

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electronique

N° :...../2022

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Sciences et Technologies

FILIERE: Télécommunications

SPECIALITE : Systèmes des télécommunications

Thème

*Caractérisation de l'obstruction de la main humaine sur
les liaisons radio à ondes millimétriques.*

Présenté Par : Rania AMIRI

Encadré Par : Mohammed Zakaria ZAAIMIA

Rayane CHERAITIA

Date de soutenance : 11/09/2022

Jury de Soutenance

Président : Fayçal BOUKERROUM

Grade MCA Univ MSB Jijel

Encadrant : Mohammed Zakaria ZAAIMIA

Grade MCA Univ MSB Jijel

Examineur 1 : Mohammed TAMOUM

Grade MCB Univ MSB Jijel

Promotion : 2021 /2022

Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'études de master au département d'électronique de la faculté des sciences et de la technologie de l'université **Mohammed Seddik Ben Yahia - Jijel**.

Tout d'abord, nous tenons à remercier **Allah** de nous avoir donné la force, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

En premier lieu, nous voudrions remercier nos parents pour nous avoir encouragés et pour nous avoir donné l'opportunité à chaque étape de nos vies.

Nous tenons à remercier ensuite le directeur de ce mémoire **Mr. M Zakarya ZAAIMIA** maitres de conférences classe A à l'université de Jijel, pour le choix du sujet, pour son suivi, pour ses conseils et pour la pertinence de ses remarques.

Nos remerciements s'adressent aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, et qui nous feront le plaisir d'apprécier.

Nos remerciements vont également à tous ceux et celles qui de près ou de loin nous ont apporté aide et encouragement et surtout nos amis.

Merci enfin, à tous ceux qui de près ou de loin, nous ont aidés et encouragés et surtout nos amis qui ont contribué au succès de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents Mohammed et Nadia, pour tous sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières qui m'ont toujours encouragé et tout au long de mes études

À mes chères sœurs Louiza et Houda pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral,

À mon frère Bachir le fruit de la famille je te souhaite la réussite et le bonheur dans ta vie

À mes tantes et oncles

À tous mes amis...

À toute autre personne que je n'ai pas citée et dont l'aide m'a été précieuse.

Merci d'être toujours là pour moi.

Rania

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

\par À mes très chers parents, qui m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long mon parcours, en témoignage de ma reconnaissance et de mon profond amour et respect pour vos grands sacrifices espérant que ce modeste travail vous rendra fières.

À mes confidentes, mes sœurs chéries ; Selma, Imene, Aida et mes sœurs de cœur, mes princesses ; Amira et Amira : celles qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotions lors de la réalisation de ce travail, votre présence à mes côtés a été toujours ma source de force pour affronter les différents obstacles, je vous adore.

À mes frères et mon beau-frère Amine.

À mon bout de sucre Ania.

À mon cher oncle Abdelhakim Cheraitia.

À la mémoire de ma très chère grand-mère qui aurait bien voulu voir cet instant, que ton âme repose en paix.

À toute ma famille, mes proches et mes chers amis : qui font tous partie de cette belle réussite.

Rayane

Liste des tableaux

1.1	Les bandes 5G.	5
1.2	Taxonomie des technologie 802.11ay qui utilisent le spectre sans licence.	12
1.3	Types de modulation de la Couche physique du standard 802.11ay.	13
1.4	Avantages et inconvénients des ondes millimétriques.	13
2.1	Résumé chronologique des principaux travaux sur le blocage du corps humain en bandes millimétriques.	20
2.2	Les paramètres du sondeur du canal.	21
3.1	Caractérisation de t_{decay} et t_{rise} de l'évènement EB statique.	38
3.2	Comparaison d'ajustements des distribution et la Cumulative-Distribution-Functions (CDF) du EB statique	39
3.3	Caractérisation de t_{decay} et t_{rise} de l'évènement EB dynamique.	42
3.4	Comparaison des formes de distribution les plus proches à EB dynamique	43
3.5	Paramètres des distributions de probabilité de la puissance par les Doigts.	47
3.6	Puissance par les doigts et la paume de main.	51
3.7	Caractérisation du blocage par effet Doppler.	52

Table des figures

1.1	Application des bandes millimétriques Millimeter Wave Bands (mmWave)	6
1.2	Principe de la formation des faisceaux [1].	9
1.3	Représentation de l'atténuation causée par les gaz atmosphériques [2].	10
1.4	Représentation de l'atténuation par feuillage.	11
1.5	Représentation de l'atténuation dans l'espace libre.	11
1.6	Atténuation due à la pluie par rapport à la fréquence à différents taux de pluie [3].	12
1.7	Architecture de réseau du système MN avec relais mobile basé sur SL[4].	14
1.8	Bandes de fréquences sans licence/partagées pour les opérations NR-U [5].	15
1.9	Illustration des réseaux body area network (BAN) [6].	16
1.10	schéma représentant la structure de la peau [7].	17
2.1	Schéma représentant le système de mesure.	21
2.2	Diagrammes de rayonnement d'antenne 2D mesurés avec différentes polarisations [8].	22
2.3	Variation de puissance en fonction de temps ; EB (Shadowing event) et SEB (Series of shadowing events).	23
2.4	Modèles d'écran absorbants d'un corps humain : (a) Modèle à double tranchant, (b) Modèle à triple tranchant de [9].	26
2.5	(a) Écran absorbant demi-plan, (b) Coin entre deux points de Tx et Rx[9].	27
2.6	(a) Corps humain bloquant la ligne de vision entre les sources ponctuelles Tx et Rx, (b) et (c) Deux sous-problèmes pour résoudre les effets d'ombrage dus au corps humain [9].	28
2.7	Champ reçu normalisé (Rx) à diverses fréquences radioélectriques en raison de l'ombre humaine le long du chemin de marche ; la géométrie du corps humain, les emplacements Tx et Rx sont définis dans la Figure 2.6 (a) [9].	29
2.8	Modèle de blocage de liaison : (a) modèles circulaires, (b) cylindres elliptiques [9].	29

2.9	Géométrie d'un modèle de blocage de liaison. Les vues latérales et supérieures de la géométrie représentées dans les figures en haut à droite et en bas à droite sont appelées "projections 1 et 2", respectivement dans le texte [9].	31
2.10	Comparaison des modèles de blocage humain pour différentes orientations azimutales d'un corps humain : (a) 15, (b) 28, (c) 60 GHz [9].	33
3.1	Application des seuils sur la puissance et le gradient : (a) Puissance reçue, (b) Gradient.	36
3.2	Isolation du premier évènement "EB statique".	37
3.3	Extraction de t_{decay} pour EB statique.	37
3.4	Extraction de t_{rise} pour EB statique.	38
3.5	Représentation de la CDF pour l'évènement EB statique. : (a) Représentation de la fonction de densité cumulative de l'évènement SE statique , (b) Représentation de la fonction de densité cumulative du gradient.	39
3.6	Ajustement des distributions de probabilité EB statique : (a) Représentation de la densité de probabilité. (b) Représentation de la densité cumulative.	40
3.7	Représentation du gradient pour l'évènement EB statique.	40
3.8	Isolation du deuxième évènement "EB dynamique".	41
3.9	Extraction de t_{decay} pour EB dynamique.	42
3.10	Extraction de t_{rise} Pour EB dynamique.	42
3.11	Représentation de la CDF pour l'évènement EB dynamique. : (a) Représentation du gradient pour l'évènement EB dynamique, (b) Représentation de la fonction de densité cumulative de l'évènement EB dynamique, (c) Représentation de la fonction de densité cumulative du gradient.	43
3.12	Ajustement des distributions de probabilité EB dynamique : (a) Représentation de la densité de probabilité. (b) Représentation de la densité cumulative.	44
3.13	Représentation de l'évènement Serie d'évènements de blocage (SEB) par les doigts en fonction de la puissance.	45
3.14	Représentation des courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts.	46
3.15	Représentation de la variation temporelle du gradient pour l'évènement SEB par les doigts.	46
3.16	Représentation des courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts.	46
3.17	Représentation de la densité de puissance de l'évènement SEB par les doigts.	47
3.18	Représentation des courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts.	47
3.19	Représentation de l'évènement SEB par les doigts et la paume de main en fonction de la puissance.	48

3.20	Représentation des courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts.	49
3.21	Représentation de la variation temporelle du gradient pour l'évènement SEB par les doigts et la paume de main.	49
3.22	Représentation des courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts et la paume de main.	50
3.23	Représentation de la densité de puissance de l'évènement SEB par les doigts.	50
3.24	Représentation des courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts et la paume de main.	50
3.25	Spectrogramme de la réponse impulsionnelle mesurée du canal : (a) Vue horizontale . (b) Vue verticale	52
3.26	Spectrogramme des évènements EB statique et EB dynamique : (a) Vue fréquentielle dans un plan 2D . (b) Vue fréquentielle dans un plan 3D.	53
3.27	Spectrogramme de l'évènement SEB : (a) Vue fréquentielle dans un plan 2D SEB, (b) Vue fréquentielle dans un plan 3D.	53

Acronymes

3GPP Third Generation Partnership Project

5G Fifth generation

6G 6th generation

AFC automated frequency control

BAN body area network

BF Beamforming

CBRS Citizens Broadband Radio Service

CDF Cumulative-Distribution-Functions

CSMA/CA carrier sense multiple access / collision avoidance

D2D Device-To-Device

dBi Decibel-isotropique

dBm Decibel-milliwatt

DKED Double Knife-Edge Diffraction

EB évènements de blocage

EDMG Enhanced Directional Multi-Gigabit

eLAA Extended License Assisted Access

eMBB Enhanced Mobile BroadBand

eV2X Enhanced V2X

FACS Flexible Access Common Spectrum

FCC Federal Communications Commission

Gbps Giga-bit-par-seconds

GTD Geometrical Theory of Diffraction

HARQ Hybrid Automatic Repeat and request

HD	haute définition
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial Scientific Medical
ITS	Intelligent Transportation Service
ITU	International Telecommunications Union
LAA	License Assisted Access
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
Mbps	Mega-bit-par-seconds
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MLE	Maximum Likelihood Estimator
mMTC	Massive Machine-Type Communication
mmWave	Millimeter Wave Bands
MN	Moving Network
NLOS	Non Line of Sight
NR	New Radio
NR-U	New Radio-Unlicensed
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
O-LOS	Obstruction-LOS
PEC	Perfect Electric Conductor
Phy	Physical
PL	Pathloss
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
Rx	Receiver antenna
SAS	Spectrum Access System
SC	Single Carrier
SEB	Serie d'évènements de blocage
SISO	Single Input Single Output

SL	Sidelink
SNR	rapport signal sur bruit
STA	Station
TRN	Training Field for Beamforming
TVSHB	The Time-Variant Shadowing by Human Bodies
Tx	Transmitter antenna
UE	User Equipment
UHD	Ultra High Definition
UNII	Unlicensed National Information Infrastructure
URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communication
UTD	Uniform Theory of Diffraction
V2X	Vehicle to- Everything
VNA	Vector Network Analyzer
VSAT	Very Small Aperture Terminal
WiGig	Wireless Gigabit
WLAN	Wireless local area network
WPAN	Wireless personal area network
WPAN	Wireless personal area network

Table des matières

Liste des tableaux	iv
Table des figures	v
Acronymes	viii
Introduction Générale	1
Formulation du problème et motivations	1
Contributions et objectifs	2
1 Généralités sur les Communications à 60 GHz	4
Introduction	4
1.1 Les bandes 5G	4
1.1.1 Applications des ondes millimétriques	6
1.1.2 Antennes	8
1.1.3 Le beamforming	8
1.1.4 Caractéristiques de la propagation à 60 GHz	9
1.2 Principaux standard à 60 GHz	11
1.2.1 IEEE 802.11ad	11
1.2.2 IEEE 802.11ay	12
1.2.3 Avantages et inconvénients	13
1.3 La 5G en bandes millimétriques	13
1.3.1 5G-NR Sidelink	13
1.3.2 5G-Unlicensed	14
1.4 Les communications sans fil centrées sur le corps	15
1.4.1 Communications BAN à 60 GHz	15
1.4.2 Interaction des ondes millimétriques avec le corps humain	16

2 Mesures et Étude des Modèles de Blocage du Corps Humain	18
Introduction	18
2.1 Travaux connexes	19
2.2 Mesures et scénarios de blocage à 60 GHz	19
2.2.1 Système de mesure	19
2.2.2 Traitement des données	19
2.2.3 Identification des évènements	23
2.3 Modèles de blocage du corps humain	25
2.3.1 Modèle à double tranchant d'écran absorbant	26
2.3.2 Modèles de cylindres	28
2.3.3 Autres modèles heuristiques	31
2.3.4 Comparaison entre les modèles	33
Conclusion	33
3 Caractérisation des Évènements de Blocage d'une Main Humaine à 60 GHz	35
Introduction	35
3.1 Évènement de blocage d'une main statique	36
3.1.1 Caractérisation temporelle du début et la fin de l'évènement	37
3.1.2 Caractérisation de la puissance reçue	38
3.1.3 Taux de changement de la puissance	39
3.1.4 Analyse et discussions	39
3.2 Évènement de blocage d'une main en mouvement	41
3.2.1 Caractérisation temporelle du début et la fin de l'évènement	41
3.2.2 Caractérisation de la puissance reçue	42
3.2.3 Taux de changement de la puissance	44
3.2.4 Analyse et discussions	44
3.3 Série d'évènement de blocage par les doigts d'une main	45
3.3.1 Caractérisation de la puissance	45
3.3.2 Taux de changement de la puissance	45
3.3.3 Analyse et discussions	45
3.4 Série d'évènement de blocage par les doigts et la paume d'une main	48
3.4.1 Taux de changement de la puissance	49
3.4.2 Analyse et discussions	51
3.5 Caractérisation fréquentielle du décalage Doppler	51
3.5.1 Évènement EB statique	52

3.5.2 Évènement dynamique	53
3.5.3 Évènement SEB	53
Conclusion	54
Conclusion Générale	55
Bibliographie	56
Bibliographie	57

Introduction générale

Actuellement, le développement des réseaux de télécommunication a connu un essor phénoménal. Un défi important pour ce type de communication a été créé par la croissance des services en dehors de la voix. Une étape cruciale dans l'amélioration des services et de la qualité fournis est l'émergence de nouvelles normes de télécommunication qui assurent un débit et une couverture plus larges. La cinquième génération (5G) des systèmes de communication, qui devrait offrir des taux de transfert de données de l'ordre du gigabit aux appareils mobiles, utilise des fréquences de bandes millimétrique. Les caractéristiques de propagation à grande échelle de la bande millimétrique (mmWave) ont fait l'objet d'études intensives ces dernières années afin de produire des modèles des canaux, des simulateurs et la conception de réseaux pour les systèmes de communication mobile haut débit (Fifth generation (5G), 6th generation (6G)) afin de comprendre le comportement dynamique des ondes millimétriques. Ces études ont montré que les signaux (mmWave) sont extrêmement sensibles aux atténuations, ce qui entraîne des variations rapides qui affectent tous les protocoles. La norme 802.11ad a été conçue pour une utilisation en intérieur avec des applications à courte portée et à haute définition, un modèle de blocage humain a été du moment développé [10].

Cependant, par rapport au cellulaire classique, les propriétés de propagation de la bande millimétriques sont plus délicates. Dans les bandes à ondes millimétriques, la diffraction est pratiquement inexistante et la propagation se fait de la même manière que pour la lumière visible. Lorsque le feuillage et d'autres obstacles courants peuvent créer des obstructions considérables, la transmission à travers la plupart des objets est réduite. D'autre part, une plus grande puissance de réflexion offre de nouvelles possibilités pour compléter la liaison.

Formulation du problème et méthodologie

Le but de notre étude est d'examiner comment les connexions en ondes millimétriques ne pénètrent pas la peau humaine et de caractériser la propagation radioélectrique lorsqu'une main humaine bloque la ligne de vision (LOS). L'étude est basée sur des mesures prises à 60 GHz en utilisant une main stationnaire et mobile qui interrompe la ligne de vision Line Of Sight (LOS). Cette recherche vise à caractériser les phénomènes de propagation à l'aide de paramètres temporels, fréquentiels et de puissance pour éta-

blir les indices de prise de décision dans un modem, notamment quand et dans quelles conditions il faut passer à un mode alternatif en cas de blocage de la liaison. En terminant ce travail, nous aurons une compréhension avancée des caractéristiques de la propagation dans les bandes d'ondes millimétriques en général et les liaisons millimétriques à 60 GHz en particulier. De plus, notre travail nous permettra de définir les effets des conditions de propagation mmWave sur les futurs systèmes (5G) et (6G).

Afin de caractériser un blocage statique, nous devons d'abord mettre en place une méthodologie d'évaluation. Par la suite, nous étendrons nos outils d'évaluation pour inclure les effets Doppler afin de caractériser un blocage d'une main en mouvement dynamique. Les contributions de nos recherches seront présentées en ce mémoire de trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons donner une présentation succincte des réseaux mobiles 5G, nous rappelons les caractéristiques de propagation des ondes millimétriques ; leurs applications et leurs comportements lors de l'interaction avec le corps humain. Nous présentons aussi dans ce chapitre une bref description de la technique de formation des faisceaux qui porte une amélioration aux systèmes de communication sans fil.

Dans le deuxième chapitre, nous nous concentrons sur un état de l'art des expériences passées ensuite, nous introduirons le formalisme mathématique et théorique de signaux des évènements analysés ; évènements de blocage (EB) et SEB et nous terminerons ce chapitre par une présentation des modèles du blocage humain.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les résultats de caractérisation de la variation temporelle en fonction de la puissance et les résultats de l'analyse de la puissance reçue . L'évaluation des temps de montée t_{rise} et de décroissance t_{decay} sont dument caractérisés pour caractériser les précurseurs de décision dans un modem en cas de coupure brusque d'une liaison mmWave. Une analyse fréquentielle du décalage Doppler induit par le mouvement de la main et les doigts est caractérisé dans la dernière section du chapitre 3. Enfin et pour terminer ce projet, nous concluons par une synthèse de différentes contributions ainsi que les avis et les propositions pour approfondir cette étude.

Contributions et objectifs

La bande sans licence de 60 GHz est devenue un centre d'intérêt pour les ingénieurs en télécommunications pour la conception de nouvelles générations de communication mobile (5G, 6G...) en raison du potentiel élevé, de la large bande passante et le transfert multigigabit de données. L'exploit de la bande 60 GHz est un gain énorme pour les communications sans fil qui offre une communication sécurisée à faible latence et loin des interférences avec les autres systèmes de communication. Les principales contributions de ce travail sont résumées comme suit :

1. Dans ce mémoire, nous avons effectué un traitement sur un signal de puissance reçu pour caracté-

riser un blocage engendré par la main humaine à 60 GHz.

2. Nous avons identifié trois évènements différents pour la caractérisation dont deux évènements EB et un évènement SEB.
3. Nous avons effectuer une caractérisation temporelle en identifiant le temps de décroissance et du monté de chaque évènement EB et la caractérisation fréquentielle par effet Doppler pour chaque évènement EB et SEB.

Les résultats de caractérisation réalisés en ce travail permettent de modéliser les variations temporelles des canaux à 60 GHz. Cette caractérisation présente une orientation pour la conception des systèmes de communication à haut débit de réseaux à 60 GHz. Les résultats seront utiles pour la simulation des liaisons à ondes millimétriques ainsi que pour l'analyse de budget des liaisons.

Chapitre 1

Généralités sur les Communications à 60 GHz

Introduction

Aujourd'hui, les réseaux de télécommunications sans fil ont évolué d'une façon extrême en raison de l'exploitation des bandes millimétriques qui ont permis le développement des nouvelles générations émergentes dans plusieurs domaines grâce à leurs multiples avantages. En outre, elles disposent d'un inconvénient majeur en ce qui concerne leurs fortes atténuations et leurs comportements à la présence du corps humain qui posent un vrai défi pour les communications sans fil en bandes millimétriques. Ce chapitre présente quelques notions à propos des bandes millimétriques et de la bande 60 GHz. En particulier leurs applications, leurs caractéristiques de propagation et interaction avec le corps humain.

1.1 Les bandes 5G

La principale force de la 5G sera sa capacité à adapter dynamiquement son interface radio en fonction des usages et besoins ; en d'autres termes, la couverture 5G pourra être assurée par différentes antennes émettant à différentes fréquences. La couverture mobile reposera ainsi sur un mélange de cellules de différentes tailles (femto, pico, micro et macro-cellule) dans le but d'accroître la proximité entre les antennes relais et les terminaux mobiles.

La 4G a introduit ce principe avec l'attribution des fréquences de 700 MHz et 800 MHz, en complément de sa fréquence « cœur » de 2,6 GHz, pour faciliter la couverture de larges zones dite Microcell. La 5G est déjà partie plus loin avec, à terme, l'utilisation de trois bandes de fréquences :

- **La bande basse 700 MHz (703 – 788 MHz)** : pleinement disponible depuis 2019, continuera à être utilisée par la 5G pour faciliter la couverture de larges zones.
- **La bande 3,5 GHz (3,4 – 3,8 GHz)** : qui constitue la bande « standard » ou « cœur » de la 5G et qui offre un bon compromis entre débit et portée. En prenant l'exemple de France parce que les systèmes 5G ne sont pas encore exploités en Algérie, l'attribution de ces fréquences s'est

	Low-Band	Mid-Band	High-Band
Plage de fréquence	450 MHz-1 GHz	(1-6) GHz	(6-90)GHz
Débit moyen	(10–50) Mbps	(50-100 Mbps)	(100 Mbps - 4 Gbps)
Portée en ligne de vue	>10 Km	5 Km	150 m
Largeur de bande d'une transmission duplex	10 MHz	15 ou 20 MHz	100 à 800 MHz

TABLE 1.1 – Les bandes 5G.

concrétisée en Novembre 2020. La bande est partagée entre quatre opérateurs SFR, Bouygues, Free et Orange. Ces derniers peuvent réutiliser les infrastructures 4G tout en appliquant la nouvelle norme 5G NR (New Radio) pour améliorer la qualité de service.

- **La bande millimétrique 28 GHz (24,25 – 28 GHz)** : qui permettra d'atteindre de très hauts débits pour répondre à des besoins localisés dans des zones très denses, et de développer de nouveaux services 5G. À ce jour, seule la bande 26,5 – 27,5 GHz est libre et peut être utilisée en France pour des expérimentations. Par la suite, l'intégralité de la bande sera progressivement disponible, sous réserve notamment d'une coexistence possible avec les réseaux de communication par satellite Very Small Aperture Terminal (VSAT) qui utilisent des fréquences très proches.

Dans le monde, on retrouve ces trois bandes 5G, mais à des fréquences différentes. Le Third Generation Partnership Project (3GPP), un regroupement mondial d'organismes de normalisation en télécommunications, a défini les trois bandes comme illustrée dans le Tableau 1.1.

Dans les spécifications radio 3GPP, la nouvelle radio a été développée pour fonctionner dans deux régions de fréquence :

1. La région sous 6GHz sous le nom de FR1.
2. La région mmWave de 24.25-52.60 GHz sous le nom de FR2.

Dans chaque bande, la nouvelle radio peut fonctionner soit en mode FDD, soit en mode TDD. Pour fournir une capacité supplémentaire, une bande de liaison descendante supplémentaire (SDL) ou une bande de liaison montante supplémentaire (SUL) est utilisée. La vaste gamme de fréquences que 5G New Radio (NR) est nécessaire pour supporter des nouvelles applications. Pour le FR1, trois espacements de sous-porteuse (15, 30 et 60 KHz) sont identifiés pour fonctionner en bandes sous-6 GHz, en FR2 deux espacements de sous-porteuse (60 et 120 KHz) sont identifiés pour fonctionner en bandes millimétriques. Les largeurs de bande varient en fonction du SCS, avec beaucoup de préférence pour 5 MHz de largeur de canal avec un SCS de 15 KHz.

Le FR1 couvre une gamme de fréquences de 450 MHz à 6 GHz (cette limite peut être étendue à 7.125 GHz dans Rel-16), tandis que FR2 couvre une gamme de fréquences de 24.25 à 52.6 GHz. Notez que les bandes de fréquences au-delà de 52.6 GHz seront prises en charge dans les futures versions du 3GPP.

1.1.1 Applications des ondes millimétriques

Les applications en bandes millimétriques sont diverses, notant ci-dessous quelques domaines d'utilisation et les dispositifs exploités en bandes millimétriques illustrés par la Figure 1.1.

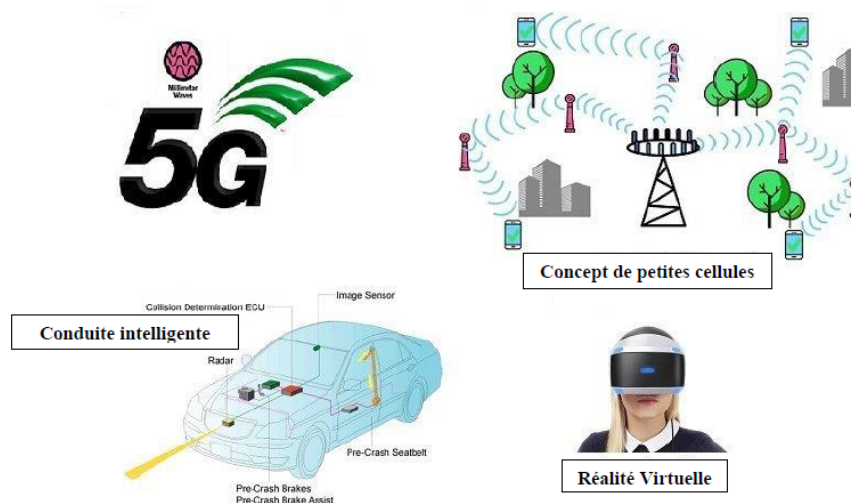


FIGURE 1.1 – Application des bandes millimétriques mmWave

Pico cellules 5G

La 5G est l'une des technologies les plus innovantes en raison de son exigence de supporter un débit de données plus élevé et utilisation des ondes millimétriques mmWave (entre 24GHz et 86 GHz). Elle fournit une capacité de bande passante élevée en présence d'utilisateurs et fournit un service plus fiable face aux interférences. Elles peuvent être utilisées pour fournir des vitesses de téléchargement plus rapides, pour soutenir le développement de nouvelles applications qui nécessitent une large bande passante.

Applications vidéo HD

La demande de contenus multimédias de meilleure qualité augmente de plus en plus pour cela on a recours aux bandes millimétriques pour pouvoir transmettre beaucoup de données en haute résolution, stocker des contenus et utiliser moins d'énergie à très faible latence.

Technologie IEEE 802.11ad Wi-Fi à 60 GHz

Initialement développée sous la nomenclature Wireless Gigabit (WiGig), le standard IEEE 802.11ad est une technologie conçue pour prendre en charge les futurs dispositifs multimédias audio et visuels et les interfaces d'affichage sans fil à un débit de l'ordre de quelques Giga-bit-par-secondes (Gbps) pour obtenir une transmission de données très performante entre les appareils et les ordinateurs.

Communication par satellite

Les ondes millimétriques sont des candidats parfaits pour la communication par satellite. À des altitudes d'orbites plus élevées, elles fonctionnent parfaitement avec un débit de données massif et une faible latence grâce à sa bande beaucoup plus élevée que les ondes radio, ce qui signifie qu'elles peuvent transporter plus d'informations .

Applications automobiles

La conduite autonome est un sujet brûlant dans le monde de la technologie. Elle nécessite la détection de passagers et d'autres obstacles en temps réel et à faible latence. Les ondes millimétriques sont la meilleure option pour les automobiles dans la prévention des collisions, le maintien automatique sur la voie, le contrôle adaptatif de la vitesse et la détection des piétons pour améliorer la sécurité en communiquant avec les autres véhicules et les infrastructures. Elle peuvent être utilisées pour détecter les obstacles sur la route et aider le véhicule à les éviter.

Scanners corporels

Les scanners corporels à ondes millimétriques deviennent populaires de nos jours. Ils ont la capacité de scanner avec une grande précision et de causer moins de dommage au corps humain. Ils fonctionnent à une fréquence comprise entre 70 GHz et 80 GHz.

Applications radar

La technologie des radars haute fréquence utilise une propriété appelée largeur de faisceau. Il est utilisé pour les détecteurs de mouvement, les portes automatiques, les systèmes de prévention des collisions, les dispositifs d'alarme contre les intrusions et la détection de la vitesse des véhicules.

Casques de réalité virtuelle

Les ondes millimétriques conviennent parfaitement aux dispositifs de réalité virtuelle. Elles peuvent prendre en charge une large bande passante, nécessaire à la transmission vidéo et audio haute définition. Les appareils de réalité virtuelle permettent une connexion à haut débit, offrent une excellente expérience réaliste et immersive aux utilisateurs. L'avantage de la large bande passante est que les dispositifs VR peuvent transmettre des flux vidéo in compressé grâce au très haut débit offert, et ainsi réduire dramatiquement la latence et la complexité des appareils.

Applications médicales - thérapie par ondes millimétriques

La thérapie par ondes millimétriques utilise des plages de fréquences comprises entre 40 Ghz et 70 GHz pour expérimenter plusieurs conditions médicales. Les ondes millimétriques sont utilisées en

médecine à diverses fins, notamment pour le traitement du cancer, le soulagement de la douleur et la régénération des tissus.

Applications militaires

La technologie des ondes millimétriques peut être utilisée pour détecter la position des cibles et suivre leurs mouvements pour guider des missiles ou d'autres armes vers leurs cibles. Elles sont également utilisées par l'armée pour la communication, pour transmettre des données entre des unités militaires sur de longues distances et pour la surveillance. Leur haute atténuation est considérée comme une sécurité physique contre l'interception des communications par l'ennemi.

1.1.2 Antennes

Quelques antennes exploitant en bandes millimétriques sont citées ci-dessous :

1. Antenne Microstrip

- **Avantage** : Profil bas, faible coût, intégration micro-ondes, poids léger, production de masse facile.
- **Inconvénient** : Faible puissance, faible efficacité de rayonnement, bande étroite.

2. Antenne Intégrée à la puce

- **Avantage** : Degré élevé lors d'intégration, fiabilité élevée, structure compacte, faible coût, production de masse.
- **Inconvénient** : Faible puissance, faible efficacité de rayonnement, bande étroite.

3. Antenne Corne

- **Avantage** : Large bande de fréquence, petit côté lobes, capacité de puissance élevée, structure simple.
- **Inconvénient** : Faible gain.

4. Antenne Lentille

- **Avantage** : Large bande de fréquence, haute directivité
- **Inconvénient** : Très médiatisé.

5. Antenne Réflecteur

- **Avantage** : Gain et efficacité élevés, petite taille, haute directivité du rayonnement.
- **Inconvénient** : Coût élevé.

1.1.3 Le beamforming

Suite aux interférences et aux fortes atténuations qui influent les communications sans fil à ondes millimétriques, il s'est avéré important de trouver des techniques pour combler ces lacunes. On a constaté

qu'a fin d'assurer une bonne liaison, il est extrêmement important que les antennes émettrice et réceptrice soient alignées avec précision pour obtenir une haute directivité [11]. Le beamforming ou bien formation de faisceaux est une technique qui consiste à émettre le signal haut débit dans une direction spécifique. Il peut également être considéré comme un filtre spatial pour chaque direction d'intérêt [1]. Ce filtre va donc laisser passer les signaux dans des directions spécifiques avec un gain maximum, et il va atténuer le signal voir l'annuler dans les directions non-souhaités [1]. Une illustration est introduite dans la Figure 1.2.

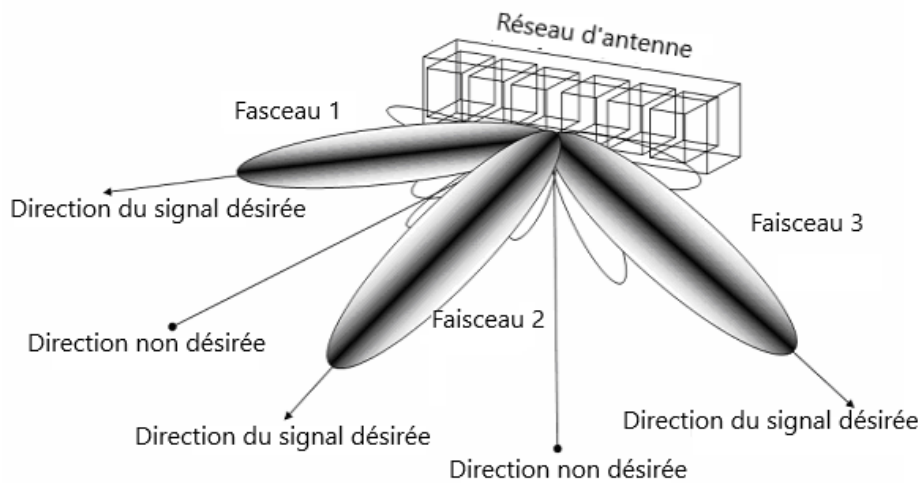


FIGURE 1.2 – Principe de la formation des faisceaux [1].

Cette technique permet donc de fournir une meilleure qualité de signal au récepteur ce qui signifie une faible latence et un rapport signal sur bruit (SNR) important sans avoir besoin d'augmenter la puissance du signal à l'émission. Aussi, grâce à cette technique il n'y aura plus d'interférences entre les différents signaux émis.

1.1.4 Caractéristiques de la propagation à 60 GHz

Les sources de perte principales qui affectent la propagation des ondes millimétriques sont présentées ci-dessous :

Les pertes de pénétration

Les ondes millimétriques ont un comportement différent lors de la pénétration sur des matériaux par rapport aux micro-ondes due à leurs longueurs d'onde, introduisant des pertes sévères à la propagation et empêchant ainsi le signal d'atteindre les utilisateurs en environnements intérieurs.

Atténuation atmosphérique

L'atténuation par l'absorption des ondes radio par les particules en suspension dans l'air est importante, due à la présence de la vapeur d'eau et d'oxygène, qui est critique pour la propagation des ondes

millimétriques. L'atténuation dans l'atmosphère est mesurée en décibels (dB) par distance de diffusion. La perte de propagation réelle à laquelle est confronté un canal à 60 GHz est directement proportionnels à la longueur de la liaison. La Figure 1.3 montre La variation des ces atténuation en fonction de la fréquence :

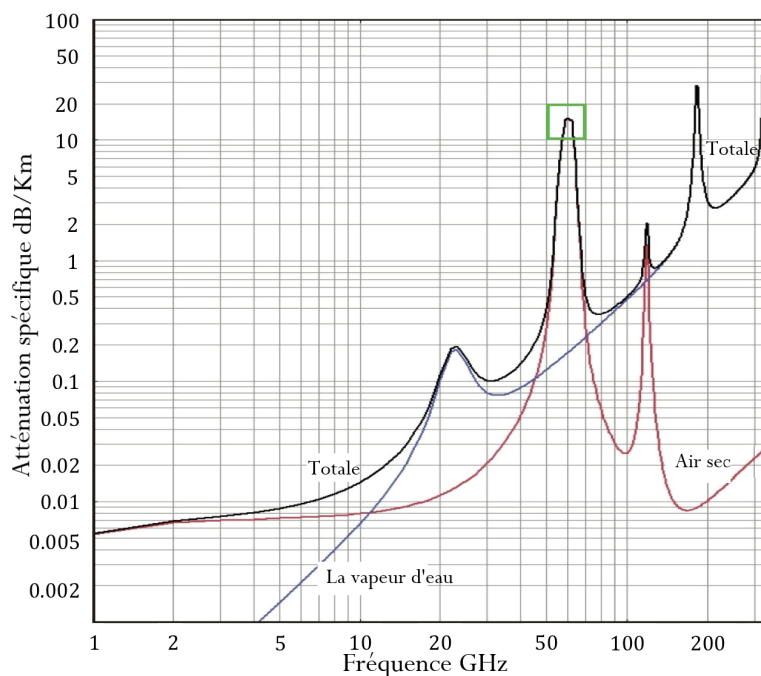


FIGURE 1.3 – Représentation de l'atténuation causée par les gaz atmosphériques [2].

Par conséquent, les régions du spectre affectées par cela ne sont pas des solutions fiables pour les systèmes extérieurs à large portée. La Figure 1.3 montre que l'oxygène peut induire une perte supplémentaire d'une dizaine de dB/Km à 60 GHz qui est équivalente à quelques dB/m, donc qui n'a pas pratiquement beaucoup d'influence pour les réseaux Wireless local area network (WLAN).

Atténuation par feuillage

La présence de végétation est un autre défi pour les ondes millimétriques, car elle peut assurer un autre facteur d'atténuation pour ces signaux. Cette dernière dépend de la profondeur du feuillage, ce qui signifie que plusieurs arbres affecteront le signal d'une manière plus grave qu'un seul arbre. D'autre part, il peut également servir de source de reflets à trajets multiples qui peuvent être utilisés pour former des liens qui ne sont pas en visibilité directe (N-LOS), une illustration est introduite dans la Figure 1.4.

Atténuation dans l'espace libre

cette atténuation est associée à la propagation d'énergie entre deux extrémités sans obstacles ni surface réfléchissante. Elle est exprimée par l'équation suivante :

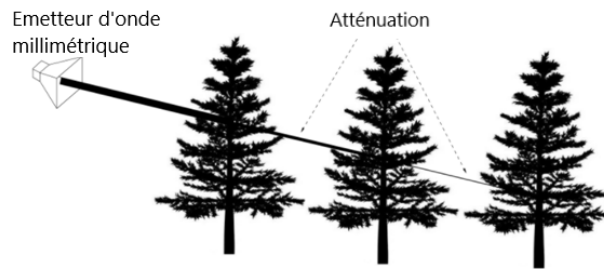


FIGURE 1.4 – Représentation de l’atténuation par feuillage.

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (1.1)$$

Avec :

- FSPL : est la perte d’espace libre
- d : est la distance entre le récepteur et l’émetteur (en mètre)
- λ : est la longueur d’onde

Une illustration est introduite dans la Figure 1.5

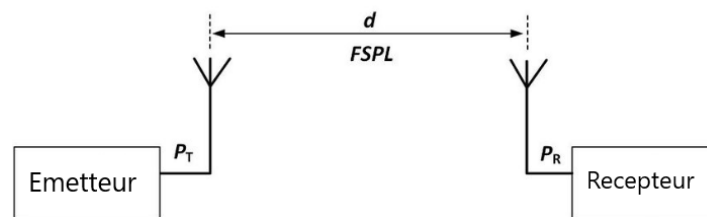


FIGURE 1.5 – Représentation de l’atténuation dans l’espace libre.

Pertes due à la pluie

La pluie affecte la propagation des ondes millimétriques, puisque les gouttes de pluie ont presque la même taille que les longueurs de ces ondes, elles dispersent les signaux radio. La Figure 1.6 montre l’atténuation par kilomètre en fonction de la densité de pluie. L’atténuation augmente en combinaison avec le taux de pluie et la fréquence du signal. D’autre part, à des niveaux de fréquence plus élevés (des ondes millimétriques), l’atténuation peut être extrêmement élevée, ce qui contribue de manière significative à l’évanouissement du signal.

1.2 Principaux standard à 60 GHz

1.2.1 IEEE 802.11ad

Aussi appelé WiGig ; c’est un protocole de réseaux sans fil qui a été initialisé en 2012, exploitant en bande de 60 GHz. Il est caractérisé par :

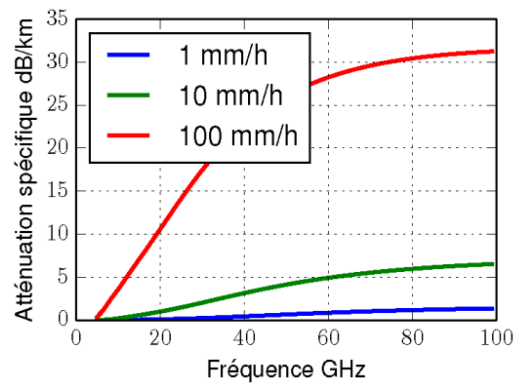


FIGURE 1.6 – Atténuation due à la pluie par rapport à la fréquence à différents taux de pluie [3].

- Un débit de plusieurs Gbps (jusqu'à 7.6 Gbps).
- Un flux unique Single Input Single Output (SISO)
- Généralement limité par un seul point d'accès et 8 clients Station (STA)
- Une nouvelle couche physique, connue sous Directional multi-gigabit physical layer (DMG PHY)

1.2.2 IEEE 802.11ay

ce standard présente une amélioration de la norme 802.11ad, baptisée IEEE 802.11ay en 2015, qui promet d'une transmission sans fil plus rapide et de plus grande portée.

Organisme de normalisation	IEEE
Technologie	802.11ad
Bandes opérationnelles	Au-dessus de 7 GHz
Capacités	standalone(sans licence)

TABLE 1.2 – Taxonomie des technologie 802.11ay qui utilisent le spectre sans licence.

Principales caractéristiques

- Bandes sans licence : 60 GHz
- Bande passante agrégée : 8,64 GHz
- Débit maximal : 100 Gbps
- MIMO : jusqu'à 8 flux
- Modulation : jusqu'à 64-QAM
- HARQ : non
- Technique d'accès au canal : CSMA/CA

La norme IEEE 802.11ay définit une nouvelle spécification (Phy) qui comprend à la fois une porteuse unique Single Carrier (SC), le multiplexage par répartition en fréquence orthogonale Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), la modulation pour supporter les transmissions Multiple-Input

Multiple-Output (MIMO) et la liaison de canaux de 4,64 GHz tout en garantissant la capacité d'une nouvelle structure de paquets en permettant la formation hybride des signaux analogiques et numériques avec un taux de données compris entre 20 et 40 Gbps avec une portée de 300 à 500 m.

Type de modulation	Exemples de Taux de Codage
BPSK	1/2
QPSK	5/8
16 QAM	3/4
64 QAM	13/16
256 QAM	7/8 (ajouté dans 802.11ay)

TABLE 1.3 – Types de modulation de la Couche physique du standard 802.11ay.

1.2.3 Avantages et inconvénients

A partir des propriétés des standards exploitant en 60 GHz, les avantages et les inconvénients d'utilisation des bandes millimétriques sont résumés dans le Tableau 1.4

Avantages	Inconvénients
Bande passante très large pour les grands canaux	Portée limitée et instabilité des liaisons
Faible interférences avec les autres systèmes de communication sans fil	Forte atténuation due à l'absorption d'oxygène
Directivité des antennes et débit très important	atténuation variable due aux effets météorologiques
Tailles réduite des éléments rayonnants	cout important des composants électroniques
Communication sécurisée à faible latence	Faisceau angulaire très limité en temps réel

TABLE 1.4 – Avantages et inconvénients des ondes millimétriques.

1.3 La 5G en bandes millimétriques

1.3.1 5G-NR Sidelink

Pour faciliter l'interface radio NR de la cinquième génération 5G, le projet de partenariat de troisième génération 3GPP a publié une norme Vehicle to- Everything (V2X) de cinquième génération 5G basée sur la nouvelle radio NR. Sidelink (SL) est un élément clé des communications V2X du 3GPP qui permet aux équipements d'utilisateurs acUE V2X de communiquer entre eux sans l'aide du réseau. Le SL a été introduit pour la première fois dans la version 12 de la communication Device-To-Device (D2D) et a été développé dans la version 14 pour introduire de nouvelles fonctionnalités dédiées aux communications V2X basées sur Long Term Evolution (LTE) qui vise principalement les échanges de messages. Dans la version 15, d'autres améliorations ont été apportées au LTE V2X afin de prendre en charge 25 services améliorés Enhanced V2X (eV2X) [4].

Récemment, pour une plus large gamme d'applications et de services par SL extension de la couverture du réseau et amélioration de l'efficacité énergétique, le 3GPP a lancé un projet de travail intitulé "NR Sidelink Relay" afin de spécifier des solutions pour permettre une liaison UE-réseau SL à un seul saut. Parallèlement, ils ont développé un système de communication véhiculaire à ondes millimétriques mmWave, appelé système Moving Network (MN) comme le montre la Figure 1.7 [4].

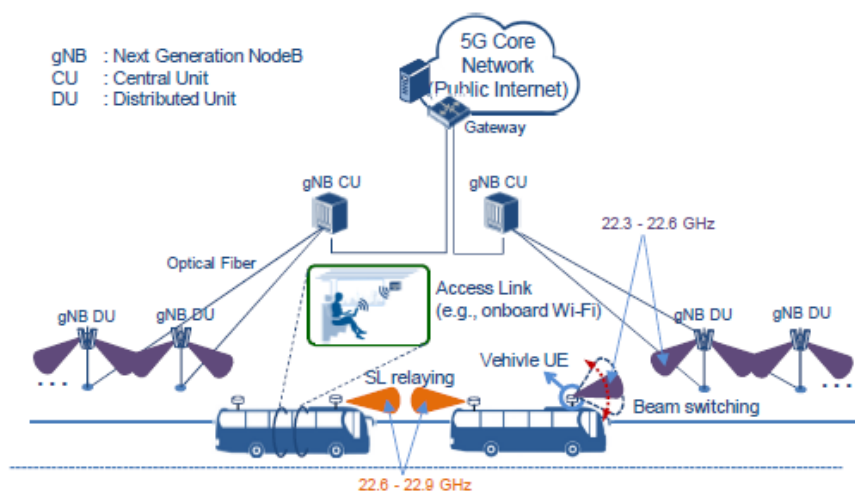


FIGURE 1.7 – Architecture de réseau du système MN avec relais mobile basé sur SL[4].

1.3.2 5G-Unlicensed

International Telecommunications Union (ITU) identifie trois scénarios d'utilisation pour les réseaux sans fil de prochaine génération :

- Le débit mobile amélioré Enhanced Mobile BroadBand (eMBB).
- La communication ultra-fiable et à faible latence Ultra-Reliable and Low Latency Communication (URLLC).
- La communication massive de type machine Massive Machine-Type Communication (mMTC).

Bien que ces cas d'utilisation répondent à des exigences différentes exigences, ils ont tous en commun le besoin d'une grande quantité de spectres. Dans le but d'étendre les opérations mobiles 5G sans licence, le 3GPP cible initialement les bandes Unlicensed National Information Infrastructure (UNII) 5 GHz et 6 GHz. Les futures spécifications incluront des bandes millimétriques sans licence à 60 GHz.

Deux gammes de fréquences sont ciblées pour le fonctionnement New Radio-Unlicensed (NR-U), comme le montre la Figure 1.8. Environ 2 GHz de spectre non autorisé/partagé est disponible pour les communications omnidirectionnelles inférieures à 7 GHz et au-dessus de la bande Industrial Scientific Medical (ISM) à 2,4 GHz, Citizens Broadband Radio Service (CBRS) à 3,5 GHz et les bandes UNII à Fréquences de 5 GHz et 6 GHz . Il y a aussi 14 GHz du spectre non autorisé disponible dans la bande de 60 GHz qui peut être utilisé pour les communications directionnelles. La Federal Communications Commission (FCC) a récemment annoncé son projet de règlement pour ouvrir des bandes de 5,925 GHz

à 7,125 GHz pour accès [5].

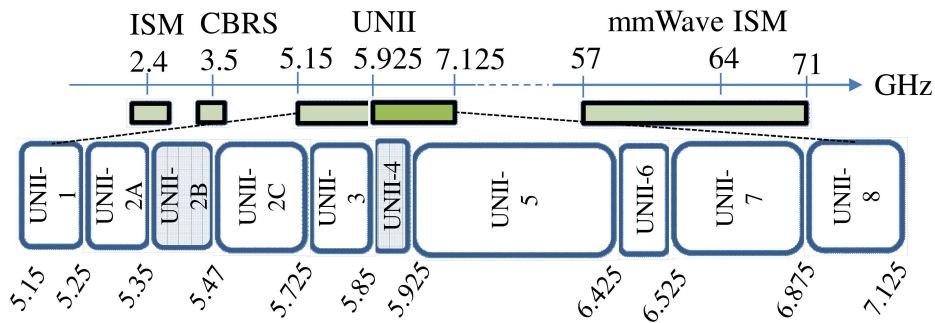


FIGURE 1.8 – Bandes de fréquences sans licence/partagées pour les opérations NR-U [5].

1.4 Les communications sans fil centrées sur le corps

Le BAN est un terme qui désigne un réseau de communication sans fils composé d'un ensemble d'éléments rayonnants placés à proximité du corps humain. La thématique des communications centrées sur le corps humain suscite depuis plusieurs années déjà un fort intérêt de la communauté scientifique internationale[12]. En effet de nombreux travaux ont été réalisés pour la conception des antennes BAN, pour la caractérisation de la propagation sur le corps et aussi les interactions corps/antenne [13]. Les ressources et l'efficacité énergétique des dispositifs ou encore les architectures et les algorithmes des systèmes de communications sur le corps ont aussi fait l'objet d'études [12]. Les dispositifs BAN comme les antennes ou bien les capteurs, possèdent la capacité d'échanger des informations entre eux, mais aussi de communiquer avec des dispositifs implantés dans le corps ou bien situés à proximité du corps. Plusieurs types de liaisons sont donc possibles qui sont classées suivant 3 catégories [13] :

1. **les liaisons in-body** qui permettent à un dispositif implanté dans les tissus de communiquer avec un autre placé sur le corps ou bien à proximité.
2. **les liaisons on-body** qui caractérisent les communications entre des dispositifs placés en surface du corps.
3. **les liaisons off-body** distinguent les communications entre un dispositif placé sur le corps et un autre situé dans un rayon de quelques mètres (< 10 m) du corps humain, comme par exemple une station de base, un ordinateur ou un autre utilisateur.

1.4.1 Communications BAN à 60 GHz

Les progrès technologiques de ces dernières années en bande millimétrique ont favorisé l'émergence de nombreux systèmes de communication sans fils à courte portée. récemment, la bande millimétrique a aussi été identifiée comme potentiellement prometteuse pour les communications sans fil sur le corps

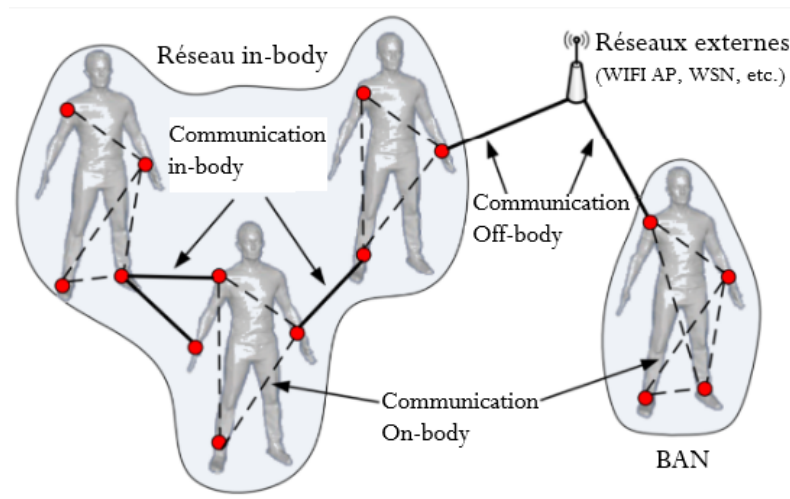


FIGURE 1.9 – Illustration des réseaux BAN [6].

humain, et plus particulièrement la bande de fréquence entourant 60 GHz [14] [12]. En effet, Cette fréquence présente plus d'intérêts pour les applications BAN en comparaison avec les bandes de fréquence les plus basses ; principalement la réduction des interférences, la miniaturisation poussée des antennes, la disponibilité d'une large bande permettant les réseaux BAN d'utiliser une technique de communication à faible consommation d'énergie.

Face à ces intérêts multiples un vrai défi s'impose pour l'établissement d'une liaison BAN fiable et efficace en termes d'énergie à 60 GHz qui se résume dans la forte atténuation à cette fréquence et la grande influence du corps humain. [15].

1.4.2 Interaction des ondes millimétriques avec le corps humain

Les principales cibles biologiques des rayonnements à 60 GHz sont la peau, les yeux et les vêtements sur la peau. L'exposition des yeux conduit à l'absorption de l'énergie électromagnétique par la cornée qui est caractérisée par une teneur en eau de 75 % et épaisseur de 0,45mm. Cependant, les études effectuées à 60 GHz (10 mW/cm^2) n'ont démontré aucune modification physiologique détectable indiquant que les ondes millimétriques agissent sur la cornée en fonction de la dose. Quand il s'agit de la peau humaine, elle couvre 95 % de la surface du corps humain donc l'interaction entre les rayonnements et l'humain est importante. Du Point de vue électromagnétique, la peau peut être considérée comme une structure anisotrope dispersive multi-couches composée de trois couches, à savoir, l'épiderme, le derme et la couche sous-cutanée comme le montre la Figure 1.10. La peau contient également des capillaires et des terminaisons nerveuses. Elle est principalement composée de 65,3 % de l'eau [7].

Des résultats qui ont été prouvé dans [7] sont résumés par :

- En ondes millimétriques, entre 20% et 50% de l'énergie électromagnétique est réfléchi à l'interface peau/air.
- la réflexion diminue et la transmission augmente proportionnellement à la fréquence.

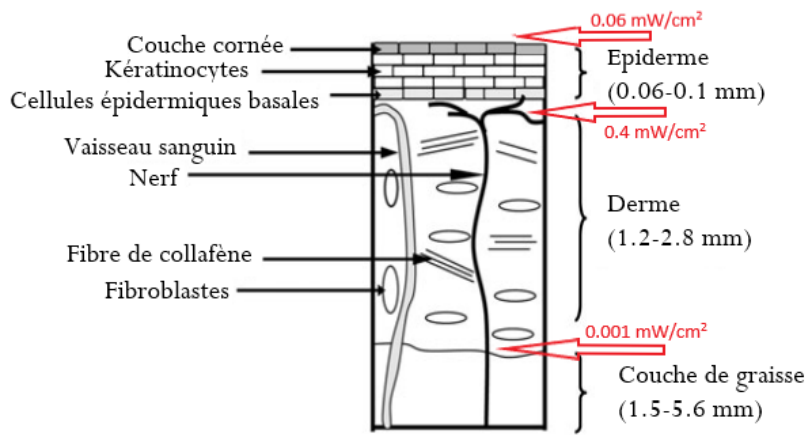


FIGURE 1.10 – schéma représentant la structure de la peau [7].

- 99% de l'énergie électromagnétique est localement absorbée par l'épiderme du derme.
- les vêtements peuvent perturber de façon significative l'absorption.

Conclusion

Ce chapitre consiste en une revue bibliographique sur les ondes millimétriques mmWave, leurs propriétés, leurs applications dans les différents domaines, leurs caractéristiques de propagation à 60 GHz et les pertes dont elles sont sujettes, ainsi que leurs comportements lors d'une interaction avec le corps humain et enfin une revue sur la technique du beamforming qui favorise la propagation des ondes millimétriques et offre une bonne liaison de communication pour les utilisateurs.

Chapitre 2

Mesures et Étude des Modèles de Blocage du Corps Humain

Introduction

De nombreuses études sur la propagation des signaux à 60 GHz portent sur diverses caractéristiques du canal des environnements intérieurs, notamment la directivité des antennes et la polarisation des antennes et l'analyse des angles d'arrivée. L'impact de l'activité humaine pose un défi à la propagation des ondes millimétriques menant à la réalisation de plusieurs études. Ce chapitre présente le formalisme mathématique des modèles de blocage du corps humain ainsi que le système de mesure adopté pour la caractérisation du blocage de la main humaine à 60 GHz. Les transmissions sans fil à courte portée à 60 GHz sont susceptibles à la perte par ombrage en raison de l'activité humaine inhérente qui obstrue la ligne de vision directe LOS .

La perte par effet d'ombre est encore influencée par l'utilisation d'antennes directionnelles pour surmonter l'affaiblissement accru du trajet et les effets de la propagation par trajets multiples qui sont présents à ces fréquences. Dans ce projet, nous présentons des mesures de la puissance reçue dans le domaine temporel en utilisant un système dans la bande 60 GHz. À partir des mesures collectées, nous étendons l'analyse montrant qu'une distribution gaussienne peut être un bon ajustement pour les niveaux de puissance en échelle dB uniquement dans les intervalles de temps de processus d'ombrage similaires. Notre analyse est basée sur les caractéristiques de propagation d'une main mobile et stationnaire bloquant la ligne de vision LOS .

2.1 Travaux connexes

L'état de l'art en ce qui concerne la caractérisation des réseaux de communication mobile comprend la description de divers modèles d'affaiblissement et des caractéristiques du réseau, qui sont généralement constituées des réponses impulsionnelles du canal et des statistiques de déplacement angulaire .

La bande autour de 60 GHz offre des avantages significatifs aux systèmes sans fil dans plusieurs applications d'où la caractérisation et la modélisation des canaux sans fil ont fait l'objet d'un nombre important d'études théoriques et expérimentales dans la gamme des fréquences des ondes millimétriques. Des travaux connexes à notre projet sont récapitulés dans le Tableau 2.1

2.2 Mesures et scénarios de blocage à 60 GHz

Nous caractérisons statistiquement les variations de la puissance du signal reçu dans le domaine temporel causées par l'activité humaine qui affecte les liaisons sans fil intérieures à courte portée de 60 GHz. Notre approche est basée sur des mesures de propagation de l'activité d'une main humaine interceptant la ligne de vision LOS.

2.2.1 Système de mesure

D'après l'expérience de [27], le sondeur du canal utilisé est basé sur un VNA. Les antennes de transmission Transmitter antenna (Tx) et de réception Receiver antenna (Rx) sont reliées par des câbles Tx et Rx et un amplificateur de puissance (PA) en plus d'un amplificateur à faible bruit (LNA) comme montré dans la Figure 2.1. Une calibration est effectuée avant les mesures et le retard par rapport à la vitesse nominale dans les câbles pris en compte. Il est noté que les antennes n'ont été pas considérées dans la calibration. Les antennes sont implicitement considéré comme faisant partie du canal [27]. Les paramètres du sondeur du canal sont répertoriés dans le Tableau 2.2. Le sondeur du canal a été configuré en mode onde-continue (continuous wave) à une fréquence de $f= 60$ GHz avec une résolution temporelle de 1 ms.

La Figure 2.2 représente le diagramme de rayonnement de l'antenne cornet sur les plan horizontal et vertical.

2.2.2 Traitement des données

La puissance reçue pendant l'activité humaine entre l'antenne d'émission et de réception est donnée par [20] :

$$P_r(t) = P_t + G_t + G_r - PL - PL_h(t) \quad (2.1)$$

Avec :

— t : le temps

Expérience	Date de réalisation
AP Garcia et al. [16] : Caractérisation expérimentale de l'obstruction du corps humain à 60 GHz dans la cabine d'un avion airbus-340, en utilisant des configurations de cellules redondantes et des diagrammes d'antenne différents.	2010
S Collogne et al. [17] : Mesures de la propagation en présence d'activité humaine pour un canal de 60 GHz pendant une durée de 20 heures. Le phénomène d'obstruction a été caractérisé par la durée et l'amplitude.	2010
C Gustafson et al. [18] : L'utilisation d'un fantôme rempli d'eau pour modéliser le blocage du corps humain vu qu'il a des propriétés d'ombrage et des reflets similaires au corps humain.	2012
M Jacob et al. [19] : Études fondamentales sur l'obstruction du corps humain à 60 GHz, analyses des différents modèles ainsi que différentes représentations géométriques du corps humain.	2013
P Karadimas et al. [20] : Caractérisation statistique des variations de la puissance du signal reçu dans le domaine temporel causées par l'activité humaine à 60 GHz. Mesures de propagation dans des environnements intérieurs où l'activité humaine intercepte la LOS. présentation d'une approche stochastique théorique montrant que les variations de la puissance reçue en fonction de temps peuvent suivre un modèle statistique Gaussien.	2013
M Heino et al. [21] : Étude de la dégradation du diagramme de champ lointain causée par un doigt pour des antennes fonctionnant à 60 GHz.	2016
A Angles et al. [22] : Analyse de l'impact du trafic piétonnier dans les liaisons sans fil intérieurs à 60-GHz de manière empirique. Modélisation de l'atténuation et les temps de décroissance et de montée. Présentation d'un modèle paramétrique simple basé sur des données empiriques pour simuler les événements d'atténuation.	2017
LA Fierro et al. [23] : présentation des résultats empiriques permettant de paramétrer les affaiblissements typiques à petite échelle causées par les piétons lorsqu'ils bloquent le LOS, dans des zones où un point d'accès WiGig est au service des utilisateurs intérieurs.	2020
M El Hajj et al. [24] : Étude d'un canal de propagation radio dynamique à 60 GHz par des mesures dans un bureau en espace ouvert sur l'affaiblissement du chemin avant et pendant les heures de travail et la comparaison de l'effet produit par ces mouvements avec le cas statique où le bureau est vide. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un Vector Network Analyzer (VNA). Une comparaison a été effectuée entre l'évolution du canal dynamique en présence de personnes à 5.8 GHz et à 60 GHz dans le même environnement.	2020
M Riobo et al. [25] : Une campagne de mesure a été réalisée afin de caractériser la réponse du canal lorsque des personnes passent entre l'émetteur et le récepteur dans la gamme de fréquences 5G et au-delà (40 GHz et 60 GHz). Étude de la possibilité d'utiliser la diversité angulaire pour compenser l'atténuation résultante.	2020
A Bhardwaj et al. [26] : Étude d'un modèle hybride géométrique-empirique pour les systèmes de communication à ondes millimétriques. Pour valider ce modèle et pour extraire ses paramètres empiriques, une campagne de mesure exhaustive a été menée avec 120 scénarios de blocage, comprenant différents types de personnes.	2021

TABLE 2.1 – Résumé chronologique des principaux travaux sur le blocage du corps humain en bandes millimétriques.

- $P_r(t)$: la puissance reçue
- P_t : la puissance émise
- G_t : le gain de l'antenne de réception
- G_r : le gain de l'antenne d'émission
- PL : la distance dépend du Pathloss
- $PL_h(t)$: l'affaiblissement temporel dû à l'activité humaine

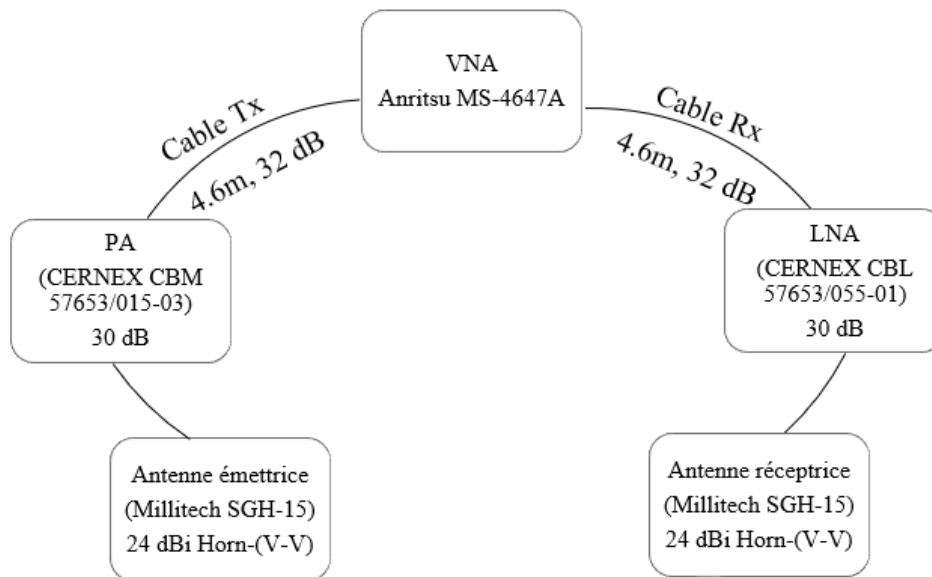


FIGURE 2.1 – Schéma représentant le système de mesure.

Équipement	Caractéristiques
VNA	Anritsu MS-4647A
PA (CERNEX CBM 57653/015-03)	Gain de 30 dB
LNA (CERNEX CBL 57653/055-01)	Gain de 30 dB
Cable Tx	4.6m (32 dB d'atténuation)
Cable Rx	4.6m (32 dB d'atténuation)
Antenne émettrice, antenne réceptrice (Millitech SGH-15)	24 dBi Horn-(V-V)

TABLE 2.2 – Les paramètres du sondeur du canal.

En supposant qu'il n'y a pas de rayons secondaires en raison d'une utilisation très directionnelle :

$$PL = 10 \log \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

Avec : λ est la longueur d'onde de la porteuse.

Le signal de la bande étroite reçu dans la bande complexe, comme une somme d'onde plane homogène qui varie dans le temps, est dite un modèle additif [20] :

$$h(t) = \sum_{l=1}^L a_l \exp(j2\pi v_{d,l}t) \quad (2.3)$$

Avec :

— a_l : l'amplitude complexe définit par :

$$a_l = |a_l| \exp(j\phi_l) \quad (2.4)$$

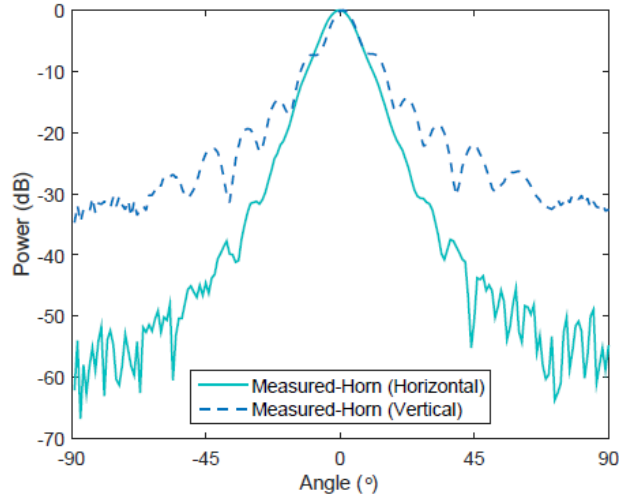


FIGURE 2.2 – Diagrammes de rayonnement d’antenne 2D mesurés avec différentes polarisations [8].

— $v_{d,l}$: la fréquence Doppler.

Le nombre d’onde planes dans l’Équation 2.3 est infini si on considère les formes diffusées du corps humain. Nous pouvons définir la période limite comme la période maximale T avec $|a_l|$ et $v_{d,l}$ sont des constantes. De plus, si ϕ_l sont non corrélés et uniformément distribués en $[0; 2\pi]$ alors $h(t)$ s’agira d’un processus stationnaire au sens large (WSS). Dans ce cas, la puissance moyenne reçue dans [20] sera :

$$P_r = E [|h(t)|^2] = \sum_{l=1}^L |a_l|^2 \quad (2.5)$$

Avec : $E[\cdot]$ est l’espérance de l’opération. La version échantillonnée de $|a_i(t)|$ est donnée comme suit [16] :

$$a_i(t) = 10 \log_{10} \left(\frac{|h_i[t]|^2}{\langle \sum_{l=0}^{I-1} |h_i''[t']|^2 \rangle} \right) \quad (2.6)$$

Avec :

- $h_i[t]$ est une version fenêtrée.
- $h_i''[t']$ est le CIR fenêtré sans activités humaines et avec le temps de référence t' (en LOS).
- $\langle \cdot \rangle_{t'}$ indique la moyenne dans le domaine t' .
- I le nombre maximum d’échantillons dans le domaine du délai une fois le fenêtrage appliqué.

Sur la base de l’Équation 2.6, le gradient désigne un vecteur représentant la variation d’une fonction par rapport à la variation de ses différents paramètres. Ainsi le gradient de la fonction $a_i(t)$ en un point est le vecteur dont les composantes sont les dérivées partielles de la fonction calculée à un point. Le gradient de la fonction $a_i(t)$ est calculé par [16] :

$$g_i(t) = \frac{\partial a_i(t)}{\partial t} \quad (2.7)$$

Le gradient de la fonction $a_i(t)$ indique Le taux de changement de la puissance par 1 ms, et y-est mesuré en dB/ms.

Scénarios de mesure

L'expérience a été réalisée dans un intervalle de temps de 7s. La distance entre les antennes Tx et Rx est de 1.24 m, en réalisant les différents évènements de blocage à mi-chemin. Les mesures sont définis par trois évènements dans lesquels on a coupés le signal émis par l'antenne Tx avec une main de trois différentes manières :

- **Blocage Statique** : définit comme un EB où on coupe le signal brusquement avec une main stationnaire durant 2.7s.
- **Blocage Dynamique** : définit comme un EB où on a interrompu le signal brusquement avec une main en mouvements de haut en bas.
- **Blocage variable dans le temps SEB** : cet évènement est constitué d'une série de deux évènements ; on a introduit les doigts espacés et qui bougent au même temps en premier, ensuite on a fait passer la paume de la main et les doigts pour couper le signal .

Le signal de variation de puissance mesuré par le sondeur est présenté dans la Figure 2.3

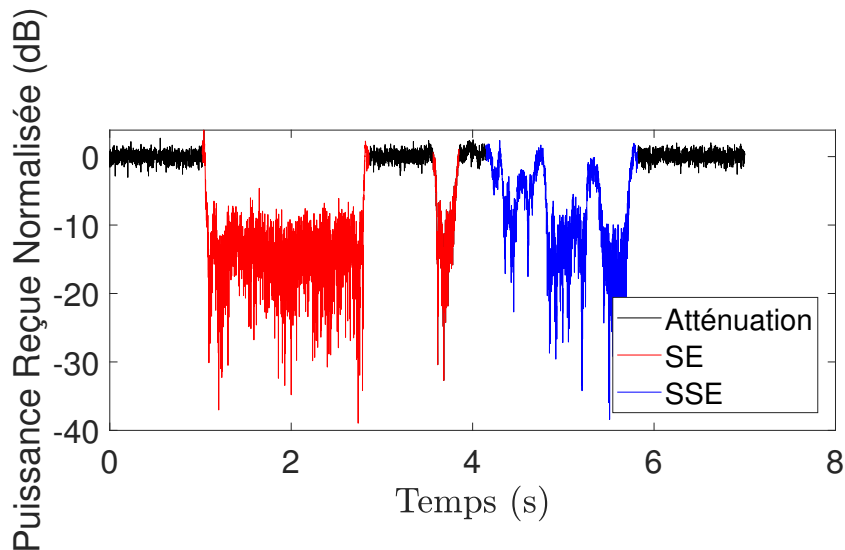


FIGURE 2.3 – Variation de puissance en fonction de temps ; **EB** (Shadowing event) et **SEB** (Series of shadowing events).

2.2.3 Identification des évènements

La bande des 60 GHz est un candidat prometteur pour les communications internes sans fil à courte portée de plusieurs Gigabits. Toutefois, comme tous les systèmes sans fil, les communications en milieux intérieurs à ondes millimétriques peuvent être affectées par l'évaporation et l'interférence à trajets mul-

tiples (ou blocage) [17]. La caractérisation de ce blocage est l'une des solutions pour limiter l'apparition des atténuations dans les futurs systèmes ; elle est basé sur plusieurs critères comme :

- **La variante temporelle de l'ombrage de la main humaine** : Cette variante temporelle présente des caractéristiques particulières à 60 GHz par rapport aux autres fréquences. D'abord le paramètre de diffraction Fresnel qui dépend de la fréquence, à 60 GHz les zones de Fresnel deviennent plus petites, affectant fortement les statistiques de cette variante. D'autre part, à ces fréquences, la peau du corps reflète partiellement ces ondes et celles qui se propagent sont fortement atténuées [16]. Ce qui fait de cette variante un bon critère de caractérisation et d'identification des différents évènements. Nous l'avons défini dans cette étude par t_{decay} signifiant le temps de décroissance du signal et le t_{rise} signifiant le temps de la montée du signal de la puissance.
- **Atténuation** : est le rapport entre la puissance d'émission avant l'antenne émettrice Tx et la puissance reçue après l'antenne réceptrice Rx. La puissance émise et reçue est calculée sur n'importe quelle largeur de bande de signal [17] dans notre cas cette puissance est mesurée par le VNA.
- **Évanouissement temporel** : $F(t)$ est la variation temporelle de l'atténuation autour d'un niveau de référence A_{ref} [17]

$$F(t)_{dB} = A(t)_{[dB]} - A_{ref[dB]} \quad (2.8)$$

Le niveau de référence est mesuré avant chaque acquisition de longue durée, lorsque personne n'est présent. On peut noter que la valeur médiane de $A(t)$ est très proche du niveau de référence [17].

- Les caractéristiques Temporelles de la puissance et du gradient utilisés pour l'identification des évènements sont désignées par $s_i(t)$ et obtenu dans l'Équation 2.9 [16] :

$$s_i(t) = \text{trouver} \left\{ \begin{array}{l} a_i(t) < -2dB/ms \\ g_i(t) > -1.7dB/ms \end{array} \right\} \quad (2.9)$$

Suite à ces critères nous pouvons identifier deux types d'évènement qui sont :

- **EB (évènements de blocage)** : Lorsque quelqu'un bloque le chemin direct, il y a une augmentation significative de l'atténuation. La série des pics d'atténuation aigus n'est pas uniformément espacée dans le temps. En raison des mouvements des personnes, ce processus n'est pas stationnaire [17]. Pour certaines mesures, ces variations rapides EB superposent à des variations plus lentes qui peuvent être observées sur plusieurs minutes. Pour les mesures LOS, l'écart type de ces variations lentes n'est pas supérieur à 1 dB, et pour les mesures Non Line of Sight (NLOS), il n'est pas supérieur à 3 dB. Les variations lentes peuvent résulter d'ajustements du mobilier ou de l'effacement indirect de groupes de trajectoires par un groupe de personnes [17]. Ces pics d'atténuation générée par le corps humain peuvent être distingués par leurs amplitudes et leurs durées. Nous

introduisons le concept de **l'événement d'ombrage** EB pour décrire cette caractéristique [17].

Lorsqu'un EB dépasse un seuil, il est détecté. Au moment où un seuil avec une pente positive est franchi, un EB commence officiellement. Lorsqu'un seuil avec une pente négative est franchi, on dit qu'un EB est terminé. Si et seulement si les critères sont remplis, un franchissement de seuil avec une pente positive ou négative est considéré comme le début ou la fin de EB. La principale caractéristique étudiée est l'amplitude maximale du EB, qu'elle est définie dans [17] comme suit :

$$A_{max_{EB}} = max[F(t)] \quad (2.10)$$

- **SEB (Serie d'évènements de blocage)** : L'intervalle de temps entre plusieurs EB successifs peut être très court. Ces approches de EB sont typiquement causés par une seule personne EB déplaçant entre les antennes [17]. De plus, le niveau de référence entre-deux EB proches est fréquemment plus élevé. Cette observation suggère que ces EB sont corrélés [17]. La définition du concept "**série d'évènements d'ombrage**" SEB pour décrire plusieurs **phénomènes d'ombrage** EB. La principale caractéristique étudiée est l'amplitude du SEB, définie par [17] comme suit :

$$A_{SEB} = max \{ A_{EB}(n) \} \quad (2.11)$$

Avec : $1 \leq n \leq N_{EB}$ et N_{EB} est le nombre de EB par SEB.

Le seuil de détection n'a pas d'influence significative sur $\leq N_{EB}$, mais il dépend également de la configuration des antennes et de la situation de visibilité. $\leq N_{EB}$ est plus important pour les configurations de la largeur du faisceau des antennes. Des trajets indirects avec différents angles d'arrivée sont impliqués dans le phénomène d'ombrage. Ces chemins ne sont pas toujours obstrués au même moment, ce qui entraîne plus de variations de la puissance reçue, et donc plus de détection de EB proches. L'antenne cornet confine l'influence de l'activité humaine dans le canal à proximité du chemin direct. Tous les chemins sont ombragés ensemble et donc plus de EB simples sont détectés par [17].

2.3 Modèles de blocage du corps humain

Lorsqu'un appareil mobile est en mouvement, le blocage humain provoque des changements temporels dans les canaux radio. Même lorsque les deux côtés de la communication sont statiques, les corps humains en mouvement perturbent fréquemment des ondes planes spécifiques, entraînant une réponse des canaux radio qui varie dans le temps. Les formes du spectre Doppler pour les connexions fixes et mobiles sont sensiblement différentes en raison de l'influence du corps sur les ondes planes. Il est plus facile d'intégrer les effets de blocage humain dans les canaux radio grâce à leurs descriptions géométriques. Elles permettent de définir les mouvements dynamiques des corps humains par rapport aux emplace-

ments des dispositifs de communication, à partir desquels il est possible d'analyser l'interaction des corps humains avec les ondes planes. Les modèles de blocage disponibles en bandes millimétriques sont représentés ci-dessous [9].

2.3.1 Modèle à double tranchant d'écran absorbant

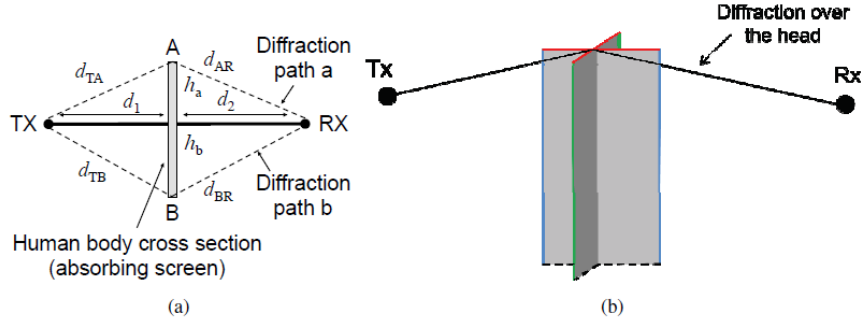


FIGURE 2.4 – Modèles d'écran absorbants d'un corps humain : (a) Modèle à double tranchant, (b) Modèle à triple tranchant de [9].

Typiquement, le corps humain a été modélisé comme un écran absorbant. La forme la plus simple est le modèle à double tranchant dans le cas d'écran en bande verticale infinitésimale, comme illustré par la Figure 2.4(a).

Il est possible d'obtenir des estimations raisonnables du champ de réception Rx derrière le corps à l'aide de la théorie de la diffraction à double couteau (Double Knife-Edge Diffraction (DKED)) de l'écran absorbant. Les champs diffractés des deux côtés de l'écran absorbant sont considérés [9]. Commençons d'abord par un écran absorbant demi-plan avec une source de transmission d'un point Tx et un point Rx, dont la géométrie est illustrée par la Figure 2.5. Le champ Rx est donné par [9] :

$$E = \frac{1+j}{2} \left\{ \left(\frac{1}{2} - C(\nu) \right) - j \left(\frac{1}{2} - S(\nu) \right) \right\} E_0 \quad (2.12)$$

où E_0 est le champ Rx lorsqu'il n'y a pas de lame absorbante. $C(\nu)$ et $S(\nu)$ sont des intégrales sinusoïdales de Fresnel données par [9]. avec :

$$C(\nu) + jS(\nu) = \int_0^\nu \exp\left(j\frac{\pi}{2}t^2\right) dt \quad (2.13)$$

$$\nu = -h\sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (2.14)$$

où : λ est la longueur d'onde

La formule s'applique quelle que soit la polarisation des ondes incidentes. L'intégrale de Fresnel à l'Équation 2.13 peut facilement être résolue numériquement en utilisant les fonctions intégrées des outils de calcul courants [9].

L'Équation 2.13 fonctionne le mieux dans les conditions suivantes [9] :

$$\begin{cases} d_1, d_2 \gg h \\ d_1, d_2 \gg \lambda \end{cases} \quad (2.15)$$

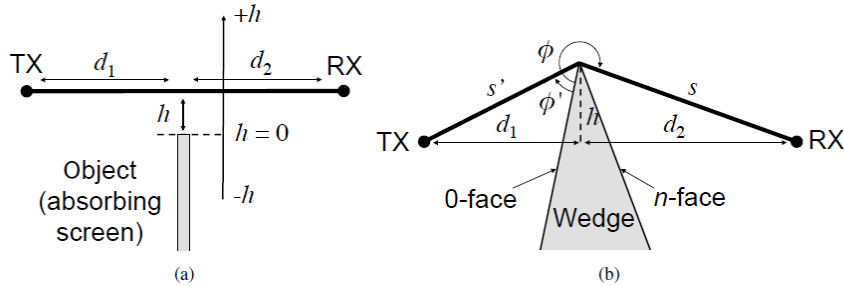


FIGURE 2.5 – (a) Écran absorbant demi-plan, (b) Coin entre deux points de Tx et Rx[9].

Considérons un corps humain de 0,2 m de large marchant sur une distance de 1 m sur une ligne perpendiculaire à la ligne Tx - Rx, comme le montre la Figure 2.6(a) [9]. Il est possible de calculer le champ relatif derrière le corps en divisant le problème DKED en deux sous-problèmes illustrés sur les Figure 2.6 (b) et (c) [9] .

Les sous-problèmes consistent en des écrans absorbants demi-plans dont les bords supérieurs correspondent aux différents côtés du corps. Le champ de chaque sous-problème est résolu par l'Équation 2.12, où le champ de référence de la ligne de vision LOS est donnée par [9] :

$$E_0 = \frac{\lambda}{4\pi (d_1 + d_2)} \exp \left(-j2\pi f \frac{d_1 + d_2}{c} \right) \quad (2.16)$$

où : c la vitesse de la lumière.

Le champ total reçu est exprimé par la somme des champs résolus à partir des deux sous-problèmes, comme suit [9] :

$$E_{DKED} = E_a \exp \left(-j2\pi f \frac{\Delta d_a}{c} \right) + E_b \exp \left(-j2\pi f \frac{\Delta d_b}{c} \right) \quad (2.17)$$

où

- E_a et E_b sont un champ diffracté observé à l'antenne Rx.
- $\Delta d_a = d_{TA} + d_{AR} - d_1 - d_2$ et $\Delta d_b = d_{TB} + d_{BR} - d_1 - d_2$ sont les distances de propagation supplémentaires des deux trajets diffractés par rapport à la ligne directe LOS .

Le champ Rx total normalisé par rapport à la ligne LOS, c'est-à-dire $\left| \frac{E_{DKED}}{E_0} \right|$ est illustré dans la Figure 2.7 pour différentes fréquences radioélectriques [9]. Il convient de noter que l'intégrale de Fresnel Équation 2.13 n'est pas nécessairement valable à des fréquences radio inférieures puisque les conditions $d_1, d_2 \gg h$ et $d_1, d_2 \gg \lambda$ ne sont pas remplies [9]. Malgré tout, l'exemple illustre bien l'influence pos-

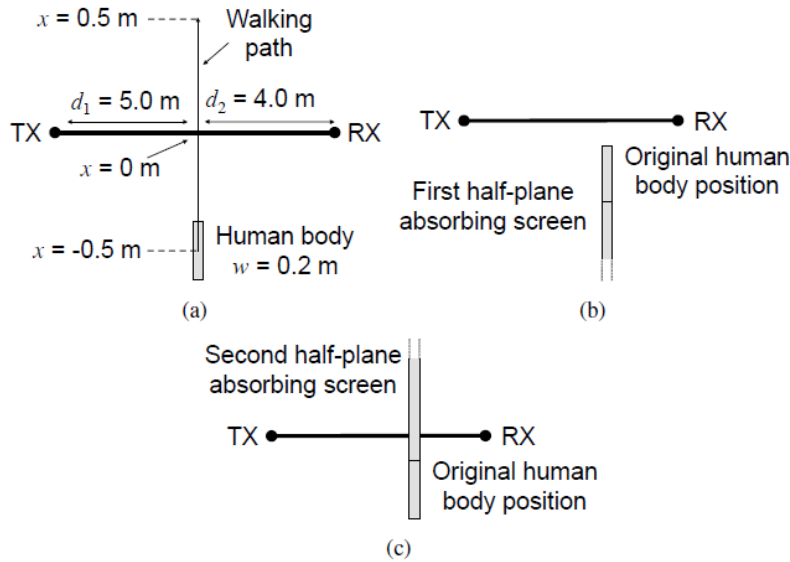


FIGURE 2.6 – (a) Corps humain bloquant la ligne de vision entre les sources ponctuelles Tx et Rx, (b) et (c) Deux sous-problèmes pour résoudre les effets d’ombrage dus au corps humain [9].

sible de la fréquence radio sur les pertes par blocage. L’onde se propage entre les points Tx et Rx dans une région locale définie par les zones de Fresnel qui diminue lorsque la fréquence radio de la liaison augmente et plus petite à des fréquences plus élevées [9].

Pour la plus basse fréquence de 0,9 GHz dans la liaison donnée, la largeur de la première zone de Fresnel est d’environ 0,86 m, ce qui est quatre fois plus grand que la largeur donnée du corps humain, et nous observons donc un effet de blocage moindre par rapport à la plus haute fréquence, c’est-à-dire 60 GHz [9]. Il convient également de noter que le champ Rx total fluctue dans la région ombragée en raison de l’interférence constructive et destructive des trajets diffractés depuis les côtés de l’écran absorbant. Cette fluctuation est plus apparente dans les hautes fréquences [9]. Il est important de faire la moyenne de cette fluctuation à petite échelle du champ Rx lors de la comparaison des mesures et des modèles. Grâce à sa simplicité, le DKED est également utilisé pour estimer l’atténuation des liaisons lorsque plusieurs corps humains bloquent un chemin de propagation [9].

2.3.2 Modèles de cylindres

Modèle de cylindres circulaires

Les modèles de blocage humain basés sur des cylindres lorsqu’un cylindre a une section transversale circulaire et qu’il est un conducteur électrique parfait. On peut dériver des champs diffractés polarimétriques de forme fermée à partir du cylindre en se basant sur la théorie géométrique de la diffraction (Geometrical Theory of Diffraction (GTD)) [9].

$$E_z = \sum_{n=1}^{\infty} D_n^e E_i [\exp \{-(jk + \Omega_n^e) \tau_1\} + \exp \{-(jk + \Omega_n^e) \tau_2\}] \frac{\exp(-jk s_d)}{\sqrt{8j\pi k s_d}} \quad (2.18)$$

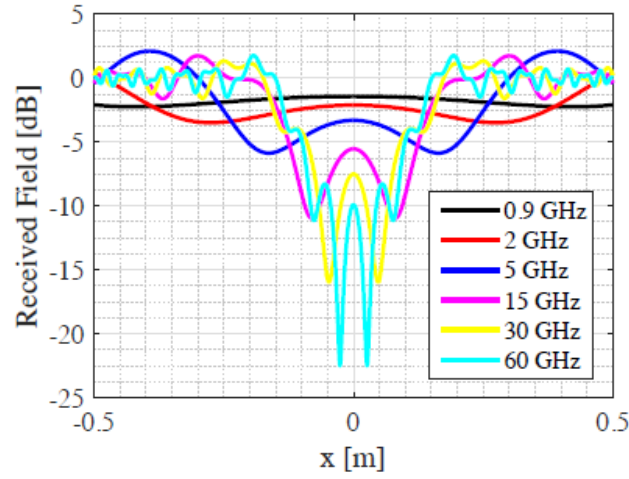


FIGURE 2.7 – Champ reçu normalisé (Rx) à diverses fréquences radioélectriques en raison de l'ombre humaine le long du chemin de marche ; la géométrie du corps humain, les emplacements Tx et Rx sont définis dans la Figure 2.6 (a) [9].

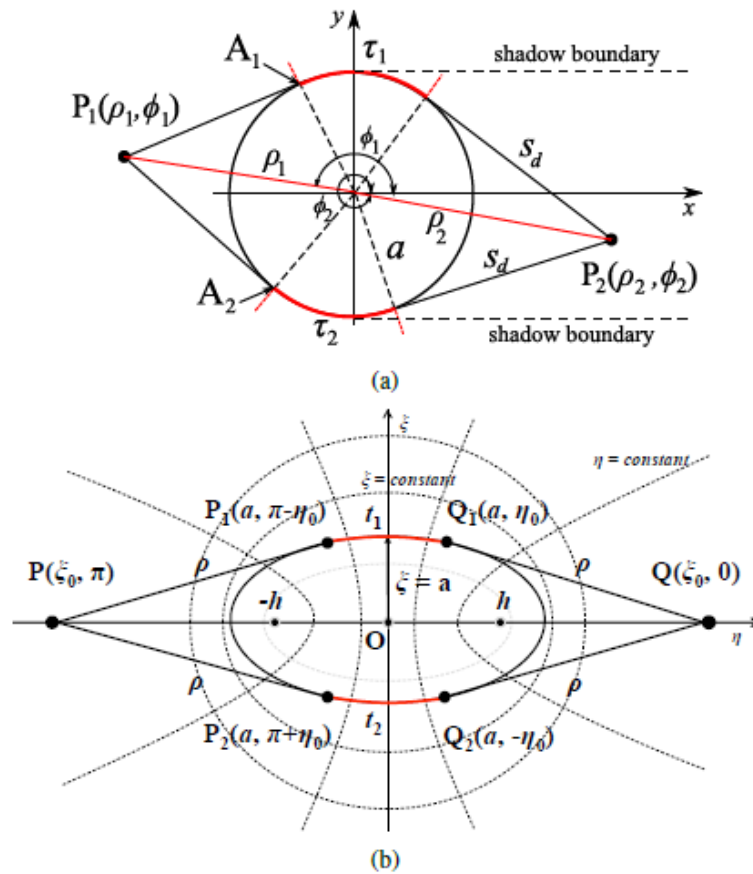


FIGURE 2.8 – Modèle de blocage de liaison : (a) modèles circulaires, (b) cylindres elliptiques [9].

où deux trajectoires de propagation des distances τ_1 et τ_2 délivrent de l'énergie entre les points P_1 et P_2 sont atténuées selon une constante. Pour le champ électrique, cette constante est donnée par [9] :

$$\Omega_n^e = \frac{\alpha_n}{a} M e^{j\pi/6} \quad (2.19)$$

Avec $-\alpha_n$ dénote la $n^{\text{ème}}$ racine (zéro) de la fonction aérienne $A_i(\cdot)$. Enfin d et M sont donnés par :

$$D_n = 2MAi'(\alpha_n)^{-2} e^{j\pi/6} \quad (2.20)$$

$$M = \left(\frac{ka}{2} \right) \quad (2.21)$$

où : A_i désigne une dérivée de la fonction Airy et $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ est le nombre d'onde.

Modèle de cylindre elliptique

Considérons un cylindre avec une section transversale elliptique. On suppose que le centre de l'ellipse coïncide avec l'axe z du système de coordonnées cartésiennes [9]. La distance entre les deux points focaux de l'ellipse est supposée être de $2h$ [9]. Les coordonnées elliptiques sur le plan horizontal, défini par le domaine $\xi - \eta$ tel qu'illustré à la Figure 2.4 (b) ont une relation avec la coordonnée cartésienne x - y comme suit [9] :

$$x = h \cosh \xi \cos \eta \quad (2.22)$$

$$y = h \sinh \xi \sin \eta \quad (2.23)$$

- Les emplacements sont exprimés dans le système de coordonnées elliptiques, par exemple $P(\xi, \eta)$.
- L'ellipse représentant la section transversale du corps humain est donnée par $\xi = a$.
- Les antennes Tx et Rx sont situées à $P(\xi_0, \pi)$ et $Q(\xi_0, 0)$ respectivement.
- Deux rayons diffractants symétriques par rapport à l'axe horizontal partent de l'antenne Tx en P vers l'antenne Rx en Q.
- Les points de tangence où les deux rayons incidents et quittent le cylindre sont $P_1(a, \pi - \eta_0)$, $Q_1(a, \eta_0)$, $P_2(a, \pi + \eta_0)$ et $Q_2(a, -\eta_0)$
- La distance radiale des points de tangence à Tx et Rx est $\overline{PP_1} = \overline{QQ_1} = \overline{PP_2} = \overline{QQ_2} = \rho$
- On déduit ci-après le champ total à la réception E_z pour une polarisation verticale. Tout d'abord, le champ diffracté reçu dû au rayon $\overline{PP_1QQ_1}$ est égal à :

$$E_{1z} = A_0 \rho^{-1} \exp \{jk(\rho + t_1)\} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} B_n(\eta_p) B_n(\eta_Q) \cdot \exp \left\{ jk^{\frac{1}{3}} \tau_n \alpha(t_1) \right\} \left[1 - \exp \left\{ jkT + jk^{\frac{1}{3}} \tau_n \alpha(T) \right\} \right]^{-1} \quad (2.24)$$

où :

- $\eta_P = \pi$ et $\eta_Q = 0$ sont les coordonnées η correspondant aux emplacements Tx et Rx P et Q, respectivement

- k est le nombre d'onde
- t_1 désigne la longueur d'arc de P_1 à Q_1
- T est la longueur d'arc totale de l'ellipse
- A_0 est une constante donnée par :

$$A_0 = \frac{e^{j\pi/4}}{2\pi} \sqrt{\lambda} \quad (2.25)$$

$A(\eta)$ désigne le rayon de l'ellipse sur le grand axe comme :

$$b(\eta) = h(\cosh a \sinh a)^{-1} (\sinh^2 a - \sin^2 \eta + 1)^{3/2} \quad (2.26)$$

De plus, dans Équation 2.24, $\alpha(x)$ est :

$$\alpha(x) = \int_0^x b^{-2/3}(\eta) d\eta \quad (2.27)$$

et $\tau(n)$ est :

$$\tau_n = e^{j\pi/3} 6^{-1/3} q_n \quad (2.28)$$

Ensuite, le champ diffracté E_{2z} dû au rayon $\overline{PP_2Q_2Q}$ peut être évalué de la même manière que E_{1z} . Maintenant, le champ diffracté total au Rx, en tant que combinaison des champs diffractés des deux côtés du cylindre elliptique, est donné par : $E_z = E_{1z} + E_{2z}$ [9].

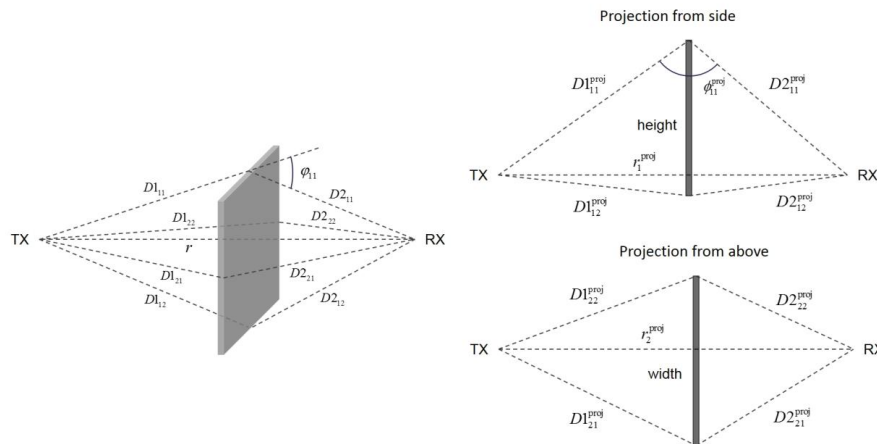


FIGURE 2.9 – Géométrie d'un modèle de blocage de liaison. Les vues latérales et supérieures de la géométrie représentées dans les figures en haut à droite et en bas à droite sont appelées "projections 1 et 2", respectivement dans le texte [9].

2.3.3 Autres modèles heuristiques

Modèles fondés sur la mesure

Les modèles basés sur des mesures en ondes millimétriques qui caractérisent l'atténuation du niveau du signal dû à l'ombrage humain observé dans les liaisons radio à courte portée à 60 GHz en utilisant une distribution Gaussienne [9]. Une approximation linéaire par morceaux de l'ombrage variant dans le temps

à 60 GHz est proposée en raison du blocage humain. L'approximation consiste en une pente décroissante, un creux d'ombrage et une pente croissante de l'intensité de champ reçue au fur et à mesure que le temps passe pendant un événement de blocage humain [9].

Modèles mmMAGIC

La géométrie de l'objet bloquant est illustrée par la Figure 2.9, où les vues latérales et supérieures de la géométrie montrée sur le côté droit de la figure sont appelées "projection 1 et 2" [9]. L'objet de blocage est un écran rectangulaire flottant dans l'air, qui est censé être suffisamment complet pour simuler différents objets physiques. La perte par ombrage est déterminée par les champs diffractés des quatre bords de l'écran comme suit [9] :

$$E_{mmMAGIC} = \left(1 - \prod_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 s_{ij} \left[\frac{1}{2} - \frac{ph_{ij}}{Ph} F_{ij} \right] \right) E_0 \quad (2.29)$$

Avec :

$$F_{ij} = \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\nu_{ij}\pi}{2} \right) \right\} \cos \psi_{ij} \quad (2.30)$$

$$\nu_{ij} = \sqrt{\frac{\pi}{\lambda} (D1_{ij}^{proj} - D2_{ij}^{proj} - r_i^{proj})} \quad (2.31)$$

$$ph_{ij} = \exp \left\{ \frac{-j2\pi}{\lambda} (D1_{ij} + D2_{ij}) \right\} \quad (2.32)$$

$$Ph = \exp \left(\frac{-j2\pi}{\lambda} r \right) \quad (2.33)$$

s_{ij} est un paramètre de signe, qui vaut 1 si la condition de NLOS dans la projection i alors que :

$s_{ij} = \text{sgn}(D1_{ij} + D2_{ij} - D1_{ik} - D2_{ik})$ si la projection s_{ij} est en condition de LOS, $k = \text{mod}(j, 2) + 1$ [9].

Lorsqu'un trajet multiple qui fait l'objet du présent blocage est attribué à des réflexions spéculaires, le Tx ou le Rx de la Figure 2.9 doit être remplacé par son image miroir par rapport aux surfaces de réflexion. D'autre part, si un trajet multiple soumis au présent blocage n'est pas dû à des réflexions spéculaires, les Tx et Rx de la géométrie doivent être remplacés par les points d'interaction précédents et suivants du trajet multiple [9]. Le terme $\cos \psi_{ij}$ dans F_{ij} tient compte de l'augmentation de l'affaiblissement par diffraction dans la zone d'ombre située juste derrière l'écran. Lorsque la distance relative à l'écran est suffisamment grande, ce facteur peut être négligé [9]. Sur la Figure 2.4 (b) les emplacements sont exprimés dans le système de coordonnées elliptiques [9].

2.3.4 Comparaison entre les modèles

La Figure 2.10 montre l'affaiblissement de blocage humain estimé à partir des différents modèles traités dans cette section. La comparaison est effectuée à trois fréquences radioélectriques différentes, à savoir 15, 28 et 60 GHz [9]. L'affaiblissement est estimé pour différentes orientations azimutales d'un corps humain avec une distance Tx — corps et Rx — corps de 2,76 m, une largeur et une épaisseur du corps de 0,5 et 0,2 m [9].

L'épaisseur du corps n'est prise en compte que dans le modèle de cylindre elliptique, sinon seule la largeur est adoptée pour définir la dimension des écrans absorbants et des cylindres circulaires [9].

L'angle d'orientation en azimutal est défini ainsi que la section transversale d'un corps humain est maximale à 0° et 180° parce que l'humain pointe soit le sur Tx ou sur Rx, cependant que l'orientation 90° correspond au corps humain qui pointe vers une ligne perpendiculaire à la liaison Tx — Rx [9]. Le corps humain est de 1 m de haut et les hauteurs d'antenne TX et RX sont réglées de sorte que la ligne optique LOS de la liaison TX-RX frappe le centre de l'objet de blocage.

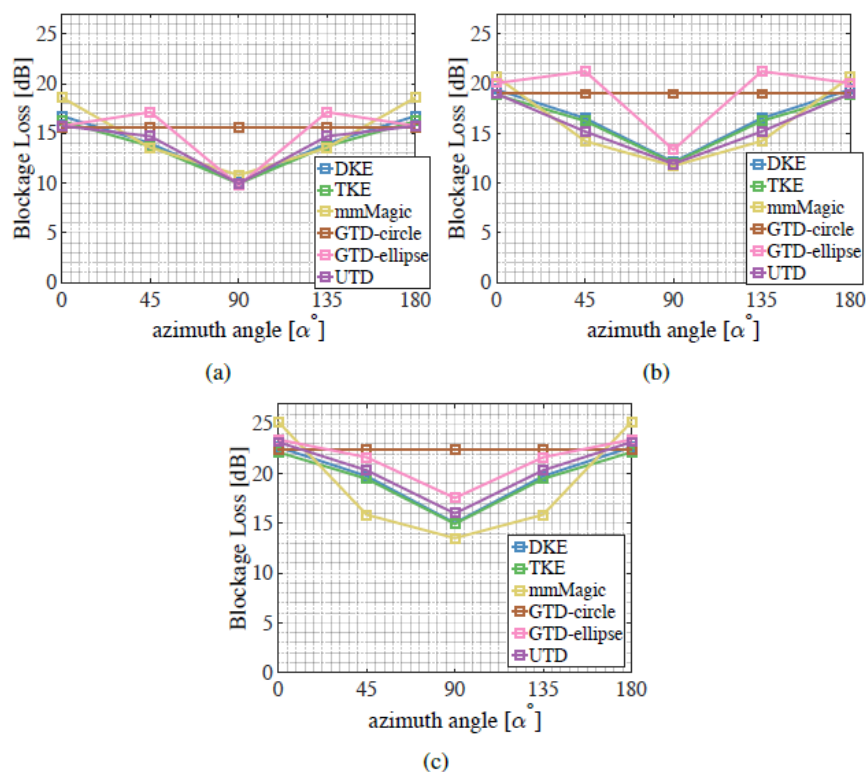


FIGURE 2.10 – Comparaison des modèles de blocage humain pour différentes orientations azimutales d'un corps humain : (a) 15, (b) 28, (c) 60 GHz [9].

Conclusion

La théorie du blocage et la définition des événements de blocage EB et SEB qui sont responsables de quantifier l'influence de l'activité humaine sur la propagation ont été présentés dans ce chapitre. Nous

avons aussi présenté le système de mesure et le déroulement de l'expérience. Alors que les antennes sont fixes, les changements dans le temps du canal sont provoqués par le mouvement de la main humaine. Nous avons aussi présenté les différents modèles de blocage du corps humain, les plus répandus comme le modèle à double tranchant d'écran absorbant, le modèle cylindrique et d'autres modèles moins utilisés. Nous avons fini ce chapitre par une comparaison entre ces différents modèles du blocage.

Chapitre 3

Caractérisation des Évènements de Blocage d'une Main Humaine à 60 GHz

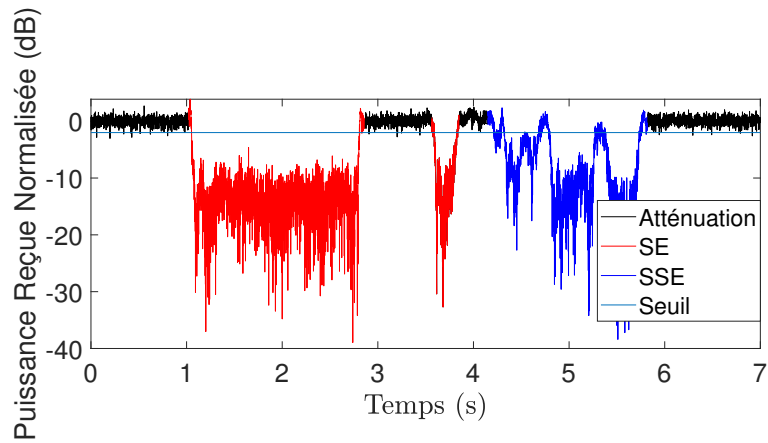
Introduction

Le passage d'un être humain entre deux antennes peut être critique pour une liaison radio, comme nous l'avons déjà décrit théoriquement dans le chapitre 1 et le chapitre 2. Pour cette raison, les effets et la caractérisation de l'obstruction du corps humain sur les liaisons des bandes millimétriques doivent être pris en considération. Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de caractérisation du blocage de la main humaine à 60 GHz. Une caractérisation du blocage statique, dynamique et variable dans le temps est réalisée en ce qui concerne la caractérisation de la variante temporelle, l'évaluation des courbes de la fonction de densité cumulative (CDF), suivie d'une analyse fréquentielle de l'effet Doppler.

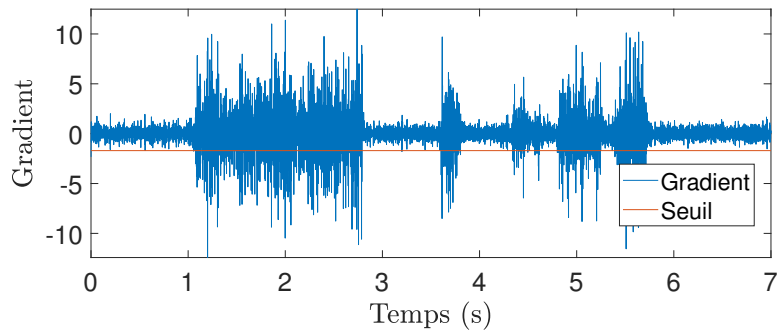
Les systèmes à 60 GHz ont récemment été conçus comme une solution de communication à courte portée de l'ordre du giga bit. Le blocage variable dans le temps SEB produit par la main humaine est l'un des effets de propagation les plus nuisibles pour les applications 5G et 6G. Pour le bon développement de ces nouveaux systèmes à ondes millimétriques mmWave, la caractérisation et la modélisation des canaux à 60 GHz sont des tâches nécessaires.

Les modèles de distribution actuellement utilisés offrent des performances de qualité variable. La distribution de probabilité qui correspond le mieux aux variations a été sélectionné, en utilisant les valeurs de la méthode du maximum de vraisemblance Maximum Likelihood Estimator (MLE). Le changement rapide de l'intensité du signal est représentée par l'évanouissement à petite échelle. Les signaux à trajets multiples qui arrivent au récepteur avec des déphasages aléatoires sont à l'origine de l'évanouissement à petite échelle, car ils provoquent des changements rapides de l'amplitude du signal sur des courtes distances. Trois caractéristiques du canal, notamment la sélectivité temporelle, fréquentielle et spatiale du canal, définissent l'évanouissement à petite échelle.

Les variations spatiales de l'ombrage ont été séparées des variations temporelles dues à l'activité



(a)



(b)

FIGURE 3.1 – Application des seuils sur la puissance et le gradient : (a) Puissance reçue, (b) Gradient.

humaine. On peut considérer que l'activité de la main humaine est caractérisée momentanément par des réflexions de premier ordre, alors que le chemin de la ligne de vision LOS reste non obstrué. Une analyse statistique sur les événements d'ombrage (les probabilités d'ombrage et la durée d'ombrage) dus à l'activité humaine dans des environnements intérieurs sont présentés ainsi que la perte de puissance et du gradient due à l'ombrage de la main humaine.

3.1 Évènement de blocage d'une main statique

Nous avons d'abord commencé par fixer un seuil de -2dB pour la puissance reçue et de $\pm 1.7\text{dB}$ pour le gradient, la Figure 3.1.

L'isolation du premier évènement est représentée dans la Figure 3.2, elle se fait en identifiant le début et la fin de l'évènement, ce que nous l'avons fait visuellement en prenant la première valeur qui satisfait la condition du gradient et de puissance de l'Équation 2.9. Nous remarquons l'existence des chutes de

puissance aiguës qui peuvent atteindre des vingtaines de dB et qui induisent l'instabilité du signal de la puissance reçue.

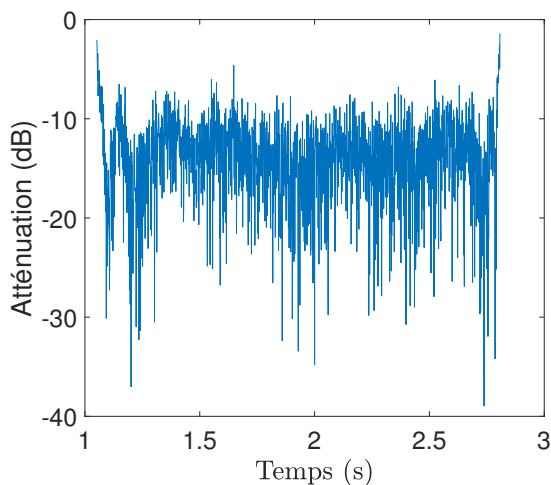


FIGURE 3.2 – Isolation du premier évènement "EB statique".

3.1.1 Caractérisation temporelle du début et la fin de l'évènement

L'extraction a été faite visuellement en prenant l'intervalle qui vient juste avant la première chute brusque de la puissance. la représentation de cet intervalle est introduite dans la Figure 3.3. Du même principe que l'extraction de t_{decay} nous avons pu extraire le t_{rise} en prenant l'intervalle qui vient juste après la dernière chute brusque de la puissance à la fin d'évènement EB statique. La représentation de cet intervalle est introduite dans la Figure 3.4. Nous avons calculé le temps de décroissance t_{decay} et de montée t_{rise} pour les évènements EB statique et dynamique, pour des seuils de 3, 5, 10, 15, 20 et 30 dB, comme illustré dans le Tableau 3.1 pour EB statique. Nous observons que les valeurs de t_{decay} et de t_{rise} de l'évènement EB dynamique sont plus importantes que les valeurs de l'évènement statique du au dés-alignement de la ligne de vision (LOS).

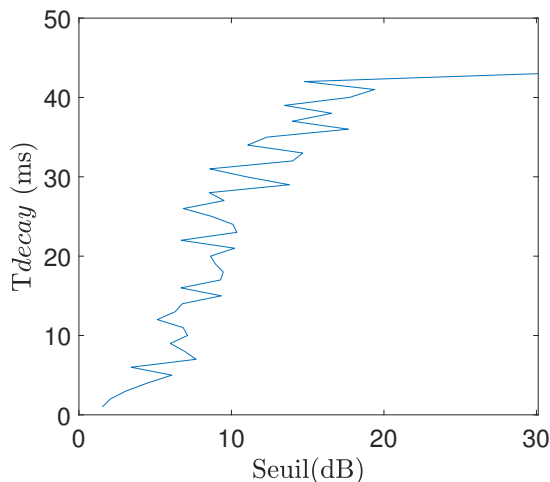
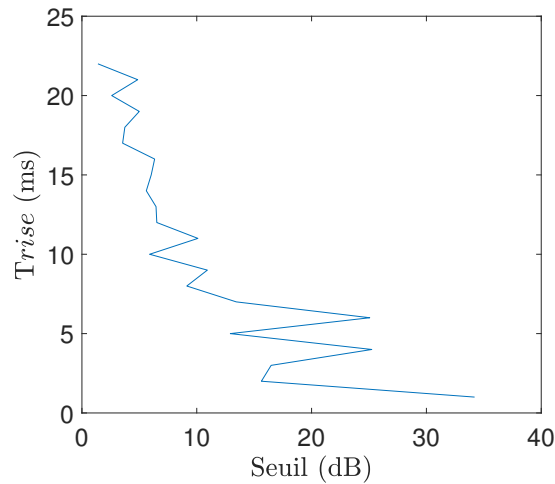


FIGURE 3.3 – Extraction de t_{decay} pour EB statique.

FIGURE 3.4 – Extraction de t_{rise} pour EB statique.

Seuil (dB)	t_{decay} (ms)	t_{rise} (ms)
3	2.76	20.41
5	5.31	17.65
10	26.25	9.10
15	37.42	5.60
20	42.20	4.31
30	43	1.23

TABLE 3.1 – Caractérisation de t_{decay} et t_{rise} de l'évènement EB statique.

D'après les résultats présentés dans Tableau 3.2 et Tableau 3.1 nous remarquons que les valeurs de t_{decay} sont proportionnelles aux valeurs du seuil. Contrairement aux valeurs de t_{rise} qui sont inversement proportionnelles aux valeurs de seuil. Nous notons aussi que ces valeurs majoritairement sont de l'ordre de quelques dizaines de milliseconde.

3.1.2 Caractérisation de la puissance reçue

La représentation de la CDF de l'atténuation ainsi que celle du gradient est illustré dans la Figure 3.5. Dans cette étape de caractérisation nous comparons les résultats de la fonction de densité cumulative de chaque évènement avec d'autres distributions usuelles pour voir quelle est la distribution la plus proche aux résultats obtenus. Le Tableau 3.2 présente les paramètres des distributions de probabilité ajustées aux données de l'évènement dont la puissance est d'une moyenne de -14.2516 dB, une variance de 0.2571 dB et une valeur maximale de -38.95 dB. D'après les valeurs du log de vraisemblance où "loglikelihood" du Tableau 3.2, nous remarquons que la meilleure estimation parmi les quatre distributions est log-normal parce qu'elle est associée à la valeur la plus grande de loglikelihood -5035.7. Une illustration de cette comparaison est introduite dans la Figure 3.6.

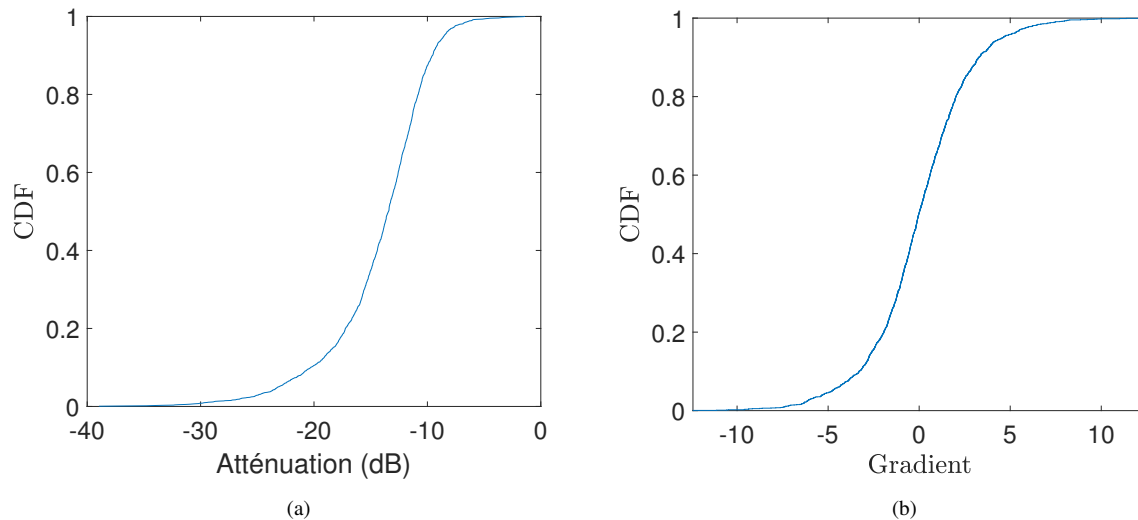


FIGURE 3.5 – Représentation de la CDF pour l'évènement EB statique. : (a) Représentation de la fonction de densité cumulative de l'évènement SE statique , (b) Représentation de la fonction de densité cumulative du gradient.

Distribution	moyenne	écart type	N-log MLE
Normal	0.107938	0.0763567	-5141.32
Lognormal	0.00748157	0.00529253	-5035.7
Exponentielle	0.340097	-	-6421.47
Weibull	0.126402	0.0527471	-5168.4

TABLE 3.2 – Comparaison d'ajustements des distribution et la CDF du EB statique

3.1.3 Taux de changement de la puissance

Le taux de changement de la puissance est défini par le gradient qui montre l'état de changement à chaque instant. Nous observons à partir du graphe du gradient présenté dans la Figure 3.7 que les changements remarquables au niveau du gradient sont dus aux chutes brusques au niveau de la puissance comme au début, au milieu et à la fin de l'évènement. Le gradient est d'une moyenne de 0.0011 dB/ms, une variance de 8.0255 dB/ms et une valeur maximale de 12.4869 dB/ms.

3.1.4 Analyse et discussions

Après le traitement effectué sur l'évènement EB statique, nous avons eu les résultats suivant :

- Existence de chutes brusques qui dépassent 30 dB. En comparaison avec d'autres études similaires, ils ont eu des résultats proches ; une perte de 48 dB suivant [22], pertes de plus de 20dB suivant [23] et [17] pour une résolution temporelle de 100ms.
- Le temps de décroissance t_{decay} et le temps de montée t_{rise} déterminées sont de l'ordre de quelques dizaines de milliseconde, Ce résultat obtenu est similaire à la littérature et aux résultats de l'expérience de [22].
- La distribution la plus proche aux résultats obtenus lors de la caractérisation de puissance est **log-**

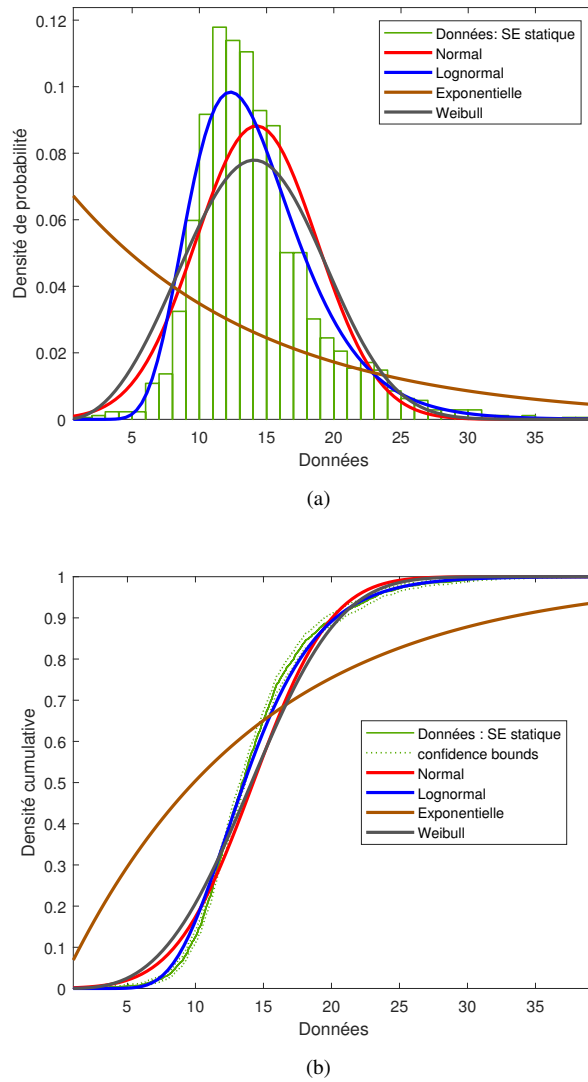


FIGURE 3.6 – Ajustement des distributions de probabilité EB statique : (a) Représentation de la densité de probabilité. (b) Représentation de la densité cumulative.

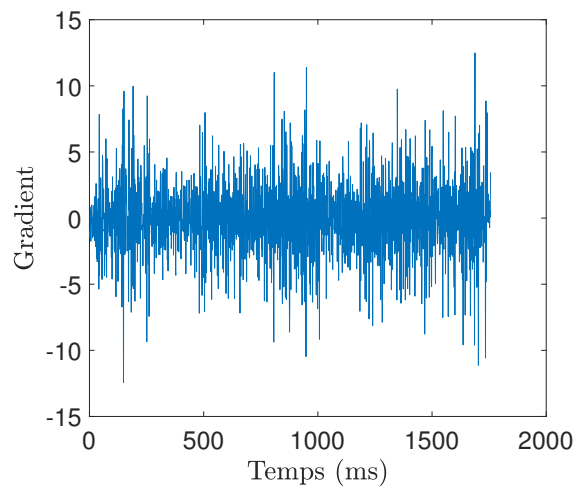


FIGURE 3.7 – Représentation du gradient pour l'évènement EB statique.

normal avec une valeur du log de vraisemblance de **-5035.7**.

3.2 Évènement de blocage d'une main en mouvement

Le début de l'évènement est défini par la chute de puissance en dessous du seuil (-2dB), la présentation de l'évènement EB dynamique est introduite dans la Figure 3.8. Le graphe de la Figure 3.8 montre qu'il y a moins de pics brusques en comparaison avec l'évènement EB statique, il y a des chute de puissance qui atteignent une trentaine de dB, cependant une partie de l'information pourrait être transmise.

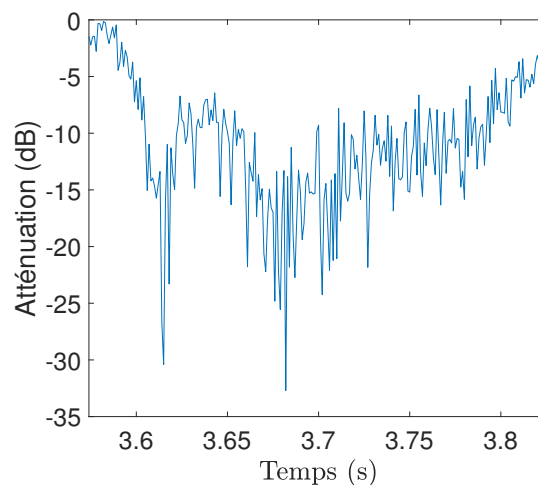
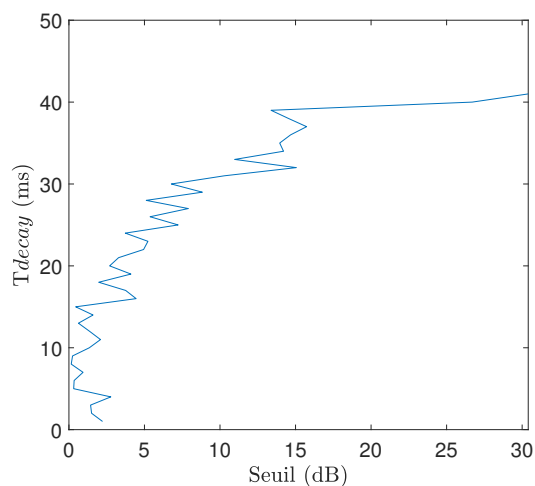
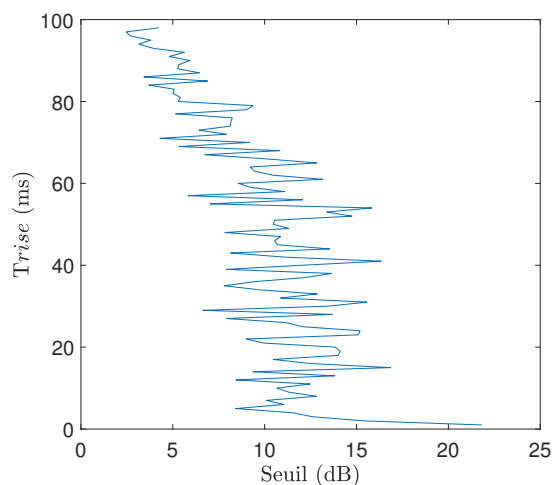


FIGURE 3.8 – Isolation du deuxième évènement "EB dynamique".

3.2.1 Caractérisation temporelle du début et la fin de l'évènement

L'extraction a été faite en suivant les mêmes étapes réalisées dans le premier évènement. La représentation de cet intervalle est introduite dans la Figure 3.9. La représentation de t_{rise} pour cet évènement est introduite dans la Figure 3.10. Nous avons calculé le temps de décroissance t_{decay} et de montée t_{rise} pour les évènements EB statique et dynamique, pour des seuils de 3, 5, 10, 15, 20 et 30 dB, comme illustré dans le Tableau 3.1 pour EB statique et le Tableau 3.3 pour EB dynamique. Nous observons que les valeurs de t_{decay} et de t_{rise} l'évènement dynamique sont plus importantes que les valeurs de l'évènement statique du au dés-alignement de la ligne de vision (LOS).

D'après les résultats présentés dans le Tableau 3.1 et le Tableau 3.2 nous remarquons que les valeurs de t_{decay} sont proportionnelles aux valeurs du seuil. Contrairement aux valeurs de t_{rise} qui sont inversement proportionnelles aux valeurs de seuil. Nous notons aussi que ces valeurs majoritairement sont de l'ordre de quelques dizaines de milliseconde.

FIGURE 3.9 – Extraction de t_{decay} pour EB dynamique.FIGURE 3.10 – Extraction de t_{rise} Pour EB dynamique.

Seuil (dB)	t_{decay} (ms)	t_{rise} (ms)
3	14.76	98.35
5	23.10	84.66
10	29.80	37.80
15	36.22	27.13
20	39.40	1.23
30	40.80	-

TABLE 3.3 – Caractérisation de t_{decay} et t_{rise} de l'évènement EB dynamique.

3.2.2 Caractérisation de la puissance reçue

Dans cette étape de caractérisation nous comparons les résultats de la fonction de densité cumulative de chaque évènement avec d'autres distributions usuelles pour voir quelle est la distribution la plus proche aux résultats obtenus. Le Tableau 3.4 présente les paramètres des distributions de probabilité ajustées aux données de l'évènement EB dynamique dont la puissance est d'une moyenne de -10.8958 dB, une

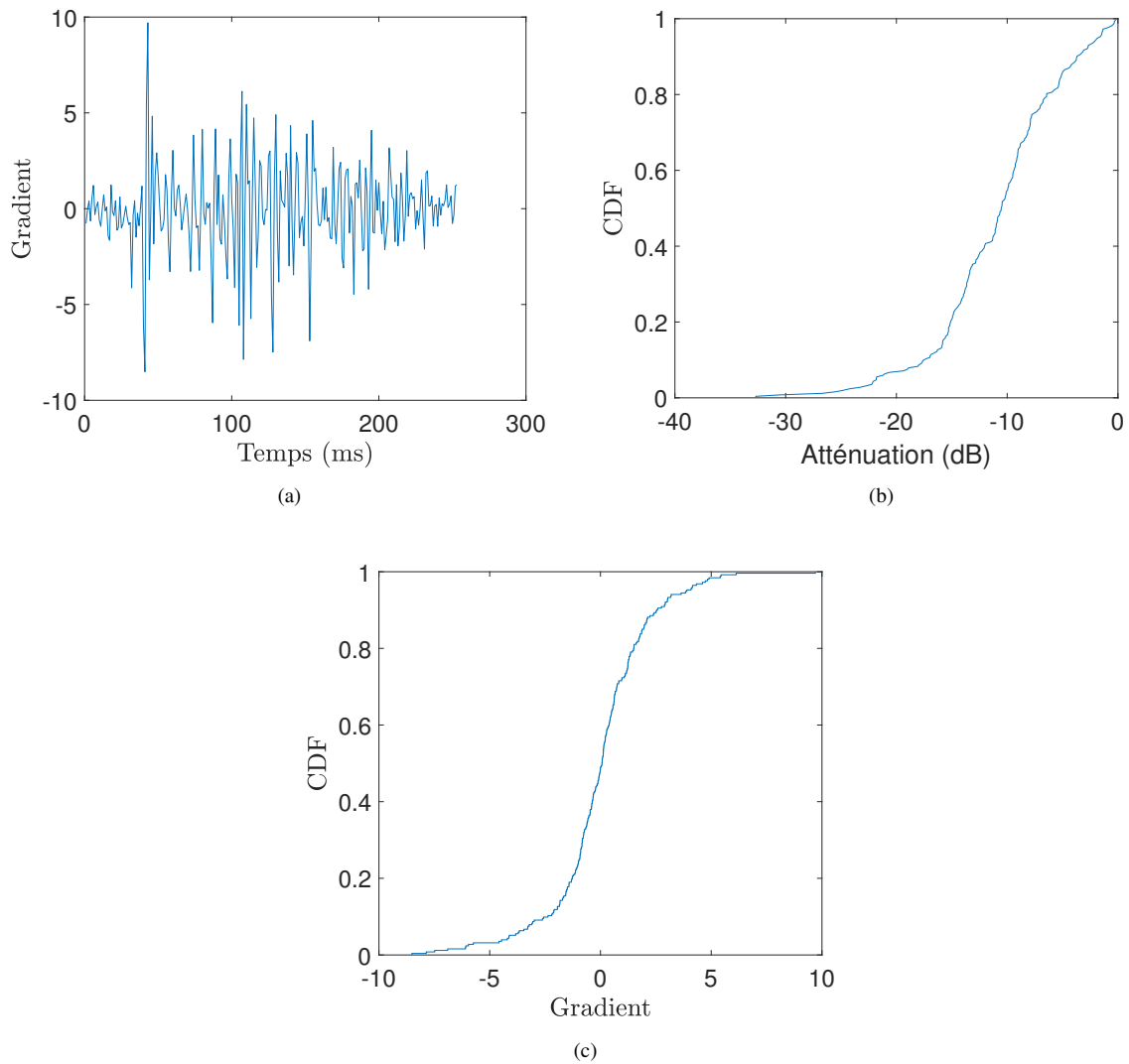
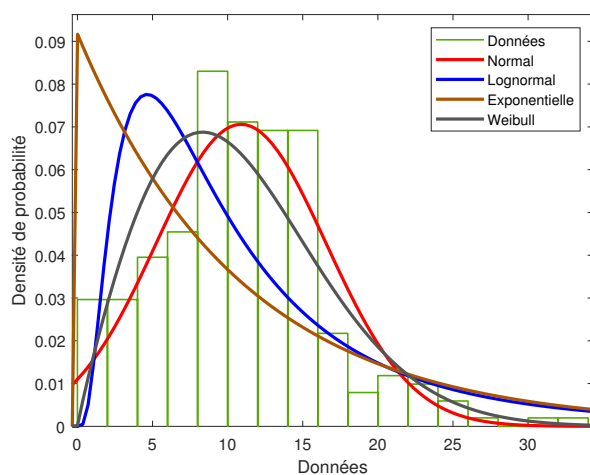


FIGURE 3.11 – Représentation de la CDF pour l'évènement EB dynamique. : (a) Représentation du gradient pour l'évènement EB dynamique, (b) Représentation de la fonction de densité cumulative de l'évènement EB dynamique, (c) Représentation de la fonction de densité cumulative du gradient.

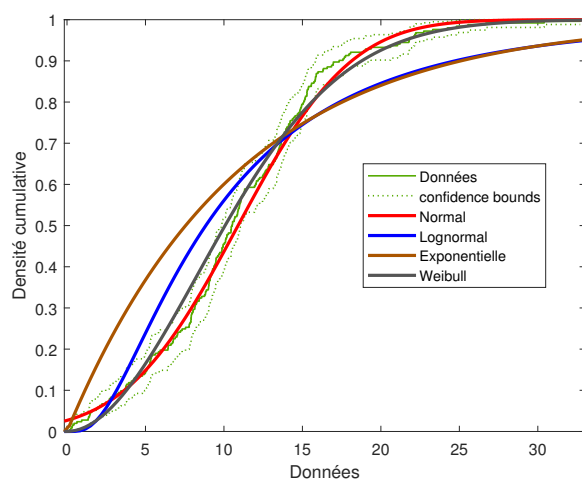
variance de 0.0054 dB et une valeur maximale de -32.7 dB. D'après les valeurs du log de vraisemblance où "loglikelihood" du Tableau 3.4, Nous remarquons que la valeur loglikelihood la plus grande -794.62 est associée à la distribution de Weibull. La représentation graphique qui renforce ce résultat est illustrée dans la Figure 3.12.

Distribution	moyenne	écart type	N-log MLE
Normal	0.355242	0.251942	-796.621
Lognormal	0.0504443	0.0357757	-854.182
Exponentielle	0.685184	-	-857.322
Weibull	0.415337	0.0963415	-794.62

TABLE 3.4 – Comparaison des formes de distribution les plus proches à EB dynamique



(a)



(b)

FIGURE 3.12 – Ajustement des distributions de probabilité EB dynamique : (a) Représentation de la densité de probabilité. (b) Représentation de la densité cumulative.

3.2.3 Taux de changement de la puissance

Le taux de changement de la puissance est défini par le gradient qui montre l'état de changement à chaque instant. Nous observons à partir du graphe du gradient présenté dans (a) Figure 3.11 que les changements remarquables au niveau du gradient sont dus aux chutes brusques au niveau de la puissance comme au début et au milieu de l'évènement. Le gradient est d'une moyenne de -0.0006883 dB/ms, une variance de 5.3165 dB/ms et une valeur maximale de 9.7025 dB/ms.

3.2.4 Analyse et discussions

Après le traitement effectué sur l'évènement EB dynamique nous avons eu les résultats suivant :

- Existence de chutes brusques entre 30 et 35 dB. En comparaison avec d'autres études similaires, ils ont eu des résultats proches ; pertes de plus de 20dB suivant [23] et [17] par contre la durée d'évanouissement dans notre cas est plus petite.

- Le temps de décroissance et le temps de montée déterminées sont de l'ordre de quelques dizaines de milliseconde. Ce résultat obtenu est similaire à la littérature et aux résultats de l'expérience de [22] ainsi que les résultats obtenus lors du traitement de l'évènement EB statique.
- La distribution la plus proche aux résultats obtenus lors de la caractérisation de puissance est Weibull avec une valeur du log de vraisemblance de -794.62 .

3.3 Série d'évènement de blocage par les doigts d'une main

A l'instant $t = 4195$ ms, on coupe le signal par les doigts espacées qui bougent jusqu'à l'instant $t = 4742$ ms. Dans ce cas, on va s'intéresser à la caractérisation de puissance des grandeurs prédéfini dans le chapitre 2.

3.3.1 Caractérisation de la puissance

Pour les systèmes fonctionnant à 60 GHz, une puissance d'émission élevée est nécessaire pour compenser les pertes de trajet multiple. La Figure 3.13 représente l'évènement SEB par les doigts défini dans l'intervalle de temps suivant : $[4195 : 4742]$ ms avec une moyenne de -4.9316 dB, une variance de 15.1390 dB et une valeur maximale de -22.7 dB.

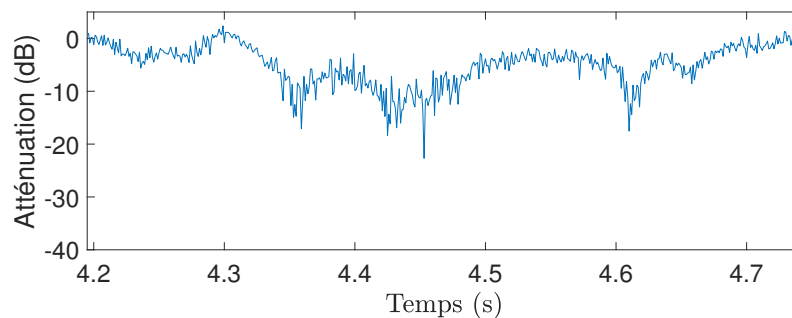


FIGURE 3.13 – Représentation de l'évènement SEB par les doigts en fonction de la puissance.

3.3.2 Taux de changement de la puissance

La Figure 3.15 représente la variation du gradient en fonction de la puissance de l'évènement SEB par les doigts avec une espérance de 0.0013 dB/ms, une variance de 1.2575 dB/ms et une valeur maximale de 6.4535 dB/ms.

Le Tableau 3.5 représente les valeurs de la moyenne, la variance et les valeurs calculés par la méthode du maximum de vraisemblance MLE.

3.3.3 Analyse et discussions

Des mesures de la puissance reçue ont été recueillies dans la bande de 60 GHz en présence d'activité des doigts d'une main humaine de la ligne de vision LOS à courte portée. Les taux de transfert de données

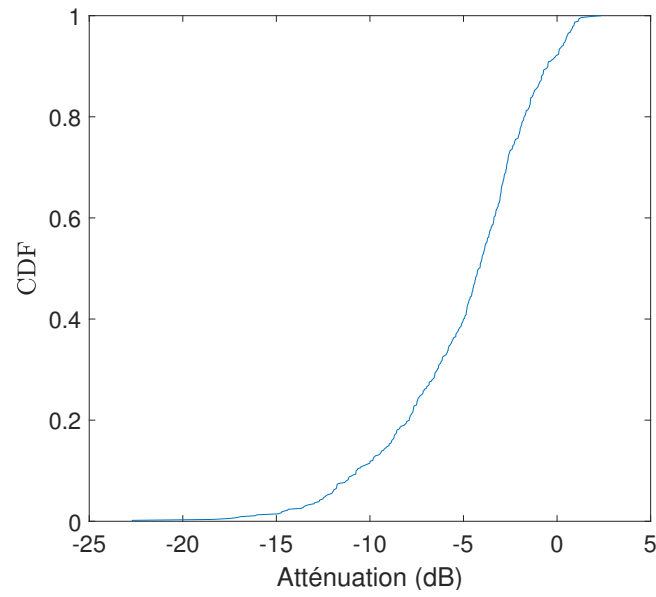


FIGURE 3.14 – Représentation des courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts.

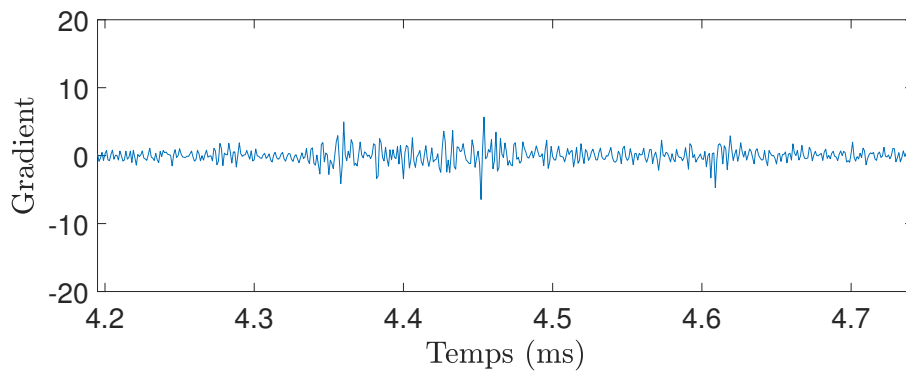


FIGURE 3.15 – Représentation de la variation temporelle du gradient pour l'évènement SEB par les doigts.

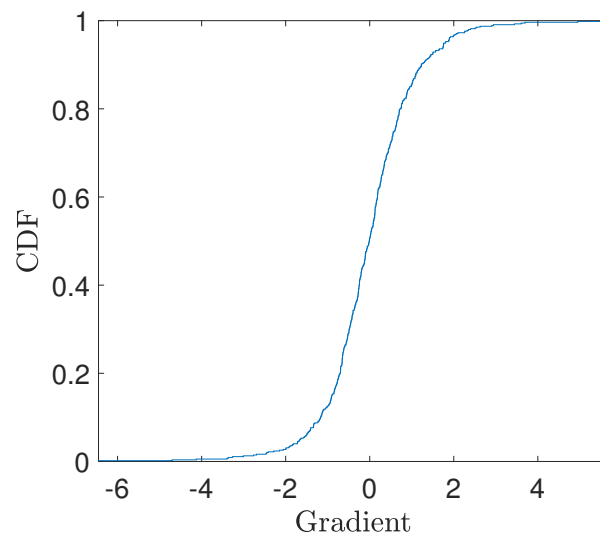


FIGURE 3.16 – Représentation des courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts.

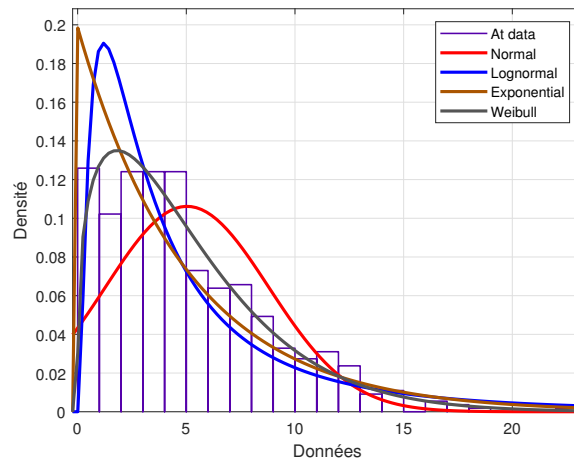


FIGURE 3.17 – Représentation de la densité de puissance de l'évènement SEB par les doigts.

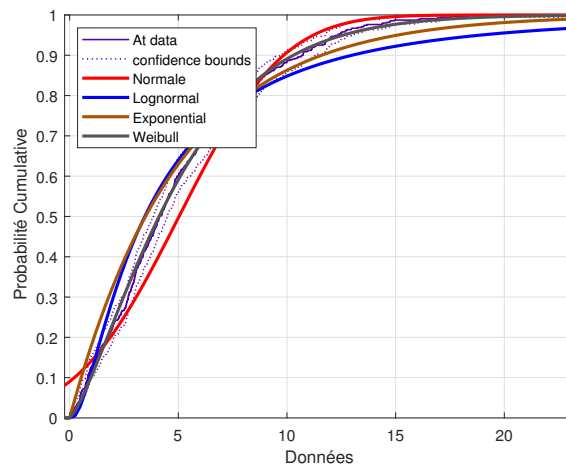


FIGURE 3.18 – Représentation des courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts.

Distribution	moyenne	Ecart type	N-log MLE
Normal	0.160519	0.11366	-1502.52
Lognormal	0.0441231	0.0312425	-1474.47
Exponentielle	0.21503	-	-1433.66
Weibull	0.186559	0.0444858	-1405.92

TABLE 3.5 – Paramètres des distributions de probabilité de la puissance par les Doigts.

maximaux se produisent dans les connexions en visibilité directe LOS. Compte tenu de la petite longueur d'onde de fonctionnement, l'obstruction de la LOS entraîne des pertes de puissance importantes, ce qui a un impact sévère sur le débit réalisable de chaque utilisateur [23].

Cette étude présente des résultats empiriques permettant de paramétrer un blocage typiques à petite échelle causés par les doigts d'une main humaine lorsqu'ils sont en train de bloquer la ligne de vision LOS. Nos résultats montrent que le blocage peut atteindre -4.9316 dB en moyenne. De plus, des salves de blocage sont courantes, qui durent jusqu'à 547 ms. Dans nos mesures, les événements de blocage se

sont produits seulement lorsqu'on bouge les doigts de la main pour traverser la voie d'accès, ce qui signifie que le blocage des signaux reçus ou diffusés était négligeable du point de vue du bilan de liaison. Les séquences de blocage qui durent jusqu'à quelques secondes (comme ceux observés dans ce mémoire) modifient considérablement le taux de transfert de données dans les réseaux sans fil. La durée des fondus calculés était de 547 ms pour le blocage des doigts de la main humaine bloquent la voie d'accès de façon aléatoire. Nous avons également observé que, pour la géométrie testée, le fait d'avoir une série des événements de blocage ne modifie pas de manière significative les CDF des fondus maximums. Aussi, cette étude apporte l'atténuation maximale, la moyenne et la variance des événements de blocage, applicables à la conception des services sans fil à haut débit. Donc, nous présentons une approche stochastique théorique montrant que les variations de la puissance reçue peuvent suivre un modèle statistique lorsqu'elles sont considérées dans les intervalles de temps de processus de blocage similaires. Nous montrons que notre modèle se compare bien aux données expérimentales.

Nous avons montré que les fluctuations de la puissance reçue provenant du processus de blocage sont correctement modélisées par une distribution de Weibull. Un tel résultat est également compatible avec une analyse statistique théorique basée sur un modèle additif.

Les distributions statistiques des paramètres de canal présentées seront utiles pour calibrer ou valider les simulateurs de canaux, pour calculer les pénalités de liaison en termes de pertes de puissance, ou pour dériver l'efficacité de la couche supérieure en cas de blocage. Nous avons également conclu que le mouvement des doigts pouvait générer des fluctuations non seulement profondes mais rapides dans les liens courts (comme dans [23]).

3.4 Série d'évènement de blocage par les doigts et la paume d'une main

A l'instant $t = 4776ms$ ms, on coupe le signal par la paume et les doigt de main bougent jusqu'à l'instant $t = 5760ms$ ms. Dans ce cas, on va s'intéresser de la caractérisation de la puissance. La Figure 3.19 représente la variation de puissance de l'évènement SEB par les doigts et la paume de main définit dans l'intervalle de temps suivant : $[4776 : 5760] ms$ avec une moyenne de $-11.9976dB$, une variance de $45.7310dB$ et une valeur maximale de $-38.7dB$.

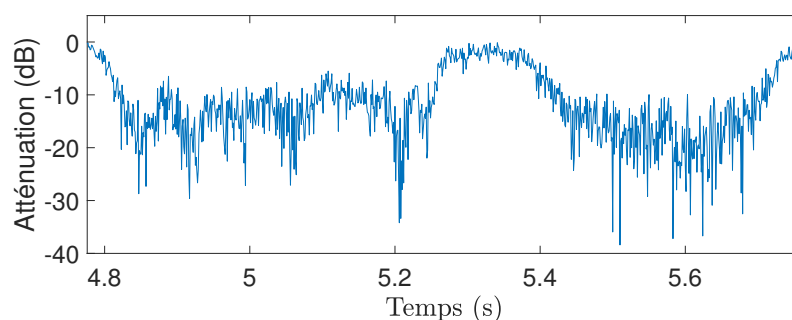


FIGURE 3.19 – Représentation de l'évènement SEB par les doigts et la paume de main en fonction de la puissance.

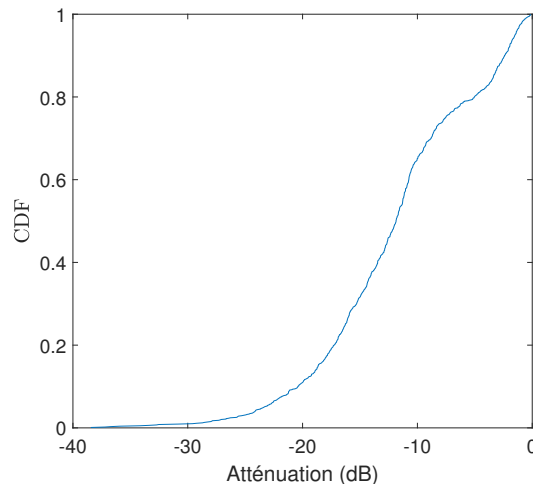


FIGURE 3.20 – Représentation des courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts.

3.4.1 Taux de changement de la puissance

La Figure 3.21 représente la variation du gradient de la puissance en fonction du temps de l'évènement SEB par les doigts avec une moyenne de $4.29 \times 10^{-4} dB/ms$, une variance de $6.0967 dB/ms$ et une valeur maximale de $10.1915 dB/ms$. De la Figure 3.21, on observe la taux de changement du gradient qui varie entre -12 et 10 dB/ms.

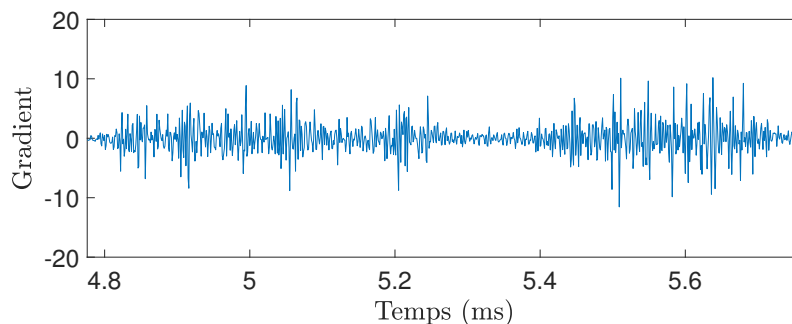


FIGURE 3.21 – Représentation de la variation temporelle du gradient pour l'évènement SEB par les doigts et la paume de main.

La Figure 3.22 montre le taux de changement de $F(t)$ la fonction de distribution cumulative CDF des durées d'évanouissement de l'évènement de blocage pour les antennes émettrice et réceptrice compris entre 0 et 1.

La Figure 3.23 représente la densité de puissance de l'évènement SEB par les doigts avec plusieurs distributions.

La Figure 3.24 représente les courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts avec plusieurs distributions.

Le tableau Tableau 3.6 représente les valeurs de la moyenne , la variance et les valeurs calculés par la méthode du maximum de vraisemblance MLE.

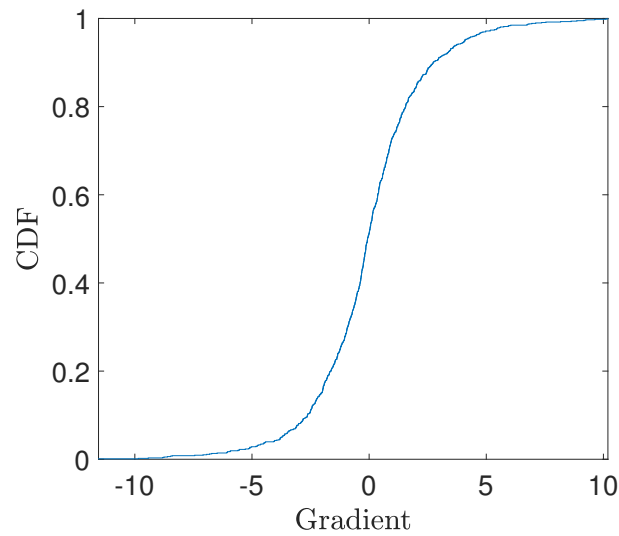


FIGURE 3.22 – Représentation des courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts et la paume de main.

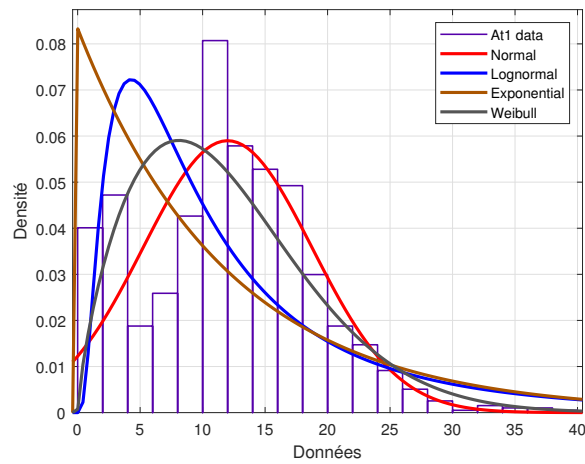


FIGURE 3.23 – Représentation de la densité de puissance de l'évènement SEB par les doigts.

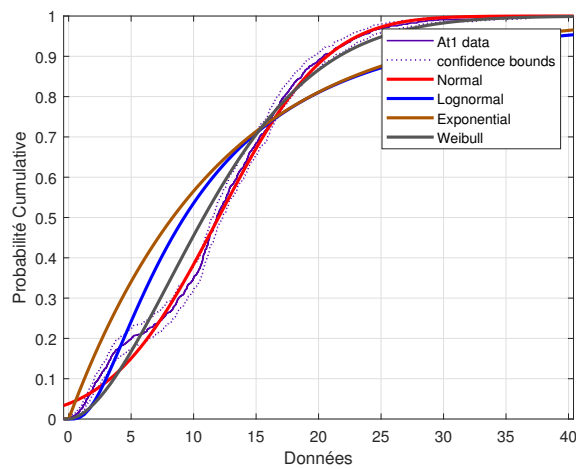


FIGURE 3.24 – Représentation des courbes CDF de l'évènement SEB par les doigts et la paume de main.

Distribution	Moyenne	Ecart type	N-log MLE
Normal	0.21547	0.152477	-3279.87
Lognormal	0.0279659	0.01979	-3459.4
Exponentielle	0.382277	-	-3432.44
Weibull	0.256782	0.0453603	-3261.39

TABLE 3.6 – Puissance par les doigts et la paume de main.

D'après le tableau Tableau 3.6, les courbes CDF représentés dans la Figure 3.24 et les courbes de densité de puissance Figure 3.23 la meilleure distribution est la distribution de **"Weibull"** de valeur calculée par la méthode de vraisemblance MLE égal à **-3261.39**

3.4.2 Analyse et discussions

Cette étude apporte des résultats empiriques qui permettent de mesurer le blocage à petite échelle causé par les doigts et la paume d'une main alors qu'elle tente de bloquer la LOS. Nos résultats montrent que le niveau moyen de blocage peut atteindre -11.9976 dB. En outre, il existe des évènements de blocage qui durent jusqu'à 984 ms.

Les événements de blocage dans les mesures ne se produisent que lorsque les doigts et la paume de la main sur le LOS, d'où le blocage des signaux reçus transmis n'était pas négligeable du point de vue de l'analyse de liaison. La durée des fondus calculés était de 984 ms pour le blocage des doigts et la paume de la main humaine bloquent la voie d'accès LOS de façon aléatoire. Nous avons démontré qu'une distribution de Weibull capture avec précision les oscillations de puissance reçues du mécanisme de blocage.

Notre campagne empirique a montré un blocage avec les doigts d'une main humaine jusqu'à -38 dB. Nous avons également conclu que le mouvement des doigts et la paume pouvait générer des fluctuations non seulement profondes mais rapides dans les liens courts (comme dans [23]).

3.5 Caractérisation fréquentielle du décalage Doppler

L'effet Doppler se manifeste lorsqu'une source émettrice est en mouvement par rapport au récepteur, plus qu'elle sera proche du récepteur, ce dernier recevra une fréquence plus aiguë est plus qu'elle s'éloigne il recevra une fréquence plus basse. L'effet Doppler peut être aussi utilisé dans la détection du mouvement, par exemple si une personne traverse une liaison en LOS, la fréquence de l'onde électromagnétique réfléchi par cette personne est supérieure à celle qui est émise par la source. On peut estimer le spectre de puissance Doppler de la réponse impulsionnelle du canal à bande étroite en calculant la transformée

de Fourier de la fonction d'autocorrélation :

$$S(v) = F_{\delta t}\{R(\delta t)\} \quad (3.1)$$

La fonction d'autocorrélation de la réponse impulsionnelle ($h(t)$) du canal complexe à bande étroite est défini par [28] :

$$R(\delta t) = \frac{E[h(t)^* \cdot h(t + \delta t)]}{\sqrt{Var[h(t)]Var[h(t)]}} \quad (3.2)$$

Le spectrogramme de la réponse impulsionnelle du canal est présenté dans la Figure 3.25. D'après les

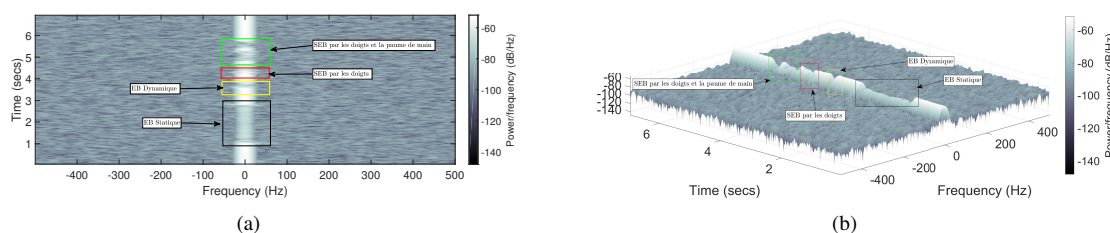


FIGURE 3.25 – Spectrogramme de la réponse impulsionnelle mesurée du canal : (a) Vue horizontale . (b) Vue verticale .

spectrogrammes nous avons pu extraire les fréquences maximales de Doppler au début et à la fin de chaque événement EB statique et dynamique et SEB. Le Tableau 3.7 résume cette caractérisation.

L'évènement	Effet Doppler au début de l'évènement (Hz)	Effet Doppler à la fin de l'évènement (Hz)
EB statique	11.36	15.38
EB dynamique	8.10	8.81
SEB par les doigts	11.23	11.71
SEB par les doigts et la paume de la main	16.60	13.18

TABLE 3.7 – Caractérisation du blocage par effet Doppler.

3.5.1 Évènement EB statique

L'évènement EB statique est spécifié par le rectangle noir de la Figure 3.26(a), nous avons obtenu pour cet évènement une fréquence Doppler de l'ordre de quelque dizaine de Hertz au début et à la fin de l'évènement qui marquent l'effet Doppler. Nous pouvons remarquer que l'effet Doppler est plus aigu à la fin de l'évènement par rapport au début. Nous pouvons dire que l'effet Doppler apparu est suite à la chute de puissance qui est accompagnée d'une augmentation de fréquence dû à la présence des ondes réfléchissantes du passage de la main entre l'émetteur et le récepteur.

3.5.2 Évènement dynamique

l'évènement EB dynamique est spécifié par le rectangle jaune sur la Figure 3.26, nous avons obtenu pour cet évènement une fréquence Doppler de l'ordre de quelque dizaine de Hertz au début et à la fin de l'évènement qui marquent l'effet Doppler. Nous pouvons dire que l'effet Doppler résulte de la chute de puissance qui est accompagnée d'une augmentation de fréquence dû à la présence des ondes réfléchissantes du passage de la main entre l'émetteur et le récepteur.

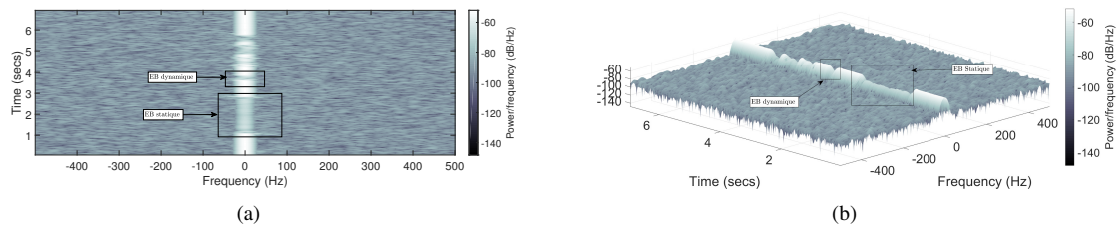


FIGURE 3.26 – Spectrogramme des évènements EB statique et EB dynamique : (a) Vue fréquentielle dans un plan 2D . (b) Vue fréquentielle dans un plan 3D.

3.5.3 Évènement SEB

Les résultats montrent qu'une fréquence Doppler maximale est observée de l'ordre de quelque dizaine de Hertz pour le blocage de la main par les doigts et le blocage par les doigts et la paume de la main. Seulement dans la zone de blocage SEB, la fréquence change légèrement à des valeurs de quelques dizaine Hz. Ce comportement est causé par le changement de longueur de la diffraction des rayons durant une activité du blocage par les doigts et la paume de main. Le décalage Doppler diminue avec le temps.

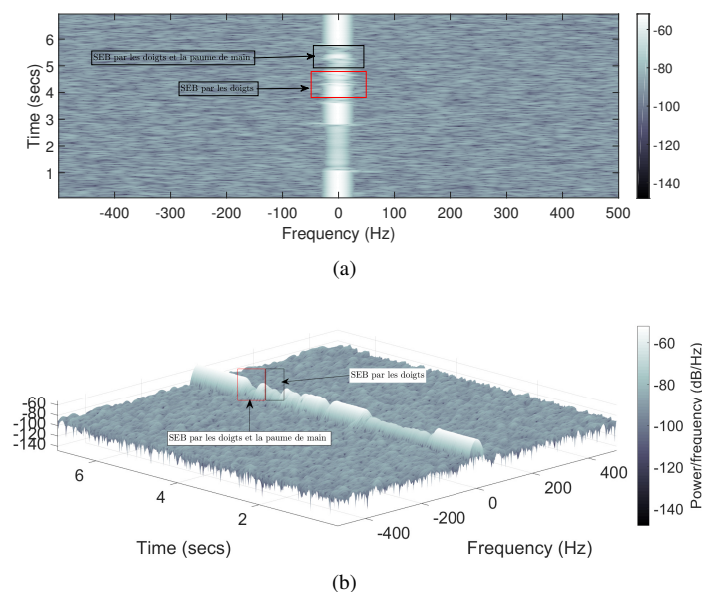


FIGURE 3.27 – Spectrogramme de l'évènement SEB : (a) Vue fréquentielle dans un plan 2D SEB, (b) Vue fréquentielle dans un plan 3D.

À partir des résultats obtenus, nous remarquons que l'effet Doppler est de l'ordre de quelques dizaine

de Hertz pour tout les évènements. Ces résultats sont similaires aux résultats obtenus dans [28].

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la représentation des résultats de caractérisation. Nous avons simulé et comparé plusieurs évènements causés du blocage de la main humaine. D'abord nous avons caractériser la variation temporelle pour les évènements EB statique et dynamique. Ensuite nous avons effectuer un analyse sur les courbes CDF pour caractériser les distributions les plus appropriées à chaque évènement dont nous avons trouvé que la distribution gaussienne lognormal est la plus appropriée à l'évènement EB statique, et la distribution Weibull pour les évènements EB dynamique et SEB. Enfin nous avons clôturé ce chapitre par une analyse de l'effet Doppler.

Conclusion Générale

Suite à la croissance du besoin des réseaux de télécommunications à une large bande passante et un débit de transmission plus important, les bandes millimétriques mmWave ont apparues comme un outil potentiel pour répondre à ces besoins grâce à leurs débits très élevés, leurs largeurs de bande et les faibles interférences avec les autres réseaux de communication sans fil. L'exploitation des bandes millimétriques mmWave a favorisé l'émergence de multiples systèmes pour les communications sans fil à courte portée, ainsi que pour le développement de nouvelles générations des réseaux de communication mobile (5G et 6G). Néanmoins, ces bandes en particulier la bande de 60 GHz est sujette à de très fortes atténuations de trajets dû à plusieurs paramètres. De nombreux outils sont utilisés comme les calculs théoriques et mathématiques de mesure qui traitent les événements EB où nous avons fait une caractérisation de la variation temporelle t_{decay} et t_{rise} , une caractérisation de puissance et une évaluation de l'effet Doppler.

Dans cette étude, des mesures sont effectuées afin d'étudier la caractérisation de l'obstruction sur les liaisons radio à ondes millimétriques alors que les liaisons sont bloquées par un mouvement d'une main humaine. Les mesures sont prises à une fréquence de 60 GHz ce qui implique que les liaisons mmWave ne pénètrent pas la peau humaine. Notre approche est basée sur des mesures de propagation de l'activité d'une main humaine interceptant la ligne de vision LOS. La caractérisation de ce blocage est l'une des solutions pour limiter l'apparition des atténuations dans les futurs systèmes, donc nous avons effectué un traitement sur un signal de puissance reçu pour caractériser un blocage engendré par la main humaine. Afin de caractériser le blocage. On a d'abord mis en place une méthodologie d'évaluation. Par la suite, nous étendrons nos résultats d'évaluation pour inclure les effets Doppler du blocage d'une main en mouvement dynamique.

Comme la communication 5G peut utiliser des bandes d'ondes millimétriques, il est nécessaire d'évaluer les liens intérieurs de courte portée d'un point de vue de blocage de lien. Le modèle DKED s'est avéré être une approche idéale pour prédire l'atténuation causée par le blocage de la main humaine. Par conséquent, les résultats obtenus dans cette étude fourniront certainement une perception pour la modélisation des personnes bloquant les liens dans les futurs systèmes 5G et 6G.

Les travaux futurs contiendront des événements plus complexes qui peuvent être intégrés aux modèles statistiques des canaux sans fil avec différentes bandes de fréquences. La technologie de formation de

faisceaux par intégration de l'approche de partage de canaux pourrait fournir un futur travail de recherche avancé pour la conception d'un système de communication sans fil.

Bibliographie

- [1] K. Mabrouk, *Conception et réalisation d'un système de Télécommunications MIMO avec Formation Numérique de Faisceaux en réception; Calibrage aveugle du Démodulateur triphasé Zéro-IF et comparaison au démodulateur classique à 2 voies I et Q*. PhD thesis, Télécom ParisTech, 2008.
- [2] P. Series, "Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems," *Recommendation ITU-R*, pp. 618–12, 2015.
- [3] N. Jeannin, "La propagation dans la troposphère pour les systèmes spatiaux de télécommunications à très haut débit en bandes ka et Q/V," *La Revue de l'électricité et de l'électronique*, vol. 2016, pp. pages–6, 2016.
- [4] J. Kim, G. Noh, T. Kim, H. Chung, and I. Kim, "Link-level performance evaluation of mmwave 5g nr sidelink communications," in *2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pp. 1482–1485, IEEE, 2021.
- [5] M. Hirzallah, M. Krunz, B. Kecicioglu, and B. Hamzeh, "5g new radio unlicensed : Challenges and evaluation," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 7, no. 3, pp. 689–701, 2020.
- [6] D. Ben Arbia, M. M. Alam, Y. Le Moullec, and E. Ben Hamida, "Communication challenges in on-body and body-to-body wearable wireless networks—a connectivity perspective," *Technologies*, vol. 5, no. 3, p. 43, 2017.
- [7] M. Zhadobov, N. Chahat, R. Sauleau, C. Le Quement, and Y. Le Drean, "Millimeter-wave interactions with the human body : state of knowledge and recent advances," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 237–247, 2011.
- [8] S. A. M. Tariq, *Characterization and modelling of scattered wireless channel at 60 GHz in an underground mine gallery*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), 2016.
- [9] R. H. A. Z. D. M. A. P. A. M. A. H. A. B. D. M. U. V. K. H. A. S. C. S. T. S. R. G. R. M. J. Y. X. S. S. Andreas F. Molisch, Camillo Gentile, *5G mmWave Channel Model Alliance – Modeling Approaches for mmWave*. 2018.

- [10] G. R. MacCartney, T. S. Rappaport, and S. Rangan, "Rapid fading due to human blockage in pedestrian crowds at 5g millimeter-wave frequencies," in *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*, pp. 1–7, IEEE, 2017.
- [11] K. Chandra, R. V. Prasad, I. G. Niemegeers, and A. R. Biswas, "Adaptive beamwidth selection for contention based access periods in millimeter wave wlans," in *2014 IEEE 11th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pp. 458–464, IEEE, 2014.
- [12] C. Leduc, *Réseaux corporels sans fil en ondes millimétriques : antenne, propagation et interaction avec le corps*. PhD thesis, Université Rennes 1, 2015.
- [13] P. S. Hall and Y. Hao, *Antennas and propagation for body-centric wireless communications*. Artech house, 2012.
- [14] H. R. Raad, A. I. Abbosh, H. M. Al-Rizzo, and D. G. Rucker, "Flexible and compact amc based antenna for telemedicine applications," *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 61, no. 2, pp. 524–531, 2012.
- [15] S. M. S. Razafimahatratra, *Contribution au dimensionnement d'une liaison radio sur le corps humain : étude canal et antenne à 60 GHz*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI; Université libre de Bruxelles . . . , 2017.
- [16] A. P. Garcia, W. Kotterman, U. Trautwein, D. Brückner, J. Kunisch, and R. S. Thomä, "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.
- [17] S. Collonge, G. Zaharia, and G. Zein, "Influence of the human activity on wide-band characteristics of the 60 ghz indoor radio channel," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 6, pp. 2396–2406, 2004.
- [18] C. Gustafson and F. Tufvesson, "Characterization of 60 ghz shadowing by human bodies and simple phantoms," in *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 473–477, IEEE, 2012.
- [19] M. Jacob, S. Priebe, T. Kürner, M. Peter, M. Wisotzki, R. Felbecker, and W. Keusgen, "Fundamental analyses of 60 ghz human blockage," in *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 117–121, IEEE, 2013.
- [20] P. Karadimas, B. Allen, and P. Smith, "Human body shadowing characterization for 60-ghz indoor short-range wireless links," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1650–1653, 2013.

- [21] M. Heino, C. Icheln, and K. Haneda, "Finger effect on 60 ghz user device antennas," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, IEEE, 2016.
- [22] A. Angles-Vazquez, E. Carreno, and L. S. Ahumada, "Modeling the effect of pedestrian traffic in 60-ghz wireless links," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1927–1931, 2017.
- [23] L. A. Fierro, E. C. Maggi, A. A. Vazquez, and D. Schkolnik, "Empirical results for human-induced shadowing events for indoor 60 ghz wireless links," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44522–44533, 2020.
- [24] M. El Hajj, G. Zaharia, G. El Zein, H. Farhal, and S. Sadek, "Measurements of a dynamic 60 ghz radio channel in an open-space office," in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, IEEE, 2020.
- [25] M. Riobó, M. G. Sanchez, I. Cuiñas, I. Exposito, J. Verhaevert, and R. Hofman, "Mitigating people blockage by angular diversity at millimeter wave 5g bands," in *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, pp. 1237–1238, IEEE, 2020.
- [26] A. Bhardwaj, D. Caudill, C. Gentile, J. Chuang, J. Senic, and D. G. Michelson, "Geometrical-empirical channel propagation model for human presence at 60 ghz," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 38467–38478, 2021.
- [27] M. Z. Zaaimia, L. Talbi, and M. Nedil, "Enabling mmwave wireless rack area networks : Channel characterization within a server rack," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 8, pp. 1527–1531, 2022.
- [28] C.-L. Cheng, S. Sangodoyin, and A. Zajić, "Terahertz mimo fading analysis and doppler modeling in a data center environment," in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, IEEE, 2020.

Résumé

Les progrès technologiques réalisés ces dernières années dans les bandes d'ondes millimétriques ont favorisé l'émergence de nombreux systèmes de communication sans fil à courte portée. La bande 60GHz sans licence a la capacité de supporter des communications sans fil. Les bandes millimétriques sont très intéressantes pour les communications sans fil en raison de leur grande largeur de bande.

Cependant, les liaisons en bande millimétriques sont soumises à plusieurs facteurs d'atténuation qui entraînent des pertes de puissance importantes, ce qui affecte sévèrement les taux de transmission. L'obstruction des liaisons millimétrique par le corps humain est l'un des facteurs les plus connus, c'est pourquoi plusieurs études ont porté sur ce facteur. Ce mémoire de master présente une étude du blocage induit par une main humaine nue à 60 GHz. La caractérisation de la propagation est effectuée afin de caractériser les effets induits par le blocage de la main en termes de puissance, de temps et de fréquence.

Des mesures de blocage statique et mobile de la main ont été effectuées à l'aide d'un sondeur de canal basé sur un VNA avec une résolution temporelle de 1 ms pour caractériser la profondeur d'évanouissement du blocage de la main, les taux d'évanouissement et le décalage de fréquence. Les résultats obtenus ont montré dans la plupart des cas que l'atténuation induite par l'obstruction peut atteindre jusqu'à -30 dB, suggérant l'indisponibilité de la liaison. Le décalage Doppler au début et à la fin des événements de blocage est de l'ordre de dizaines de Hertz. Les résultats rapportés dans ce travail sont précieux pour la conception au niveau système et au niveau liaison des systèmes radio 5G et 6G de prochaine génération.

Mots-clés : Bandes millimétriques, communication sans fil, obstruction, 60 GHz, 5G, 6G.

Abstract

Technological advances in millimeter wave bands in recent years have fostered the emergence of many short-range wireless communication systems. The unlicensed 60GHz band has the capacity to support wireless communications. Millimeter bands are very interesting for wireless communications because of their high bandwidth.

However, millimeter band links are subject to several attenuating factors that cause significant power losses, which severely affects transmission rates.

Blocking of millimeter links by the human body is one of the most well-known factors, so several studies have focused on this factor. This master thesis presents a study of the blockage induced by a bare human hand at 60 GHz. Propagation characterization is performed to characterize the effects induced by hand blocking in terms of power, time and frequency.

Static and moving hand blocking measurements were performed using a VNA-based channel sounder with a time resolution of 1 ms to characterize hand blocking fade depth, fade rates, and frequency shift. The results obtained showed in most cases that obstruction-induced attenuation could reach up to -30 dB, suggesting link unavailability. The Doppler shift at the beginning and end of the blocking events is of the order of tens of Hertz. The results reported in this work are valuable for the system-level and link-level design of next-generation 5G and 6G radio systems.

Keywords: mmWave, wireless communication, obstruction, 60 GHz, 5G, 6G.

ملخص

عزز التقدم التكنولوجي في نطاقات الموجات المليمترية في السنوات الأخيرة ظهور العديد من أنظمة الاتصالات اللاسلكية قصيرة المدى. النطاق 60 GHz غير المرخص لديه القدرة على دعم الاتصالات اللاسلكية. تعتبر نطاقات المليمتر مثيرة جداً للاتصالات اللاسلكية بسبب عرض النطاق الترددي العالي. ومع ذلك، تخضع روابط النطاق المليمترى للعديد من العوامل المخففة التي تسبب خسائر كبيرة في الطاقة.

يعد حجب روابط المليمتر من قبل جسم الإنسان أحد أكثر العوامل المعروفة، لذلك ركزت العديد من الدراسات على هذا العامل. تقدم هذه الرسالة دراسة للانسداد الناجم عن يد بشرية عارية عند 60 جيجاهرتز. يتم إجراء توصيف الانتشار لتوصيف التأثيرات الناتجة عن حجب اليد من حيث الطاقة والوقت والتردد.

تم إجراء قياسات حجب اليد الثابتة والمتحركة باستخدام مسند قناة قائم على VNA بدقة زمنية قدرها 1 مللي ثانية لتوصيف عمق تلاشي حجب اليد ومعدلات التلاشي وتحول التردد. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها في معظم الحالات أن التوهين الناجم عن الانسداد يمكن أن يصل إلى -30 dB، مشيراً إلى عدم توفر الرابط. تحول دوبلر في بداية ونهاية أحداث الحظر هو من ترتيب عشرات هيرتز. النتائج المبلغ عنها في هذا العمل ذات قيمة للتصاميم على مستوى النظام ومستوى الارتباط لأنظمة الراديو من الجيل الخامس والسادس.

الكلمات المفتاحية: الموجات المليمترية، الاتصالات اللاسلكية، إعاقة، 60 جيجاهرتز، الجيل الخامس والسادس.