité d'obtenir une plage dynamique de mesure selon les besoins.
- Le temps de mesure est lent et il dépend de plusieurs variables, telles que le nombre d'échantillons et chaque pas de fréquence pour la mesure.
- Le VNA est utilisé en faible distance et dans les systèmes de mesure externe grâce à sa fonctionnalité comme un émetteur –récepteur en même temps.

2.4 Centre de données sans fil

2.4.1 Architecture d'un centre de données sans fil (WDC)

Les centres de données sans fil (WDC) actuelles sont construits sur la base d'une topologie hiérarchique comme le montre la figure (2.3). Les serveurs sont disposés dans des racks et un commutateur connecte tous les serveurs dans un rack. Dans un WDC les racks et les commutateurs des couches d'agrégation et de la base forment une arborescence multi-racine, puisque seuls quelques commutateurs servent de nœuds racines au niveau de la couche principale [2]. Il est évident que ces nœuds racines deviendraient le goulot d'étranglement si le volume de trafic global est important.

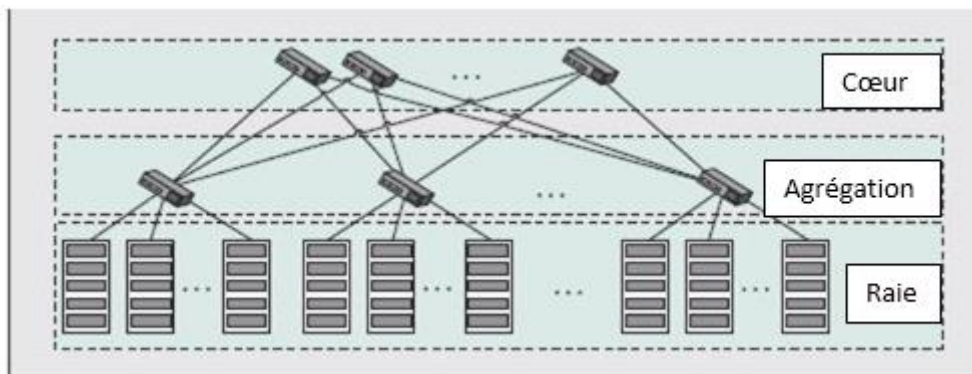


Figure : 2.3 Structure de WDC [2].

Le réseau sans fil est appliqué sur les centres des données d'une façon à établir des voies en ajoutant des liens sans fil entre les Top-of-Rack (ToR) pour atténuer le problème de congestion des racks et de minimiser le temps de transmission maximal.

Dans le cas réel la connexion entre les racks et les serveurs au niveau d'un centre de données se fait via Ethernet. On peut compter chaque rack comme une unité de transmission sans fil (WTU) [2], comme illustré dans la figure (2.4). Notez que les racks ne bloquent pas les transmissions LOS, car les radios sont situés au-dessus d'eux.

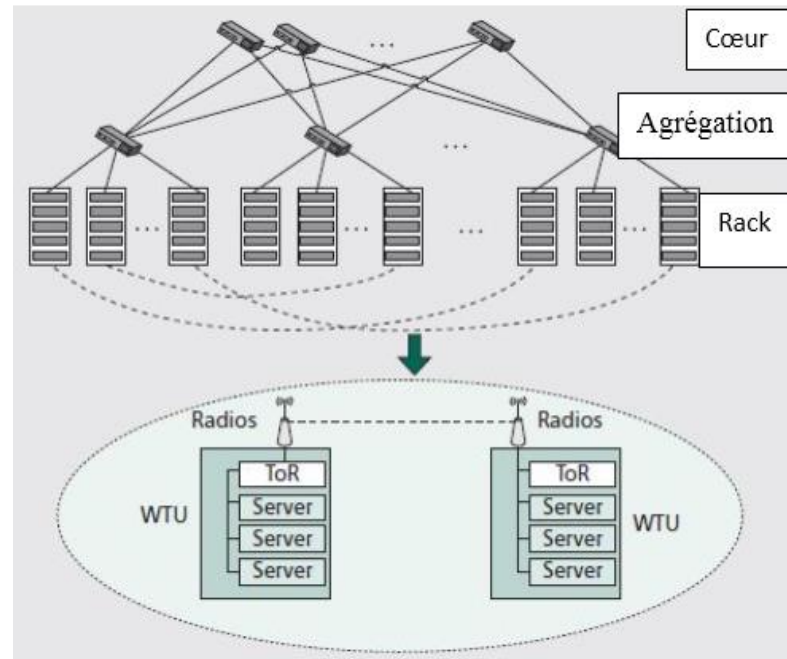


Figure 2.4 : Exemple d'architecture WDC où chaque rack correspond à un WTU [2].

2.4.2 Objectif de transmission dans le centre de données sans fil

La transmission entre les serveurs de différents racks dans les centres de données souffre de saturation. La mise en œuvre d'un réseau sans fil dans les centres répond aux objectifs de conception de système dans le but d'éliminer le câblage et réduire son coût, l'évolutivité, la rentabilité, et le haut débit. Par conséquent, les liaisons sans fil directes entre les serveurs allègent également la charge des commutateurs principaux et offre la flexibilité, c'est-à-dire la capacité à prendre en charge des nouvelles applications et à déployer rapidement le système pendant la mise en œuvre des nouveaux services [2].

2.5 Mesure du canal de propagation WDC à 60 GHz

2.5.1 Étude du canal SISO

De nos jours, les demande de communication sans fil augmentent de façon spectaculaire, grâce à cette augmentation de nombreuses études examinant certaines caractéristiques et diverses campagnes de mesure des canaux des systèmes SISO. SISO est l'architecture la plus simple de système radio par l'utilisation d'une seule antenne à côté de l'émetteur et de récepteur voire la figure (2.5). Ce système a un canal radio standard (l'émetteur fonctionne avec une antenne comme le récepteur étant perturbé par nombreux effets négatifs), grâce à ça plusieurs campagnes de mesure SISO ont été proposées des modèles statistiques de canal dans plusieurs recherches documentaires [46, 62].

Il existe deux domaines dans la littérature pour réaliser des mesures dans les systèmes SISO, en domaine temporel et en domaine fréquentiel. On s'intéresse dans notre projet de

recherche aux mesures dans le domaine fréquentiel, qui se fait par un sondeur basé sur des ondes à séquence directe ou bien par le sondeur VNA, tandis que les mesures dans le domaine temporel basé sur la technique du sondage par impulsion. Cette technique est hors de nos études. Les systèmes de mesures basés sur le sondeur VNA donnent des bandes passantes larges, mais avec une durée trop longue à cause du temps de balayage. De plus les systèmes à 60 GHz dans le domaine du sondage fréquentiel sont basés sur des systèmes de basse fréquence avec des convertisseurs de fréquence.

Les groupes de travail IEEE ont fait plusieurs expérimentations pour définir des modèles de canal à large bande. En 2003 le groupe de travail IEEE 802 .15.3c a proposé le premier modèle basé sur le contexte de Salah et Valenzuela, ce modèle permet de regrouper les différentes propagations des ondes radios dans des clusters. Un autre modèle de Shoji et al. [46] vise à caractériser les paramètres à deux trajets du canal radio, c'est un modèle qui fonctionne à la base du modèle de Salah et Valenzuela.



Figure 2.5: Canal SISO.

2.5.2 Équipement et paramètres

La technique de mesure utilisée est basée sur le sondage par analyseur de réseau vectoriel (VNA) dans le but de récupérer le paramètre S_{21} . Le VNA est capable de mesurer la réponse complexe en fréquence allant jusqu'à 70 GHz. La figure (2.6) représente l'analyseur de réseau vectoriel utilisé dans les mesures du canal.



Figure 2.6: VNA (AnritusMS-4647A).

Le VNA balaye 8641 points de fréquence sur une bande passante de 8.64 GHz avec une résolution temporelle $\Delta t = 0.116s$ avec un dynamique range de 90 dB, approximativement.

Le VNA comporte deux ports : le premier est relié avec l'entrée d'un amplificateur de puissance (CERNEX CBM 57653 / 015-03), et la sortie est reliée avec l'émetteur via un câble coaxial de 5m d'une atténuation de 32 dB. La sortie d'amplificateur est reliée par une antenne de 60 GHz d'un gain de 24 dBi, qui permet de capter un signal. A la réception le signal de sortie passe par un amplificateur (CERNEX CBL 57653/055-01) à 60 GHz, relié à l'antenne de réception à 60 GHz par un câble de 5m.

Dans cette mesure les scénarios utilisés est Horn-Horn en polarisation verticale. La figure (2.7) présente le schéma expérimental de la mesure, et le tableau (2.1) présente les caractéristiques et les paramètres :

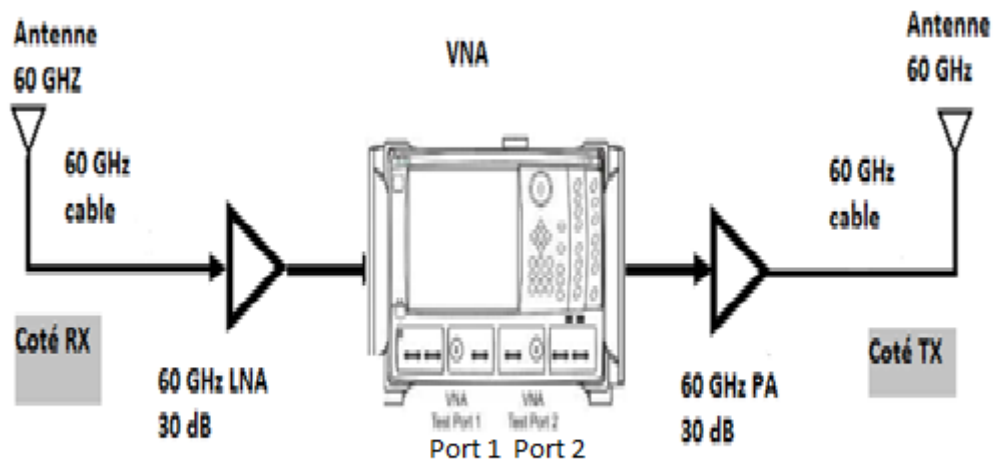


Figure2.7 : Schémas d'un système de mesure par VNA [21].

Tableau 2.1 Réglage et paramètre du sondeur.

Paramètre	Caractéristique
VNA	Anritsu MS-4647A
Gain PA (CERNEX CBM 57653/015-03)	30dB
LNA Gain (CERNEX CBL 57653/055-01)	30dB
Câble Tx	5 m ~ 32 dB atténuation
Câble Rx	5 m ~ 32 dB atténuation
Antenne Tx	Horn - 24 dBi Gain
Polarisation	Verticale-Verticale
Antenne Rx	Horn- 24dBi Gain
Bande passante	8.64 GHz (57.24 GHz-65.88 GHz)
Plage dynamique	~90 dB
Bande passante IF	1KHz

La fonction de transfert complexe mesuré $H(f)$ par l'analyseur de réseau peut être écrite

Comme suit :

$$H_n(f) = a_n e^{i\theta_n} \quad (2.4)$$

Où : a_n est l'amplitude de la fonction de transfert, et θ_n qui représente la phase en un point n. La réponse impulsionnelle $h(t)$ est obtenue en effectuant une transformation de fourrier inverse sur la réponse fréquentielle mesurée. La figure (2.8) représente l'amplitude d'une réponse fréquentielle.

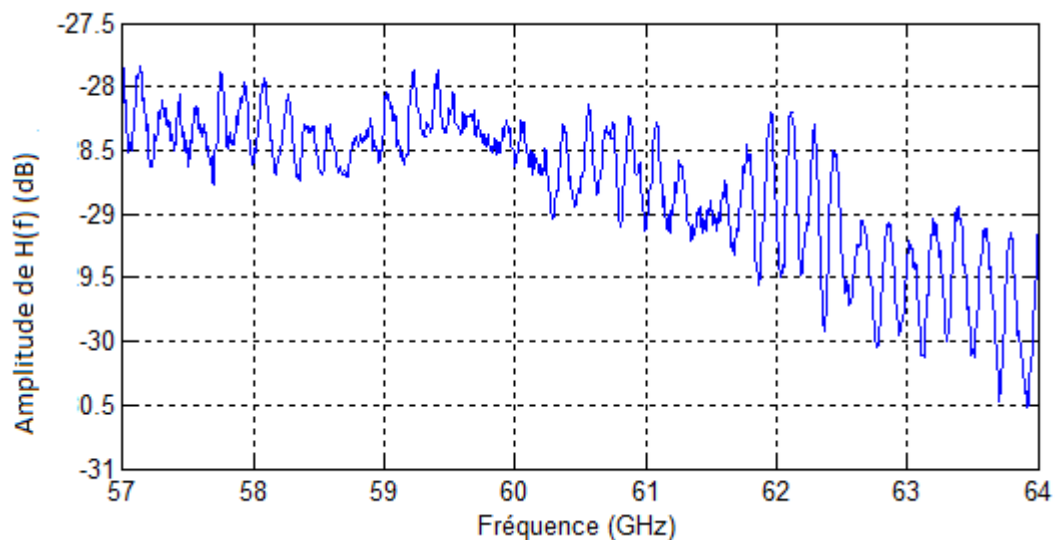


Figure 2.8: Exemple de l'amplitude d'une réponse fréquentielle $H(f)$ du paramètre (S_{21}) avec la distance entre Tx et Rx de 62 cm.

2.6 Scénario de mesure

Tout au long de la campagne de mesure, nous nous sommes concentrés sur les mesures avec des antennes à haute directivité. Les racks du DC ont des tailles et des structures standardisées. La séparation Tx-Rx a été choisie pour des scénarios pratiques de déploiement à courte portée afin de conserver la généralité et la validité des modèles. Les scénarios de déploiement possibles ont été regroupés en deux cas d'utilisation importants, scénario NToR et scénario XToR. La figure (2.9) représente les deux scénarios de déploiement de radio ToR à 60 GHz[48].

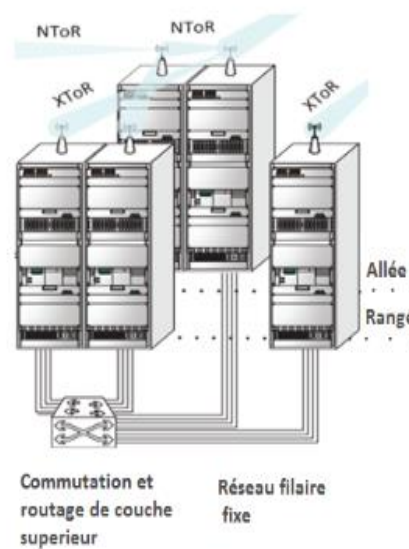


Figure 2.9: Deux scénarios de déploiement de radio TOR 60 GHz [48].

2.6.1 Scénario XTOR

ToR interalliée : sont des communications en visibilité directe entre deux ToR différents séparés par une allée. Une valeur déterministe d'affaiblissement sur le trajet est remarquée dans le cas où les antennes Tx et Rx sont situées à l'avant d'un ToR.

De l'autre côté si la profondeur et la hauteur sont données, et les antennes sont placées au centre de ToR (voire la figure 2.10), les valeurs de perte de trajet sont stochastiques à cause des réflexions ToR. La caractérisation de l'effet des réflexions ToR sur la perte de trajectoire est présentée dans le chapitre 3.

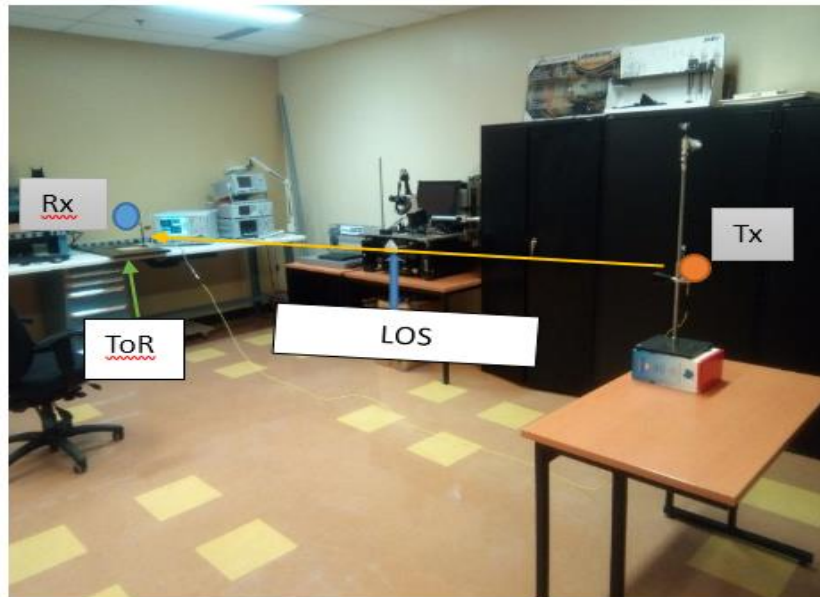


Figure 2.10 : Scénario XTOR.

2.6.2 Scénario NTOR

ToR voisin (NToR) : est la communication entre les racks contigus voisins en visibilité directe (LOS) comme le montre la figure (2.11). La caractérisation de l'effet des réflexions ToR sur la perte de trajectoire est présentée dans le chapitre 3.

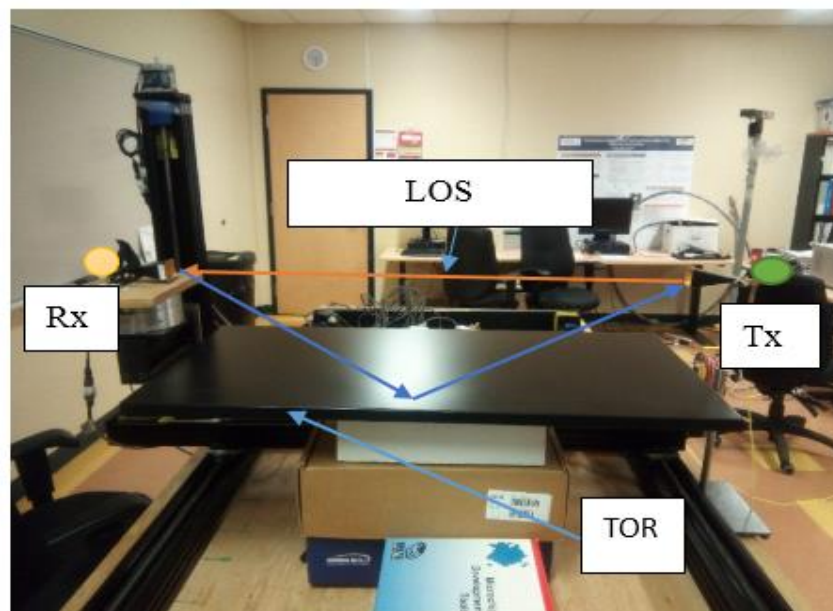


Figure 2.11 : Scénario NTOR.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés l'état de l'art sur les différents standards existants à 60 GHz, et analyser d'une manière générale les nouvelles techniques de mesure dans divers environnements industriels. Nous avons discuté de l'intérêt de la modélisation et la caractérisation du canal de propagation à 60 GHz dans ces milieux industriels ainsi que les techniques de sondage utilisées.

Par la suite nous allons décrire le milieu étudié, la technique de mesure effectuée à une bande de [57 GHz à 70 GHz] et le protocole expérimental suivi lors de la campagne de mesure, et les éléments en relation avec les mesures. Nous avons terminé notre chapitre par une description des différents scénarios de mesure dans un centre de données en chemin directe (LoS).

Chapitre 3 :
Caractérisation et modélisation
d'un canal radio SISO

3.1 Introduction

Afin de développer les systèmes de communication sans fil à haut débit dans les services actuels de la 5G, il est primordial de connaître le canal de propagation (mmW) et les conditions précises de mesure sur l'environnement étudié.

D'un côté, nous pouvons développer des modèles du canal SISO à 60 GHz à l'aide des indices principaux à partir d'une base de données de mesure expérimentale, tel que les pertes du trajet, le profil de retard, l'évanouissement lent, et la capacité du canal en fonction de la bande passante...etc, ce qui nous permet de vulgariser la propagation dans les centres de données. D'un autre côté, l'établissement des modèles de canal dans des conditions réalistes et reproductibles joue un rôle très important pour évaluer les performances des couches physiques, modulations et codage canal à large bande de fréquence telle que la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Nous allons commencer tout d'abord par une définition du canal de propagation, dans le but de réaliser une transmission : soit une antenne d'émission envoie un signal qui se propage dans le milieu de transmission, et reçoit par la suite par une antenne de réception.

Durant la propagation des ondes radio millimétriques, la réflexion, la réfraction et la diffraction, présentent un effet interagissant avec le milieu (voire la figure (3.1)), il existe différentes répliques des signaux originaux qui sont combinées au niveau du récepteur (de manière constructive ou destructive) avec différentes directions [49], telle que les retards et les amplitudes, ces derniers entraînent des fluctuations rapides de l'amplitude du signal et définissent les composantes des multi trajets (MPC) du canal sans fil.

A cet effet, le présent chapitre portera essentiellement l'analyse des résultats des mesures, en définissant les paramètres caractéristiques en termes de perte de trajectoire, l'évanouissement lent de puissance, la capacité du canal, ainsi que les modèles utilisés pour un canal de propagation les cas d'usage dans un centre de données, à savoir XToR et NToR.

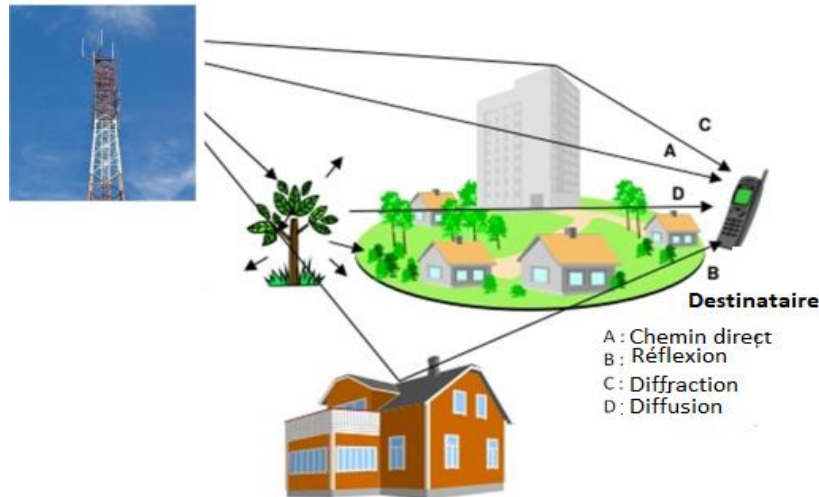


Figure 3.1 Exemple de mécanisme de propagation des MPC [49].

3.2 Caractérisation du canal de propagation WDC à 60 GHz

Les modèles développés dans cette section permettent de caractériser quelques paramètres, et des phénomènes de propagation radioélectrique comme la perte de trajectoire, l'évanouissement à grande échelle (shadow fading) et la capacité du canal.

3.2.1 Caractérisation à grande échelle

Pour réaliser une caractérisation à grande échelle, il est nécessaire de déterminer certains paramètres liés à l'affaiblissement du trajet. Dans nos cas de caractérisation à grande échelle, l'émetteur et le récepteur sont en visibilité directe (LOS).

3.2.1.1 Les pertes de trajet (Pathloss)

Les pertes du trajet correspondent à la différence entre la puissance d'émission et la puissance de réception (en dB) [5], en raison de l'atténuation introduite dans le canal de propagation.

Les pertes du trajet ($PL_{\text{}}$ pour pathloss) à une distance d , sont calculées à partir du paramètre S_{21} (la fonction de transfert du canal) par la relation suivante :

$$P_L(d) = -10 \log_{10} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \sum_{j=1}^M |H_j(f_i, d)|^2 + G_{Tx} + G_{Rx} \quad (3.1)$$

Où $H_j(f_i, d)$ est la fonction de transfert du canal. Le signal peut se propager par différents trajets, trajet indirect (NLOS), et le plus important le trajet direct (LOS). Le tableau suivant présente les paramètres utilisés pour calculer les pertes du trajet.

Tableau 3. 1: Paramètres utilisés pour calculer la perte de trajet.

Paramètres	Signification
M	Nombre de mesures pour chaque position
N_f	Nombre de points fréquentiels
G_{T_x}	Gain d'antenne d'émission
G_{R_x}	Gain d'antenne de réception
d	La distance

Notez que le nombre de points fréquentiels N_f est défini directement par la bande passante BW et l'incrément de balayage fréquentiel Δf (voir équations (2.2) et (2.3) du chapitre 2). À chaque point de mesure, la moyenne de la fonction de transfert du canal est calculée par un facteur M , pour réduire l'effet du bruit du système de mesure.

3.2.1.2 Mesures et analyse des résultats

A. Scénario NToR 1 (le cas où les antennes Tx et Rx ont la même hauteur)

Les mesures du canal de propagation à 60 GHz ont été effectuées dans un laboratoire à l'université d'Ottawa, Canada, de dimensions 9m×9m×3m. Pour le scénario NTOR ($d=1.16$ m) mentionné en chapitre 2, où l'émetteur et le récepteur sont équipés par des antennes directionnelles de gain 24 dBi, et sont situés au même endroit sur une table de positionnement (voir la figure (3.2)), les antennes T_x et R_x sont montées sur les bras de positionnement de la table Velmex sur 6 positions différentes avec les hauteurs correspondantes de 0.5, 3.5, 6.5, 9.5, 12.5 cm et 15.5 cm. Les mesures sont prises entre les fréquences [57.24 GHz jusqu'à 70 GHz] pour 11 canaux de différentes bandes de la norme IEEE.802.11ay comme le montre la figure (3.3) et le tableau (3.2). Ces derniers sont divisés en 6 canaux où la bande de fréquence est de 2.16 GHz, et 5 canaux agrégés ont des bandes différentes de 4.32 GHz, 6.48 GHz et 8.64 GHz .

La bande autour 60 GHz est allouée pour une utilisation sans licence, elle est divisée en canaux de 2,16, 4,32, 6,48 et 8,64 GHz de bande passante. La norme IEEE.802.11ay à agréger ces canaux pour obtenir un gain de débit significatif de 25 Gbps-45 Gbit/s, et l'utiliser dans différents cas d'usage [50], telle que : La connectivité dans les centres de données et les racks, les communications à courte portée, la distribution des données...etc.

Tableau 3.2 : Sous-bandes utilisées pour le calcul du scénario NTOR1.

Canal	Fréquences (GHz)	La bande passante (GHz)
CH1	57.24-59.40	2.16
CH2	59.40-61.56	2.16
CH3	61.56-63.72	2.16
CH4	63.72-65.88	2.16
CH5	65.88-68.04	2.16
CH6	68.04-70.2	2.16
CH7	57.24-61.56	4.32
CH8	57.24-63.72	6.48
CH9	57.24-65.88	8.64
CH10	59.40-68.04	8.64
CH11	61.56-70.2	8.44



Figure3.2 : Tables de positionnement de marque Velmex, utilisée pour régler la hauteur des antennes avec haute précision dans les axes xyz.

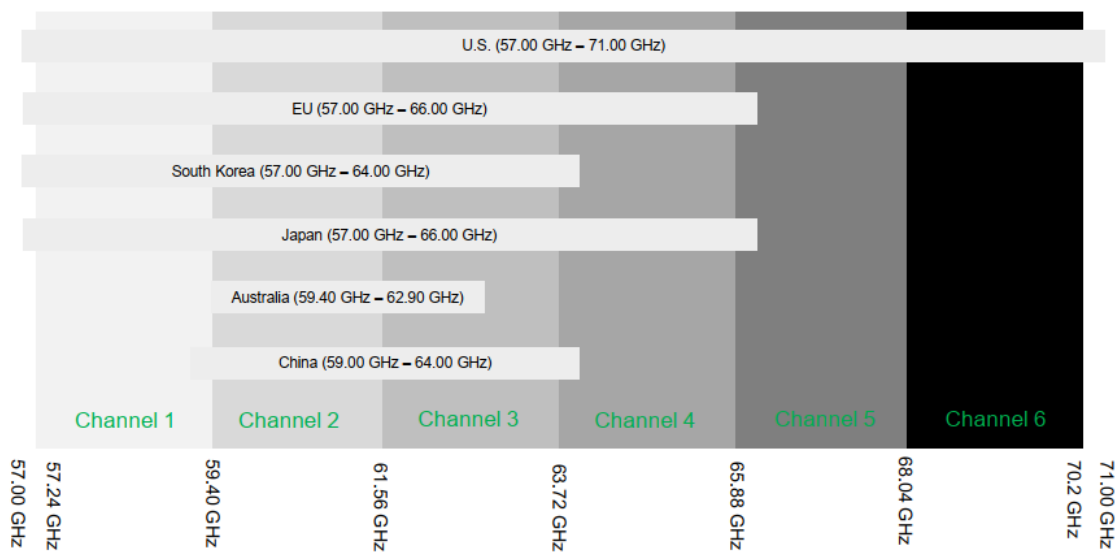


Figure 3.3: Schéma de canalisation de la bande autour de 60 GHz dans le monde [9].

Les figures (3.4), et figure (3.5) représentent les résultats superposés pour les valeurs de l'affaiblissement de parcours mesurés en dB pour les six et cinq canaux agrégés respectivement en fonction de la hauteur des antennes Tx et Rx.

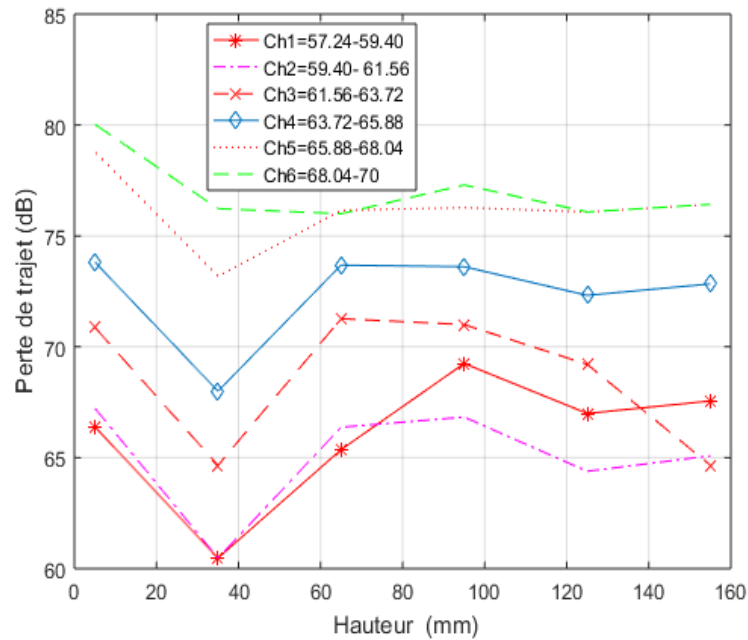


Figure 3.4: Pertes de trajets pour les six canaux.

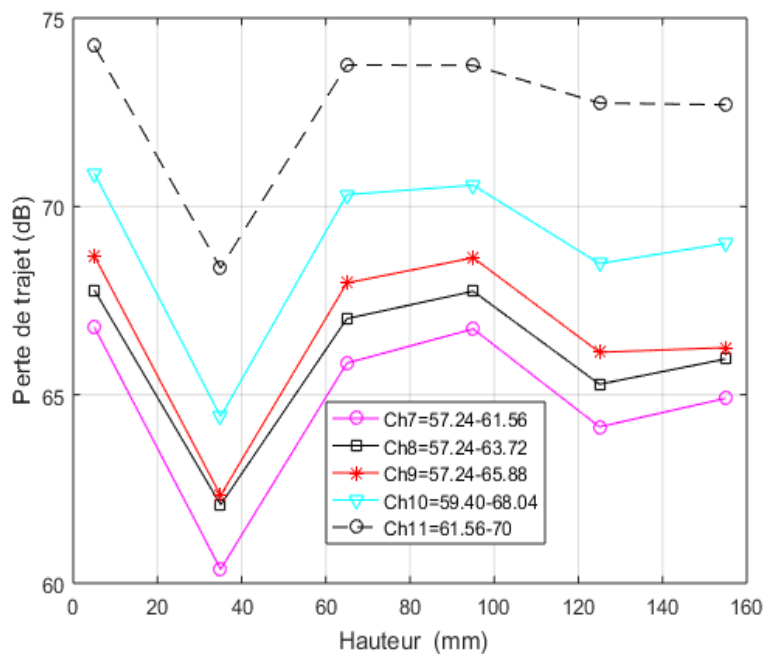


Figure 3.5: Pertes de trajets pour les cinq canaux agrégés.

Nous remarquons que les pertes augmentent lorsque la fréquence augmente, par exemple pour la hauteur 5 mm, l'affaiblissement est de 66.5 dB pour le canal 1 et 67 dB, 71

dB, 74 dB, 79dB, 80dB pour les canaux 2, 3, 4, 5, 6 respectivement. Même remarque pour les cinq canaux agrégés, ceci peut être interprété par le modèle à deux trajets sur la propagation d'ondes millimétriques. On remarque aussi que les pertes profondes d'une manière périodique pour chaque hauteur d'antennes Tx et Rx.

En conclusion les pertes de trajet augmentent proportionnellement avec la fréquence, par contre ils ont des valeurs différentes avec les hauteurs d'antennes Tx et Rx.

3.3.2 Model à deux trajets

Shoji et Sawada ont développés un modèle statistique de canal à deux trajets à la base de modèle SV qui est un modèle classique a une corrélation entre le domaine spatial et temporel. Le modèle à deux trajets est basé sur l'utilisation des antennes directives avec une apparition d'une composante supplémentaire qui s'ajoute à la réponse impulsionnelle du modèle SV(Salah Venzuila) [46-50].

Des études antérieures [51], [52] ont montrés que les caractéristiques de perte du trajet en LoS sont dominées par l'interférence entre le trajet direct et le trajet réfléchi sur la table de positionnement d'antennes, qui sont les caractéristiques du modèle à deux voies. Pour déterminer le facteur d'amplitude à deux voies β , il faut juste fixer la distance et la hauteur des antennes Rx, et Tx [53]. Le facteur d'amplitude de la réponse à deux voies est facile à calculer s'il y'a des informations précises sur la position des deux antennes d'émission et de réception.

Le problème qui se pose est que ces deux voies ne peuvent pas être discriminées et doivent être traitées comme une seule impulsion. En introduisant un paramètre de gain de chemin (β) pour la réponse à deux chemins, la réponse à deux chemins $h_{two}(t)$ est exprimée comme suit[45] :

$$h_{two}(t) = \sigma(t - \tau_1) + R_0(t - \tau_2) \quad (3.2)$$

Avec : $h_{two}(t)$ représente le CIR (Channel impulse Response), $\sigma(t - \tau_1)$ représente la voie directe, et $R_0(t - \tau_2)$ représente la voie réfléchie.

- L'équation (3.3) donne le τ du signal transmis directement [45]:

$$\tau_1 = \frac{d_1}{c}, d_1 = \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + L^2} \quad (3.3)$$

- L'équation (3.4) donne le τ du signal réfléchi par le sol :

$$\tau_2 = \frac{d_2}{c}, d_2 = \sqrt{(h_2 + h_1)^2 + L^2} \quad (3.4)$$

τ_1 : le retard du signal transmis.

τ_2 : le retard du signal réfléchi.

Dans le cas ou en introduit un paramètre de gain de chemin pour la réponse à deux chemins, β , $h_{two}(t)$ est exprimée par [46]:

$$h_{two}(t) = \beta \sigma(t) \quad (3.5)$$

$$\beta = \frac{u}{L} \left| \rho + R_0 \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2h_1 h_2}{L} \right] \right| e^{i\theta} \quad (3.6)$$

$$\beta = \left| 1 + R_0 \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} (d_2 - d_1) \right] \right| \quad (3.7)$$

$$\approx \beta = 1 + R_0 \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{2h_1 h_2}{L} \right] \right) \quad (3.8)$$

Avec $L \gg h_1 * h_2$.

L'équation (3.9) sera modifiée si en compte la directivité des antennes [46] :

$$\beta = \sqrt{G_{t1} G_{r1}} + \sqrt{G_{t2} G_{r2}} R_0 \exp j \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{2h_1 h_2}{L} \right] \quad (3.9)$$

Où G_{t1} et G_{t2} sont les gains normalisés de l'antenne Tx pour la direction du chemin LoS et celui pour la direction d'un chemin de réflexion unique, respectivement. G_{r1} G_{r2} sont les gains normalisés de l'antenne Rx pour la direction du chemin LoS et celui pour la direction d'un chemin à réflexion unique, respectivement.

La relation qui relie la perte de chemin et le modèle à deux trajets est donnée par[46]:

(10)

$$\frac{Pr}{Pt} \approx \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 \left| 1 + R_0 \left[\exp j \frac{2\pi}{\lambda} (d_2 - d_1) \right] \right|^2 \quad (3.10)$$

$$\frac{Pr}{Pt} \approx \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 \left| 1 + R_0 \exp j \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{2h_1 h_2}{L} \right] \right|^2 \quad (3.11)$$

$$\frac{Pr}{Pt} \approx \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 \beta^2 \quad (3.12)$$

Sachant que $-10 \log_{10}(4\pi d_0/\lambda)^{10}$ représente les pertes de chemin en espace libre.

Le tableau (3.3) représente les paramètres utilisés sur le modèle à deux voies.

Tableau 3.3 : Paramètres du modèle à deux trajets

Paramètres	Signification
σ	La fonction delta de Dirac.
λ	La longueur d'onde
c	La vitesse de la lumière
d_1	La distance de déploiement LOS
d_2	La distance de déploiement réfléchié
L	La distance
h_1	La hauteur de l'antenne Tx
h_2	La hauteur de l'antenne Rx
R	Le coefficient de réflexion du pupitre
ρ	Facteur de blocage LOS (0 ou 1)

Scénario NToR 2 (le cas où l'antennes Tx est fixe et Rx a des hauteurs différentes)

Les mesures ont été effectuées sur une bande de fréquence [57.24 GHz-65.88 GHz], dans ce cas l'émetteur et le récepteur sont équipés par des antennes directionnelles de gain 24 dBi, où la hauteur d'antenne Tx est fixée à une hauteur de 2.5 cm et l'antenne Rx menés sur sept positions avec les hauteurs de 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, et 8.5 cm.

On peut observer sur la figure (3.6) les caractéristiques du paramètre β qui sont données par l'introduction d'une fonction de distribution cumulative (CDF) basée sur le modèle à deux trajets pour chaque position d'antenne Rx.

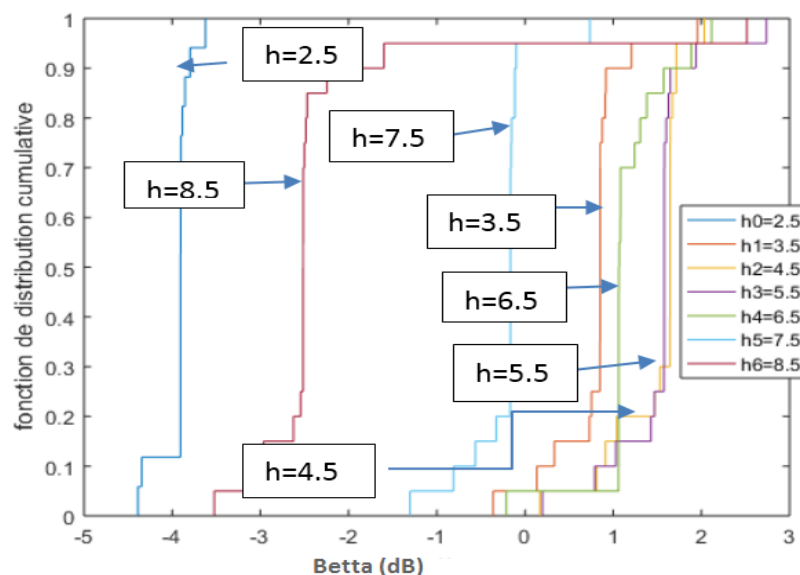


Figure 3.6 : Fonction de distribution cumulative (CDF) de β pour chaque position d'antenne du scénario NToR2.

Nous remarquons que pour les hauteurs Rx 3.5 cm, 4.5 cm, 5.5 cm, 6.5 cm les valeurs de β sont positives, donc les composants qui se reflètent du ToR contribuent à la puissance reçue d'une façon constructive. Pour les hauteurs 7.5, 8.5, 2.5 cm, les valeurs de β sont négatives ce qui implique que l'énergie contribué d'une façon destructive.

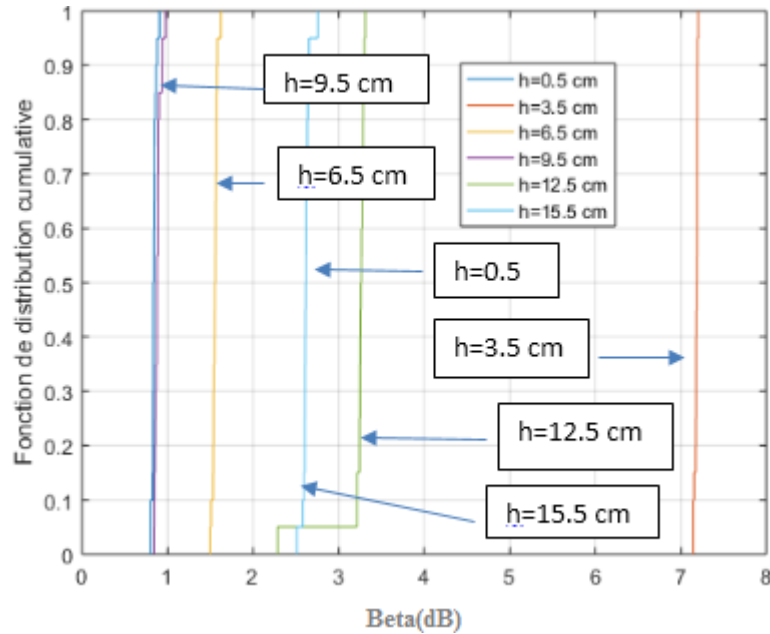


Figure 3.7 : Caractéristiques de β en fonction de distribution cumulative (CDF) pour chaque positionnement d'antenne Tx et Rx dans le cas du scénario NTOR1.

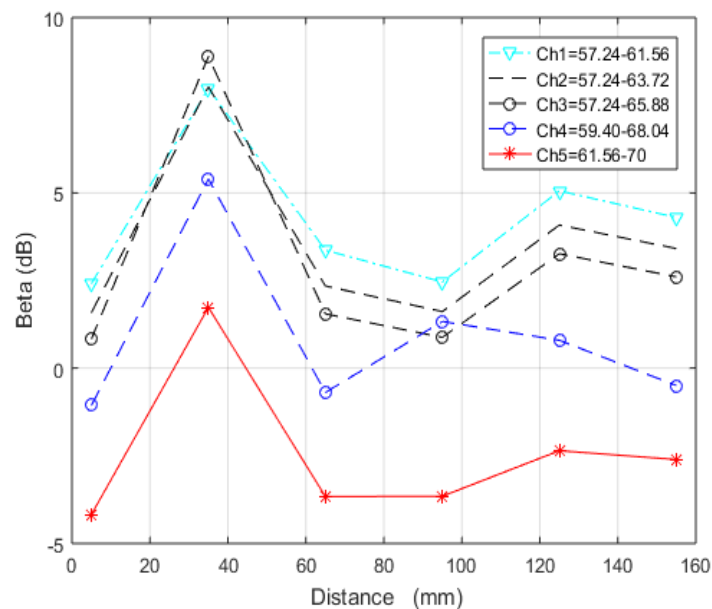


Figure 3.8 : Caractéristiques des paramètres β pour les cinq sous canaux en fonction de la distance du scénario NTOR1.

Les figures (3.7), (3.8) présentent la variation du paramètre β du scénario NTOR1 en fonction du positionnement d'antennes Tx et Rx, pour les cinq canaux agrégés. Nous remarquons qu'il y'a une grande réflexion sur la hauteur 3.5 cm, par rapport aux autres hauteurs pour tous les canaux. D'une autre manière l'énergie reçue au niveau du récepteur contribue d'une façon constructive.

Les résultats trouvés sont similaires à ceux dans un environnement de bureau en LoS [54]. Dans un environnement bureau LoS [54] on remarque que dans le cas où les antennes d'émission et de réception ont la même position, il y'a une grande réflexion, donc β est élevé, et ainsi l'énergie du signal est élevée. Lorsqu'il y'a une différence des hauteurs, l'énergie diminue, donc β aussi diminue. Plus que la différence de hauteur entre les deux antennes augmente, la valeur de β diminue donc il y'a une perte d'énergie. Dans ce cas on peut résumer que pour un environnement LoS, plus que la hauteur des antennes est similaire, β est plus grande. Cependant, comme il est expliqué dans [53], un changement léger à la position des antennes peut provoquer un évanouissement important [55]. Nos résultats sont comparés aussi à un environnement résidentiel avec une polarisation d'antenne verticale, et la distance entre les antennes de 3m.

3.4 Pertes du trajet dans le cas XToR

3.4.1 Modèle log-distance

Habituellement le modèle log-distance est souvent utilisé pour modéliser l'affaiblissement de parcours en fonction de la distance [2]. Il est exprimé par l'équation suivante :

$$PL(d) = PL_{dB}(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + S_{\sigma} \quad (3.13)$$

Où $PL_{dB}(d_0)$ est la perte de trajet à une distance de référence d_0 , d_0 généralement 1m, et peut être estimée sur la base des données de mesure qu'on peut effectuer dans le cas XToR, ou sur la base de mesures de référence à cette distance, n est l'exposant de perte de trajet, ce paramètre détermine la vitesse en indiquant auquel l'énergie diminue avec la distance entre les antennes Tx et Rx. Pour les scénarios LOS, il s'agit parfois de calculer de manière déterministe sur la base de la perte de trajectoire en espace libre, donné par l'équation suivante [56].

$$PL(d_0) = -20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (3.14)$$

Où λ est la longueur d'onde à la fréquence donnée, n est l'exposant de l'affaiblissement de parcours. La différence entre l'ajustement et les données mesurées est représentée par la

valeur de variable aléatoire gaussienne S_σ en dB, de moyenne nulle et d'écart type σ [57]. La perte de trajectoire moyenne et l'exposant de perte de trajectoire n ont été déterminés via une régression logarithmique.

Pour modéliser complètement l'affaiblissement et l'évanouissement à grande échelle, nous allons estimer les trois paramètres du modèle log-distance (équation 3.13), c'est-à-dire n , $PL(d_0)$ et S_σ à partir des mesures sur une distance allant jusqu'à 5m.

Scénario XToR

Les mesures des pertes de trajet ont été effectuées sur la bande de fréquence [57.24 GHz- 65.88 GHz] pour le scénario XToR dont la distance entre l'antenne d'émission et antenne de réception menée par dix (10) mesures sur cinq distances différentes 1, 2, 3, 4, et 5 m. Les pertes de trajet et les pertes en espace libre en fonction de la distance par l'utilisation du modèle log distance sont indiquées sur la figure (3.9), et le tableau (3.4) énumère les valeurs obtenues pour n et l'écart-type de S_σ .

Tableau 3.4: Valeurs du paramètre de modèle log distance.

La bande de fréquence (GHz)	$PL_0 d_0(d=1m)$	n	σ [dB]
57.24-65.88	68.22	2.59	1.14

D'après les résultats présentés dans le tableau (3.4), nous pouvons voir que la valeur d'exposant de perte de trajet obtenue pour le cas XToR ($n=2.59$) est supérieure à la valeur en espace libre ($n=2$), c'est-à-dire la propagation dans le cas XToR peut présenter une forte atténuation à cause de la diffusion de l'énergie des trajets multiples par le ToR.

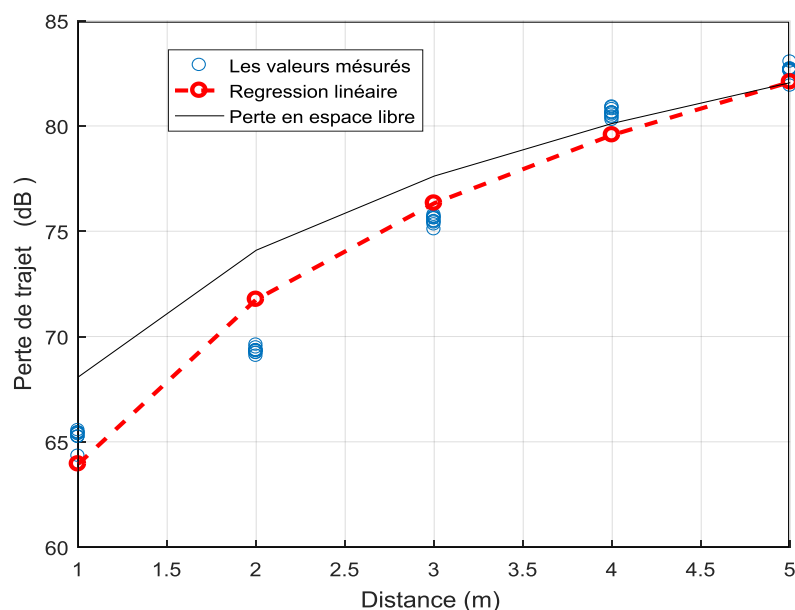


Figure 3.9: Pertes de trajets de la bande de fréquence 8.64 GHz en scénario XToR.

Il existe plusieurs travaux, dans la littérature, qui ont montré des résultats très proches à ceux obtenus par notre approche, tels que, des couloirs, une pièce blindée [20], les enceintes métalliques [58], l'exposant de perte dans ce cas est ($n=1.55$) en LOS, en salle de conférence ($n=1.77$). En outre, la valeur de n est marginalement grande comparée à $n=2.02$ obtenus dans le même contexte XToR à 7 GHz à cause de l'augmentation de la bande passante [54]. Une autre étude de M. El Khaled [42] dans une mine souterraine a été utilisée des antennes Horn-Horn, Omni-Horn de fréquence [57.24 GHz-59.4 GHz] sur la bande 2.16 GHz a montré les exposants de perte de trajectoire de $n=1.82$ en (H-H), et $n= 1.28$ (V-V), tout en visibilité directe (LoS. De plus la valeur de l'exposant de l'affaiblissement de parcours dépend de la régularité de l'environnement, les caractéristiques des antennes, ces derniers sont des effets significatifs sur l'énergie reçue au niveau du récepteur et explique les valeurs différentes par rapport à nos résultats.

3.4.2 L'ombrage ou évanouissement lent

Le milieu de propagation en centre de données étant varié et diverse, le phénomène qui représente un écartement au niveau de la puissance par rapport à sa valeur est appelé l'effet d'ombre. Ce phénomène suit généralement une distribution normale (en dB) et donnée par le terme σ qui varie aléatoirement. Le résultat est rapporté dans le tableau précédent (3.4).

La petite valeur de $\sigma =1.14$ dB représente l'écart entre les valeurs de la puissance moyenne locale et leur ligne de régression linéaire. Un écart important de la puissance du signal par rapport à sa moyenne est observé à certains endroits mesurés. Cela s'explique par la faible présence d'objets encombrants dans le canal ou à côté des antennes d'émission et de réception et la nature de l'environnement.

La figure (3.10) représente la fonction de distribution cumulative de l'écarte type d'effet d'ombrage (shadowing) ainsi que la distribution normale correspondante (estimée par un « best fit »). Cette courbe nous montre que l'ombrage est mieux représenté par une distribution normale en dB, (conforme au niveau de la littérature [59]).

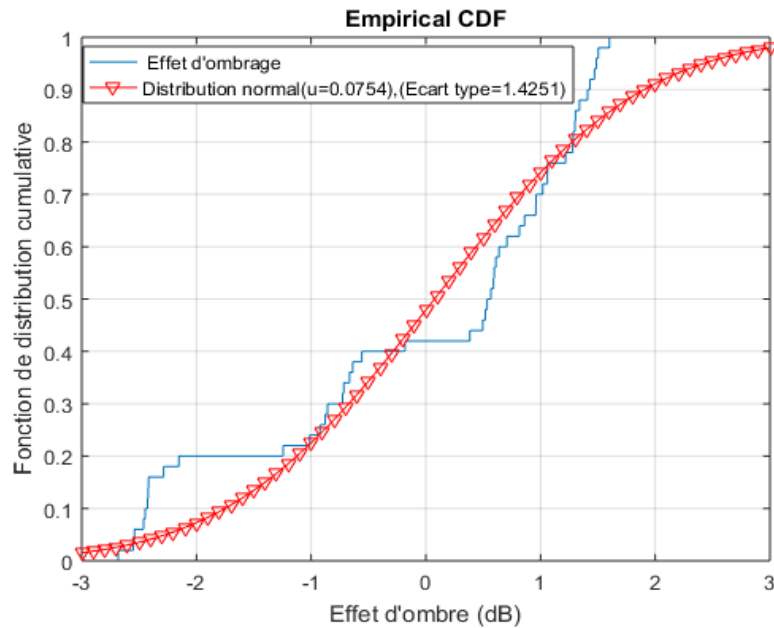


Figure 3.10: Fonction de distribution cumulative d'effet d'ombrage et la distribution normale en adéquation.

Nous avons expliqué au début que l'évanouissement lent est la variation de la puissance entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception en fonction de la distance. Cette variation est la différence entre les pertes mesurées et la droite de régression linéaire en fonction de la séparation entre les antennes (Tx et Rx), voir la figure (3.10).

La figure de (CDF) nous montrons une augmentation de l'ombrage. Cela peut s'expliquer par le fait de la production des fortes fluctuations au niveau du canal de propagation. Nous remarquons aussi (figure 3.9) que l'effet d'ombrage est important à la distance $d=2\text{m}$ par rapport aux autres distances.

Nos résultats trouvés pour la bande de fréquence 8.64 GHz sont proches aux résultats trouvés dans les bureaux à la bande 60 GHz [59], où la valeur d'ombrage est égale à 1.8 dB. Nos résultats sont aussi comparables aux résultats des mesures dans une mine souterraine avec des antennes de polarisation H-H, et des valeurs d'évanouissement égales à 1.9 et 1 dB [60]. On peut dire que la modélisation d'effet d'ombrage est caractérisée selon la nature et la taille de l'environnement étudié.

3.5 Capacité du canal XTOR

La capacité est la plus grande quantité d'information qu'on puisse transmettre sur un canal radio. Dans cette section, nous étudions la capacité non réalisable du canal en fonction des pertes de trajets du modèle log-distance, et les pertes en espace libre pour une bande passante égale à 8.64 GHz (qui correspond à 4 canaux agrégés du standard 802.11ay). Cette étude nous aide à définir la variation de la capacité en fonction de l'atténuation à grande

échelle du canal pour garantir des performances adéquates au niveau du récepteur. À l'aide d'indice de propagation n et la valeur d'évanouissement obtenue dans la section précédente, on peut déterminer aussi la valeur de capacité en fonction de perte de propagation demandée dans cette partie.

Dans la suite nous allons définir la sensibilité nécessaire au niveau du récepteur, si le bruit thermique est la principale source d'interférence, par la relation suivante :

$$S_r = N + F + SNR \quad (3.15)$$

Le bruit thermique est donné par :

$$N = K.T.B \quad (3.16)$$

Où N est le bruit thermique du système (donné en dB par $N = -174 + 10 \log(B) + NF$), F est le facteur de bruit supposé être 0 dB après normalisation, SNR est le rapport signal / bruit au niveau du récepteur, T la température égale à 300 Kelvin, K est la constante de Boltzmann égale à $1.38 \cdot 10^{-23}$ j/k, et NF le bruit systématique de 3 dB,

La puissance minimale du récepteur doit être supérieure ou égale à la sensibilité requise pour garantir les performances du système au niveau du récepteur [61].

La relation entre les performances du système et les pertes en espace libre, et le modèle log distance sont données par les équations [62] :

$$Pr = Pt + Gr + Gt - PL(d) \quad (3.17)$$

$$SNR \leq Pt - N - PL(d) + Gr + Gt \quad (3.18)$$

La relation de la capacité en fonction de l'espace libre est [62]:

=

$$154 - PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \sigma \quad (3.19)$$

=

$$154 - 20 \times \log_{10} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f_c}{c} \right) \quad (3.20)$$

Donc on peut calculer la capacité du système à bruit en fonction de la capacité de Shannon par l'équation suivante :

$$C = B \log_2 [1 + SNR] \quad (3.21)$$

Où B est la bande passante, et SNR est le signal sur bruit au niveau du récepteur.

En substituant (3.19) en (3.20) la formule de la capacité en fonction de la distance est :

$$C = B \log_2 \left(1 + 10^{(SNR/10)} \right) \quad (3.22)$$

D'où le gain de transmission et de réception ($G_t=G_r= 8$ dB), la puissance de transmission ($P_t= 10$ dB) et la bande passante ($B=8.64$ GHz).

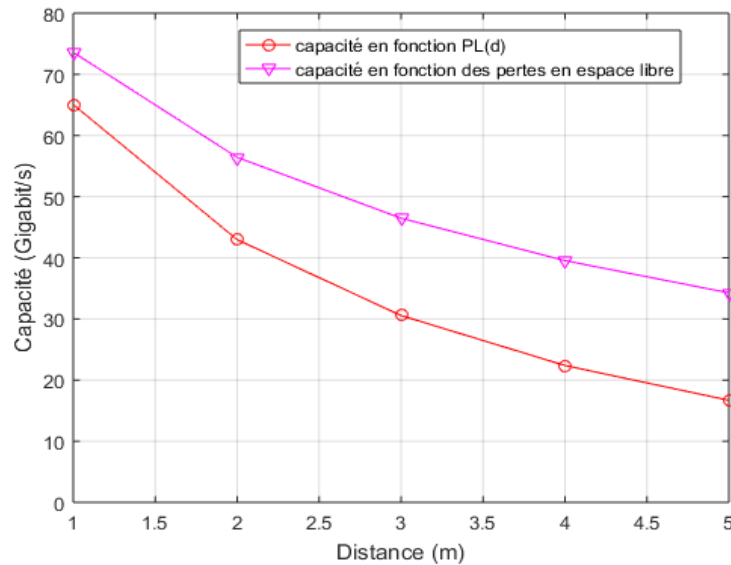


Figure 3.11 : Capacité du canal XToR en fonction des pertes en espace libre, et les pertes du modèle log-distance.

Les résultats obtenus par des simulations réalisables de la capacité du canal XToR en LoS sont illustrés sur la figure (3.11), et déduits des mesures utilisant la formule de Shannon.

Dans le but d'étudier l'impact de la distance sur la capacité du système à 60 GHz, nous remarquons sur la figure (3.11) que la capacité diminue proportionnellement avec la distance entre les antennes Tx et Rx. On peut observer la grande valeur de capacité en fonction des pertes du modèle log-distance est dans les environs de 65 Gbit/s pour une distance de 1m, et diminue jusqu'à 18 Gbit/s pour une distance de 5 m. Tandis que pour le cas de la capacité en fonction des pertes en espace libre, est supérieur à celle du cas ($n=2.59$). Pour la distance 1m la capacité est de 73.5 Gbit/s, et diminue jusqu'à 34.5 Gbit/s. Donc on peut dire que la capacité diminue considérablement en fonction de la distance. Alors pour améliorer la capacité du canal il est nécessaire d'augmenter le SNR en augmentant les gains des antennes d'émission et de réception (G_t, G_r), ou la puissance de transmission P_t pour minimiser les pertes .

Sachant que la capacité représentée sur la figure (3.11) est générée de façon aléatoire sans moyenne statique.

On conclut que lorsque l'exposant de perte du modèle log distance est supérieur à celui de la perte en espace libre alors la capacité du modèle log distance devrait être inférieur à la capacité en espace libre.

Les résultats obtenus dans cette partie sont comparés au résultat de la mine souterraine à 40 m est 70 m présenter dans [60], il est à noter que nos résultats avec une bande passante de 8.6 GHz et un gain de 8 dB sont meilleurs aux résultats de la mine, d'où la capacité de la mine est d'environ de 9.5 Gbit/s jusqu'à 4 Gbit/s par décade de la distance 1 mètre à 7 mètres entre Tx et Rx.

3.6 Synthèse des résultats

En cas général, la caractérisation et la modélisation du canal mmW sont importantes dans la conception des systèmes de communication sans fil. En effet l'analyse des résultats obtenus par les compagnes de mesures pour les cas d'usage dans le centre de données, à savoir NToR et XToR, offre un outil pour évaluer les performances des systèmes de transmission dans un canal de propagation réaliste.

Dans notre cas, on remarque que les pertes de trajets augmentent avec la distance, et l'exposant de perte est $n= 2.59$, suivi d'un effet d'ombrage qui augmente avec le fait des fluctuations au niveau du canal de propagation, Nous avons trouvé aussi que la capacité en fonction des pertes en espace libre est supérieure à celle en fonction de perte du modèle-log distance, et qui diminue proportionnellement avec la distance entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice, et varie de 34.5 Gigabits/s jusqu'à 73.5 Gigabit/s, en espace libre, et de 18 Gigabits/s jusqu'à 65 Gigabits/s dans le cas de notre modèle. Ces résultats serviront comme une référence utilisée dans l'évaluation des performances d'une couche physique.

3.7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats de traitement de mesures effectuées à 60 GHz pour les systèmes à mono antennes (SISO) dans un WDC. Une antenne d'émission Tx et autre de réception Rx ont été déplacée à une certaine distance et hauteur. La caractérisation expérimentale et la modélisation ont été présentées dans le cas de visibilité directe (LOS) entre l'émetteur et le récepteur en termes des pertes de trajectoire, l'effet d'ombrage, et de la capacité.

On note que l'affaiblissement de parcours augmente proportionnellement avec la distance, l'environnement et surtout avec la fréquence. Les pertes de trajet augmentent aussi en

fonction du changement de la position des antennes, donc l'effet d'évanouissement dépend de la hauteur et la distance des antennes.

L'exposant d'affaiblissement et l'effet d'ombre sont les paramètres étudiés avec des antennes directionnelles en polarisation verticale. D'où l'exposant de perte obtenu est supérieur par rapport à l'espace libre, et la valeur d'effet d'ombre que nous avons trouvée est petite par rapport aux résultats d'une mine souterraine, ce qui est expliqué par l'absence des paramètres encombrants de la propagation de l'onde radio, et la nature d'environnement étudié.

La modélisation du canal indoor à 60 GHz se fait par le modèle de Salah Valenzuela. à travers ce modèle, Shoji et Sawada ont développés un modèle de canal statistique à deux trajets, nous allons utilisé aussi le modèle log-distance pour modéliser les pertes du trajet et l'évanouissement lent. Tous ces résultats sont caractérisés dans le canal à bande millimétrique pour les futures générations à haut débit et haute fréquence, afin d'étudier l'impact de l'augmentation de la fréquence et la distance entre les antennes Tx et Rx.

Par ailleurs, ce travail à révéler certains aspects pour la conception des nouveaux systèmes de communication à haute performance. L'extension de la caractérisation du canal vers des systèmes MIMO à multi antennes et massive MIMO, afin de surmonter l'évanouissement et améliorer la fiabilité des liaisons, ouvrira la voie à une grande variété de cas d'utilisation et d'applications.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre mémoire de recherche rentre dans le cadre d'étude d'un canal à bande millimétrique pour les futures générations de haute fréquence. L'amélioration de la vitesse de transmission dans les réseaux sans fil et la nécessité d'avoir des débits de transmission plus importants, sont les facteurs qui obligent les ingénieurs de télécommunication de trouver des nouvelles technologies et de traiter le problème de saturation spectrale.

Par conséquent la 5^{ème} génération permet d'exploiter la bande millimétrique, cette bande peut fournir d'une manière potentielle une capacité jusqu'au Gbit/s pour transporter les données avec des pertes faibles dans une bande passante autour de 60 GHz. Dans ce sens, notre mémoire propose d'étudier la caractérisation et la modélisation du canal SISO à 60 GHz pour différentes distances et positions d'antennes dans un centre de données.

Les mesures et la modélisation des canaux sont des conditions obligatoires pour construire un nouveau système sans fil. Plusieurs recherches ont prouvé que les canaux à très hautes fréquences peuvent être utilisés dans les environnements industriels.

Dans ce mémoire nous avons étudiés premièrement la caractérisation de la perte de trajet dans un scénario NToR où les antennes (Tx et Rx) ont la même hauteur. Les mesures sont prises à une bande de fréquence [57.24 GHz -70 GHz] pour 11 canaux de différentes bandes. Ces derniers sont devisés en 6 canaux, où la bande de fréquence 2.16 GHz, et 5 canaux agrégés par la norme IEEE.802.11ay ont des bandes différentes de 4.32 GHz, 6.48 GHz et 8.64 GHz.

Nous avons également étudié un modèle à deux trajets pour le scénario NToR1 à une plage de fréquence [57.24 GHz- 70 GHz] où l'antenne Tx et Rx est la même position, et pour le scénario NToR2 dont l'antenne Tx est fixe et l'antenne Rx menée à des hauteurs différentes. Ces études ont pour le but de caractériser les paramètres de gain (β) à travers le modèle à deux trajets (le trajet réfléchi et le trajet direct). Par la suite nous avons modélisé la perte de trajet de la bande 8.64 GHz, l'évanouissement lent et la capacité du canal par le modèle log-distance de scénario XToR.

Les résultats obtenus ont montré que les pertes de trajets changent proportionnellement avec la distance ; c-à-d les pertes augmente avec la fréquence, la hauteur et la fréquence du canal mesuré. Nous avons vu aussi que les paramètres comme la capacité et l'effet d'ombrage diminuent en fonction de la distance. À la fin, les résultats présentés dans ce travail de recherche peuvent être utiliser pour caractériser et modéliser des canaux à 60 GHz dans la conception des réseaux de nouvelle génération.

En perspective, les principaux points envisageables pour la suite de ce travail sont :

- Plusieurs axes d'études peuvent être envisagés pour faire suite à ces travaux pour une caractérisation à petite échelle (le calcul des paramètres temporels).
- Une construction d'une caractérisation de canal à 60 GHz avec d'autres techniques comme MIMO et massive MIMO.

Bibliographie :

- [1] Pascal Pagani, Patrice Pajusco, "Le canal de propagation Ultra Large Bande : sondage, caractérisation et modélisation", Thèse de doctorat, REE - Revue de l'électricité électronique, pp.84 - 90, 2013.
- [2] Y. Cui, H. Wang, X. Cheng and B. Chen, "Wireless data center networking," in IEEE Wireless Communications, Tsinghua University, vol. 18, no. 6, pp. 46-53, December 2011.
- [3] B. Safia and Y. Selma, "Technologie Radio sur Fibre pour les applications sans fil 5G," Mémoire master II, Université 8 Mai 1945 - Guelma, 2019.
- [4] T. S. Rappaport and al, Millimeter wave wireless communications, Pearson Education, 2015.
- [5] A. Khelil, " Etude Et Performance D'un Systeme de Communication Sans Fil à base OFDMA MiMo," Mémoire master II, Université Ferhat Abbas – Sétif -1-, 2018.
- [6] I. A. Hemadeh, K and all, "Millimeter-wave communications: Physical channel models, design considerations, antenna constructions, and link-budget," Enquêtes et didacticiels sur les communications IEEE, vol. 20, no. 2, pp. 870-913, 2017.
- [7] S. Redana et al, 5G PPP Architecture Working Group: View on 5G Architecture, 2019.
- [8] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, 5G NR: The next generation wireless access technology. Academic Press, 2018.
- [9] D. Stanley, "Wi-Fi 6 and Beyond" IEEE 802.11 Working Group Chair, pp 1-54, 2019.
- [10] P. Popovski and al, "5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View," in IEEE Access, vol. 6, pp. 55765-55779, 2018.
- [12] D. MARWA and B. ASMA, "Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes multi-utilisateurs pour la 5G," Thèse de doctorat, Université 8 mai Guelma, 2019.
- [13] A. Rozé, "Massive MIMO, une approche angulaire pour les futurs systèmes multi-utilisateurs aux longueurs d'onde millimétriques," thèse de doctorat, Université Bretagne Loire, 2016.

- [14] C. Lounis, and al, "Large-scale characterization of an underground mining environment for the 60 GHz frequency band," Conference International sur les communications sans fil dans les zones souterraines et confines, pp. 1-4: IEEE, 2012.
- [15] I. A. Hemadeh and al, "Millimeter-Wave Communications: Physical Channel Models, Design Considerations, Antenna Constructions, and Link-Budget," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 2, pp. 870-913, Secondquarter 2018.
- [16] C. Hamouda, "Étude d'une architecture d'émission/réception impulsionnelle ULB pour dispositifs nomades à 60 GHz," thèse de doctorat en Electronique, Université paris-est école doctorale mstic, 2014.
- [17] P. Kumari, N. Gonzalez-Prelcic, and R. W. Heath, "Investigating the IEEE 802.11ad standard for millimeter wave automotive radar," in IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall), pp. 1-5: IEEE, 2015.
- [18] X. Lu et al, "Integrated Use of Licensed- and Unlicensed-Band mmWave Radio Technology in 5G and Beyond," in IEEE Access, vol. 7, pp. 24376-24391, 2019.
- [19] Y. Ghasempour and al, "IEEE 802.11ay: Next-Generation 60 GHz Communication for 100 Gb/s Wi-Fi," in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 12, pp. 186-192, Dec. 2017.
- [20] M. Kyro and al, "60 GHz radio channel measurements and modeling in a shielded room," in IEEE 71st Vehicular Technology Conference, pp. 1-5: IEEE, 2010.
- [21] M. Zaaimia and al, "60 GHz wireless data center channel measurements: Initial results," in IEEE International Conference on Ultra-WideBand (ICUWB), pp. 57-61: IEEE, 2014.
- [22] M. El Khaled, P. Fortier and M. L. Ammari, "A Performance Study of Line-of-Sight Millimeter-Wave Underground Mine Channel," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 13, pp. 1148-1151, 2014.
- [23] A. Loch and al, "A channel measurement campaign for mmWave communication in industrial settings," arXiv preprint arXiv:1903.10502, 2019.

- [24] J. Karedal and al, "UWB channel measurements in an industrial environment," in IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM'04, vol. 6, pp. 3511-3516:, 2004.
- [25] J. Karedal and al, "A Measurement-Based Statistical Model for Industrial Ultra-Wideband Channels," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 6, no. 8, pp. 3028-3037, August 2007.
- [26] C. G. Spiliotopoulos, A. G. Kanatas, and G. Eftymoglou, "UWB channel parameters in a C130 airplane," in 2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp. 1766-1770, 2009.
- [27] A. Garcia et al, "60 GHz in-cabin real-time channel sounding," in Fourth International Conference on Communications and Networking in China, pp. 1-5: IEEE, 2009.
- [28] A. P. Garcia and al, "60 GHz time-variant shadowing characterization within an Airbus 340," in Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, pp. 1-5: IEEE, 2010.
- [29] C. Lounis, N. Hakem, and G. Y. Delisle, "Characterization of the 60 GHz channel in underground mining environment", in Proceedings of the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 1-2: IEEE, 2012.
- [30] I. Ben Mabrouk and al, "Feasibility of a Millimeter-Wave MIMO System for Short-Range Wireless Communications in an Underground Gold Mine," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 8, pp. 4296-4305, Aug 2013.
- [31] M. Kyrö and al, "Statistical Channel Models for 60 GHz Radio Propagation in Hospital Environments," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 3, pp. 1569-1577, March 2012.
- [32] M. Kyrö and al, "Development of a channel model for 60 GHz radio systems in an angiography room," in IEEE Topical Conference on Biomedical Wireless Technologies, Networks, and Sensing Systems, pp. 39-42: IEEE, 2011.
- [33] M. Kyrö, and al, "Feasibility study of 60 GHz radio systems in hospital environments," in 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp. 557-561: IEEE, 2012.

- [34] M. Kyrö, and al, "Validation of Statistical Channel Models for 60 GHz Radio Systems in Hospital Environments," in IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 60, no. 5, pp. 1458-1462, May 2013.
- [35] K. Haneda, and al, "A Statistical Spatio-Temporal Radio Channel Model for Large Indoor Environments at 60 and 70 GHz," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 6, pp. 2694-2704, June 2015.
- [36] A. Karttunen and al, "Radio propagation measurements and WINNER II parameterization for a shopping mall at 60 GHz," in 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC), 2015.
- [37] D. Halperina and al, "Augmenting data center networks with multi-gigabit wireless links," in Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 conference, pp. 38-49, 2011.
- [38] Y. Cui, and al, "Wireless data center networking", in IEEE Wireless Communications, vol. 18, no. 6, pp. 46-53, December 2011.
- [39] Y. Katayama and al, "Wireless data center networking with steered-beam mmwave links," in 2011 IEEE wireless communications and networking conference, pp. 2179-2184: IEEE, 2011.
- [40] C. Gentile and al, "Quasi-Deterministic Channel Model Parameters for a Data Center at 60 GHz," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 5, pp. 808-812, May 2018.
- [41] S. Mollahasani and E. Onur, "Evaluation of terahertz channel in data centers," in NOMS 2016-2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, pp. 727-730: IEEE, 2016.
- [42] Rhode et Schwarz " Sondage de canaux 5G ".
- [43] S. Sun, G. R. MacCartney, and T. S. Rappaport, "A novel millimeter-wave channel simulator and applications for 5G wireless communications," in 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1-7: IEEE, 2017.
- [44] S. M. Lopez, "Contributions au sondage de canal à l'intérieur des bâtiments : Direction de Départ, étalement Doppler, polarisation des ondes reçues et modélisation de canaux UWB," Thèse de doctorat, Télécom Paris Tech, 2008.

- [45] Y. Rissafi, "Caractérisation d'un canal minier souterrain ultra-large bande (3GHz-10GHZ)," mémoire master II, université du Québec en Outaouais 2007.
- [46] Y. Shoji and al, "A Modified SV-Model Suitable for Line-of-Sight Desktop Usage of Millimeter-Wave WPAN Systems," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 57, no. 10, pp. 2940-2948, Oct. 2009.
- [47] H. Chehri, "Étude et caractérisation d'un canal de propagation pour les réseaux VANET," mémoire master II, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2014.
- [48] M. Z. Zaaimia and al, "60-GHz Statistical Channel Characterization for Wireless Data Centers," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 15, pp. 976-979, 2016.
- [49] F. Challita, "Université de Lille Massive MIMO Channel Characterization and Propagation-based Antenna Selection strategies: Application to 5G and Industry 4.0," Université de Lille, 2019.
- [50] R. Abdaoui, "Architectures multi-bandes en mode impulsionnel et circuits pour des applications nomades très haut débit autour de 60GHz," Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2012.
- [51] A. J. Rustako et al, "Radio propagation at microwave frequencies for line-of-sight microcellular mobile and personal communications," IEEE Transactions sur la technologie véhiculaire, vol. 40, pp. 203–210, Feb. 1991.
- [52] R. Jakoby and U. Liebenow, "Modeling of radiowave propagation in microcells," IEEE conference publication. Institution of electrical engineers, pp. 377–380, Apr. 1995.
- [53] H. Sawada, Y. Shoji, and C.-S. Choi, " Proposal of novel statistic channel model for millimeter wave WPAN," in 2006 Asia-Pacific Microwave Conference, pp. 1855-1858: IEEE, 2006.
- [54] H. Sawada, Y. Shoji, "IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs)," 2006.
- [55] T. Pollock and al, "Residential 60 GHz Channel Measurements and Model," IEEE 802.15-06-0317-00-003c, IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), Juillet 2006.

- [56] B. Mnasri, "Caractérisation d'un canal de propagation souterrain en utilisant la technologie MIMO et le traitement dans le domaine angulaire," mémoire master II, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2013.
- [57] I. Ben Mabrouk, "Caractérisation d'un Canal Minier Souterrain Utilisant les Techniques MIMO," mémoire master II, Université du Québec en Outaouais, 2012.
- [58] S. Khademi and al, "Channel measurements and modeling for a 60 GHz wireless link within a metal cabinet," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 14, no. 9, pp. 5098-5110, 2015
- [59] P. F. M. Smulders, "Statistical Characterization of 60 GHz Indoor Radio Channels," IEEE Transaction on Antenna and Propagation, vol. 57, no. 10, pp. 2820–2829, 2009.
- [60] M. El Khaled, "Systèmes de communications à ondes millimétriques pour mines souterraines," Thèse de doctorat, université du Québec, 2015.
- [61] M. El Khaled and al, "A performance study of line-of-sight millimeter-wave underground mine channel," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 13, pp. 1148-1151, 2014.
- [62] M. El Khaled and al, "Capacity of the millimeter wave underground mine channel," Department of Electrical and Computer Engineering, Laval University, Quebec, Canada in IEEE 14th Canadian Workshop on Information Theory (CWIT), pp. 123-126: IEEE, 2015.

Résumé :

Les systèmes de communication sans fil sont devenus l'un des sujets de recherche actuel, notamment dans les environnements industriels. La montée en fréquence vers le spectre des ondes millimétriques présente un intérêt majeur pour la prochaine génération de communication sans fil. Cette bande permet d'offrir une gamme de fréquences très importante, et d'assurer une augmentation des débits de transmission autour de plusieurs Gbit/s. La caractérisation des canaux de transmission dans les milieux non-conventionnels porte un intérêt important pour extraire les paramètres du canal de propagation, et d'établir une interprétation correcte des données mesurées, afin de créer des modèles complets qui pourraient fournir des données de mesure fiables avec des informations directionnelles pour les hautes fréquences. Ce travail est une contribution à la modélisation et la caractérisation du canal radio en bande millimétrique pour deux scénarios XToR et NToR dans un centre de données à 60 GHz à partir des mesures effectuées par une approche expérimentale, qui passe par un sondeur VNA (Analyseur de réseau Vectoriel) du canal millimétrique en visibilité directe (LOS). La réponse fréquentielle couvrant les fréquences balayées entre les fréquences [57.24 GHz - 70 GHz] est utilisée pour extraire les caractéristiques des pertes de trajets, l'évanouissement rapide, et la capacité du canal de propagation.

Mots clés : Ondes millimétriques, 5G, sondage de canal, environnement industriel, mesures de canal, 60 GHz, VNA, caractérisation de canal, modélisation de canal

Abstract :

Wireless communication systems has widely investigated research topics, especially in industrial environments. The frequency millimeter wave spectrum is one of major interest for the next generation. This spectrum offers a handers of bandwidths rang and enhancing the transmission rates around several Gbit/s. The characterization of transmission channels in unconventional environments is of great interest to extract the propagation channel parameters, and to establish a correct interpretation of the measured data. In order to create complete models, the standardization bodies could provide reliable measurement data with directional information for high frequencies. The contribution of Thesis represents the modeling and characterization of the millimeter-wave radio channel for two XToR and NToR scenarios in a 60 GHz data center, based on measurements performed by an experimental approach, which uses a (VNA (Vectoriel Network Analyzer)) sound-detector of the millimeter channel in line-of-sight (LOS). The frequency response analysis the swept frequencies between the rang 57 GHz - 70 GHz, which indicates to extract the characteristics of path loss, rapid fading, and propagation channel capacity.

Key-words:: Millimeter waves, 5G, channel sounding, industrial environment, channel measurements, 60 GHz, VNA, channel characterization, channel modeling.

المخلص :

أصبحت أنظمة الاتصالات اللاسلكية أحد مواضيع البحث الحالية، خاصة في البيئات الصناعية. يعتبر ارتفاع التردد نحو طيف الموجات المليمترية ذا أهمية كبيرة للجيل القادم من الاتصالات اللاسلكية. حيث يقدم نطاق تردد عالي ويضمن زيادة تدفق معدل ارسال البيانات حوالي. Gigabit/s يعد وصف قنوات الارسال في البيئات الغير التقليدية ذا أهمية كبيرة لاستخراج خصائص قناة الانتشار، وانشاء تفسير صحيح للبيانات المقاسة لانشاء نماذج كاملة لهيئات القياس المختلفة و بيانات قياس موثوقة معلومات اتجاهية للترددات العالية. هذا العمل يساهم في ندمجة ووصف القناة الراديوية في النطاق الملمتري عبر سيناريون مختلفين (XToR et NToR) داخل مركز بيانات 60 GHz عن طريق مجموعة من القياسات تم اجراؤها بواسطة نهج تجريبي الذي عبر محلل عمودي رقمي (VNA) عبر الرؤية المباشرة بين الهوائيين (LoS). تستخدم استجابة التردد بين [57 GHz- 70 GHz] في استخراج خصائص القناة : فقدان المسار بين الهوائيين، السعة، وانخفاض الطاقة.

الكلمات المفتاحية: الموجات المليمترية، الجيل الخامس، البيئات الصناعية، وصف القناة، ندمجة القناة، VNA, GHz, 60 , قياس القناة.
