



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Télécommunication
Réseaux et Télécommunication

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Maaz Lina et Rahal Elmazia

Le :04 juin 2025

Étude des effets liés aux paramètres de blocage humain sur les ondes millimétriques pour la 5G

Jury :

Dr Boukredine Salah Eddine	MAA	Université de Biskra	Président
Dr Hamaizia Zahra	Pr	Université de Biskra	Examineur
Dr Abdesselam Salim	MCB	Université de Biskra	Encadrant

Année universitaire : 2024-2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Télécommunication
Réseaux et Télécommunication

Réf. : Entrez la référence du document

Étude des effets liés aux paramètres de blocage humain sur les ondes millimétriques pour la 5G

Le : 04 juin 2025

Présenté par :

-Maaz Lina

-Rahal Elmazia

Avis favorable de l'encadreur :

-Dr Abdesselam Salim

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail
À mon cher père,
Pour tous les sacrifices que tu as faits, Pour chaque moment passé à m'apprendre,
Je te dédie ces mots, En reconnaissance de ta force et de ta sagesse. Tu es mon modèle, mon
guide, Celui qui m'inspire à être meilleur chaque jour.
Merci d'être toujours là, Avec ta voix rassurante et ton soutien indéfectible. Je t'aime
profondément, plus que les mots peuvent l'exprimer. Pour toi, je ferai toujours de mon mieux,
Avec tout mon respect et mon amour.
À ma très chère maman,
À mon espoir, à la prunelle de mes yeux et au secret de mon succès Tu m'as comblé avec ta
tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu as
Toujours été présente à mes côtés.
À mes sœurs,
SOUHAD ; Aya ; IMANE
À mon binôme,
ELMAZIA RAHAL. **MAAZ LINA***

*Je dédie ce modeste travail
À mon cher père,
La source de mon inspiration, la personne qui a su m'inculquer la bonne éducation, le
Sens de la responsabilité, la forte personnalité, l'optimisme et la confiance en soi face Aux
difficultés de la vie.
À ma très chère maman,
Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu as
Toujours été présente à mes cotes.
À mes sœurs,
Souhila, Hadjer, Aya, Chaima, Nada, Roufida et mon frère Abd Alfatah.
À mon binôme,
Maaz LINA
ELMAZIA RAHAL.*

Remerciements

Nous remercions Allah, le Tout-Puissant, pour la santé, le courage et la force qu'il nous a donnés pour mener ce travail à bien jusqu'à la fin.

À l'issue de ce travail, nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant, Dr. Abdesselam Salim, pour sa compréhension et ses conseils, ainsi que pour sa confiance. Nous lui exprimons tout particulièrement notre immense gratitude pour nous avoir permis de bénéficier de ses compétences scientifiques, de ses qualités humaines et de sa disponibilité constante. Son soutien dans les moments difficiles et ses encouragements, ainsi que le temps et les connaissances qu'il nous a offerts, ont été précieux. Il a suivi et encouragé de nombreuses corrections jusqu'à l'achèvement de ce travail. Nous espérons que vous trouverez ici l'expression de notre gratitude.

Nous remercions les membres du jury qui ont eu l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail. Nous remercions également tous les enseignants du département de génie électrique. Nous remercions les membres de jury Hamaizia zahra comme président et Boukredine salah eddine comme Examineur.

Enfin, nous remercions toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Résumé :

Le réseau cellulaire de cinquième génération (5G) représente l'avenir des communications mobiles, s'appuyant sur un grand nombre d'antennes grâce à la technologie MIMO et aux ondes millimétriques (mmWaves et sub-THZ). La bande de fréquence de 28 GHz est l'un des principaux candidats pour une utilisation dans les communications en ondes millimétriques qui seront utilisées par la 5G. Ce réseau, comme les autres, est affecté par des effets d'atténuation tels que les obstacles et les pertes qui réduisent son efficacité. De plus, le blocage humain représente un défi majeur dans les environnements 5G, car elle peut entraîner une interruption du signal et une réduction de la couverture. Ce problème est exacerbé par la largeur de faisceau (HPBW) des antennes, car les faisceaux étroits utilisés dans les systèmes MIMO rendent le réseau plus sensible aux changements dans l'environnement NLOS. Cette étude se concentre sur l'analyse des critères de cohérence spatiale dans les systèmes de communication 5G à une fréquence de 28 et 104 GHz avec des antennes MIMO 4x4, en tenant compte des environnements LOS (ligne de vue) et NLOS (sans ligne de vue) dans le contexte d'un scénario urbain pour la ville de Chetma afin de surveiller l'impact de blocages humains. Cette étude examinera à la fois le niveau de puissance reçue et le temps de propagation absolu, en se concentrant sur l'impact de blocage humain et des caractéristiques de la largeur de faisceau (HPBW) sur les performances du réseau dans les environnements LOS et NLOS.

Mots clé : réseau 5G, MIMO, LOS, les ondes millimétriques, la fréquence 28GHz, la fréquence 104GHz, HPBW, NLOS, les ondes sub-THZ, blocage humain, vitesse, direction de mouvement, l'évanouissement de l'ombre SF, distance de corrélation.

Abstract:

The fifth-generation (5G) cellular network represents the future of mobile communications, relying on a large number of antennas to MIMO technology and millimeter waves (mmWaves and sub-THZ). The 28 GHz frequency band is one of the main candidates for use in millimeter-wave communications that will be used by 5G. This network, like others, is affected by attenuation effects: such as obstacles and losses that reduce its efficiency. In addition, human blockage represents a significant challenge in 5G environments, as it can lead to signal interruption and reduced coverage. This problem is exacerbated by the half-power beamwidth (HPBW) of the antennas, as the narrow beams used in MIMO make the network more sensitive to changes in the surrounding environment NLOS. This study focuses on the analysis of spatial consistency criteria in 5G communication systems at a frequency of 28 and 104 GHz with 4x4 MIMO antennas, taking into account LOS (line of sight) and NLOS (non-line of sight) environments in the context of an urban scenario for the city of Chetma to monitor the impact of human blockage. This study will address both the received power level and the absolute propagation time, focusing on the impact of human blockage and the characteristics of the half-power beamwidth (HPBW) on network performance in LOS and NLOS environments.

Key words: 5G network, MIMO, LOS, mmWaves, 28GHZ frequency, 104GHZ frequency, HPBW, NLOS, Sub-THZ waves, Human blockage, speed, moving direction, shadow fading, correlation distance.

الملخص :

تعتبر الشبكة الخلوية من الجيل الخامس (5G) مستقبل الاتصالات الخلوية، و التي تعتمد على عدد كبير من الهوائيات بفضل تقنية الولوج متعددة المداخل والمخارج والموجات المليمترية (mmWaves). يعد نطاق التردد 28 جيجاهرتز أحد المرشحين الرئيسيين للاستخدام في الاتصالات باستغلال الموجات المليمترية التي سيستخدمها الجيل الخامس 5G. تتأثر هذه الشبكة كغيرها، بتأثيرات التخفيف مثل العقبات والخسارة في طاقة الموجة التي تقلل من كفاءتها. بالإضافة إلى ذلك، يمثل الحجب البشري تحديًا كبيرًا في بيئات 5G، حيث يمكن أن يؤدي إلى انقطاع الإشارة أو تقليل التغطية. وتتفاقم هذه المشكلة مع عرض الحزمة النصفية (HPBW) للهوائيات، حيث أن الحزم الضيقة المستخدمة في أنظمة MIMO و التي تجعل الشبكة أكثر حساسية للتغيرات في البيئة المحيطة. تركز هذه الدراسة على تحليل معايير الاتساق المكاني في أنظمة اتصالات 5G بتردد 28 و 104 جيجاهرتز مع هوائيات MIMO 4×4، مع الأخذ في الاعتبار بيئات LOS (خط الرؤية) و NLOS (بدون خط الرؤية) في سياق سيناريو النسيج الحضري لمدينة شتمة لمراقبة تأثير الحجب البشري. سنتناول هذه الدراسة كل من مستوى الطاقة المستلمة وزمن الانتشار المطلق، مع التركيز على تأثير الحجب البشري وخصائص عرض الحزمة النصفية (HPBW) على أداء الشبكة في بيئات LOS و NLOS.

الكلمات المفتاحية : شبكة الجيل الخامس، تقنية MIMO، خط الرؤية، الموجات المليمترية، تردد 28 جيجاهرتز، تردد 104 جيجاهرتز، نصف عرض الحزمة، بدون خط الرؤية، موجات دون التيراهيرتز، الحجب البشري، السرعة، اتجاه الحركة، تلاشي الظل، مسافة الارتباط.

Sommaire

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	I
Sommaire	II
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VII
Liste des abréviations	IX
Introduction générale	
Chapitre I : Notions sur le réseau 5G	
I.1 Introduction	4
I.2 Objectifs de la 5G	4
I.3 Architecture du réseau 5G	5
I.3.1 Le mobile UE (User Équipement)	5
I.3.2 L'accès radio 5G (NG-RAN)	5
I.3.3 Réseau cœur 5G (NGCN ou 5GC)	6
I.3.4 Fréquences attribuées à la 5G	7
I.3.4.1 Les bande de fréquences 5G Sub-6	7
I.3.4.2 Les ondes millimétriques	7
I.4 Principe de réseau 5G	8
I.4.1 Les ondes millimétriques	8
I.4.2 Les Micros-Celles	8
I.4.3 MIMO Massif	9
I.4.4 Formation de faisceau (Beamforming)	9
I.4.5 Duplex integral (Full-Duplex)	9
I.4.6 Techniques d'accès multiple	10
I.4.6.1 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	10
I.4.6.2 FBMC (Filter-Bank Multi-Carrier)	10
I.4.6.3 UPMC (Universal Filtered Multi-Carrier)	10
I.5 Spectre pour la 5G	11
I.6 Les avantages et les inconvénients de réseau 5G	11
I.6.1 Les avantages	12
I.6.2 Les inconvénients	12
I.7 Nouvelles applications	12

I.8 Le 5G dans le monde	13
I.9 Conclusion	14
Chapitre II : Les ondes millimétriques et l'effet du blocage humain	
II.1 Introduction	16
II.2 Les ondes millimétriques dans le contexte de la 5G	16
II.2.1 Le potentiel des ondes millimétriques	17
II.2.2 Caractéristiques des communications à ondes millimétriques	17
II.2.2.1 Pertes en espace libre	17
II.2.2.2 Atténuation atmosphérique	18
II.2.2.3 Mécanismes de propagation	19
II. 2.3 Défis liés à l'utilisation d'ondes millimétriques	19
II. 2.4 Les applications des ondes millimétriques	20
II. 2.4.1 La conception des petites cellules avec la 5G	20
II.2.4.2 Communication par satellite	20
II.2.4.3 WiGig (Wireless Gigabit)	20
II.2.4.4 La bande V	20
II. 2.5 Bandes millimétriques (mmWave)	21
II.2.6 Caractéristique des fréquences millimétriques	21
II.2.7 Les avantages des ondes millimétriques	22
II.2.8 Les inconvénients des ondes millimétriques	22
II.2.8.1 Portée limitée	22
II.2.8.2 Ligne de visée (LOS)	23
II.3 Bande Sub-TéraHertz (Sub-THZ)	23
II.3.1 Bande THZ dans le spectre électromagnétique	23
II.3.2 Caractérisation des ondes Sub-THZ	24
II.3.3 Les antennes THZ	25
II.4 Sensibilité au blocage	25
II.5 Catégorisation des bloqueurs	26
II.5.1 Scénario l'auto-blocage	26
II.5.2 Scénario non auto-blocage	27
II.6 Modélisation du blocage dynamique	27
II.6.1 Modèles de blocage 3GPP	27
II.6.1.1 Modèle A de la 3GPP	28
II.6.1.2 Modèle B de la 3GPP	29

II.6.2 L'atténuation de blocage	29
II.7 Étude des profils puissance-retard (PDP) avec et sans blocage humain	30
II.8 Modélisation de blocage quatre états	31
II.9 Conclusion	34
Chapitre III : Simulation de l'effet blocage humain sur le réseau 5G	
III.1 Introduction.	36
III.2 Étude de la nature du climat dans la ville de Chetma.	36
III.2.1 Aperçu général.	36
III.2.2 Climat et météorologie.	37
III.2.2.1 Températures.	37
III.2.2.2 Précipitations.	38
III.2.2.3 Humidité.	39
III.2.2.4 La Pression atmosphérique.	40
III.3 Présentation de simulation NYUSIM v4.0.	41
III.3.1 Introduction sur le simulateur	41
III.3.2 Paramètres d'entrées	42
III.3.2.1 Les paramètres de canal	42
III.3.2.2 Propriétés d'antennes	44
III.3.2.3 Cohérence Spatiale	46
III.3.2.4 Blocage humain	47
III.4 Les applications de NYUSIM pour l'analyse de système MIMO à ondes millimétriques	48
III.4.1 Modèle de perte du trajet de chemin à grande échelle (LSP)	48
III.4.2 Modèle de perte de chemin à petite échelle (SSP)	49
III.4.3 Profil de retard de puissance (PDP)	49
III.5 Étude du système MIMO dans des environnements NLOS/LOS à Chetma.	50
III.6 Environnement de simulation des résultats	50
III.7 Évaluation des performances de système MIMO dans les canaux LOS/NLOS à 28/104 GHz	52
III.7.1 Carte d'intensité d'évanouissement de l'ombre spatialement corrélé (dB)	52
III.7.2 Carte des conditions LOS/NLOS	53
III.7.3 Carte de trajectoire de l'UT	54
III.7.4 Profil de retard de puissance OPDP et DPDP pour le système LOS à 28 GHz	55
III.7.5 Cas de 104 GHz	56

III.8 Étude des performances des antennes MIMO avec différentes orientations (Az, Éla)	59
III.9 Résultats et analyse du modèle de blocage à quatre états	61
III.10 Étude et comparaison des canaux MIMO à 28, 73 et 104 GHZ à l'aide du simulateur de canal NYUSIM	64
III.10.1 Étude de l'environnement urbain	64
III.10.2 Analyse de l'effet de blocage humain dans les canaux mmWave	64
III.10.3 Comparaison entre DPDP et OPDP	65
III.11 Conclusion	65
Conclusion générale	67
Bibliographie	70

Liste des figures

Figure I.1: Accès radio 5G (NG-RAN).	6
Figure I.2: Architecture d'un réseau 5G.	7
Figure I.3: Spectre des bandes d'ondes millimétriques dans la 5G.	8
Figure I.4: Différentes configurations des antennes multiples.	9
Figure I.5: Le spectre de 5G. Différentes Techniques d'accès multiple.	10
Figure I.6: Le spectre de 5G.	11
Figure I.7: Applications de réseau 5G.	13
Figure I.8: Le classement de la 5G dans le monde.	14
Figure II.1: Spectre électromagnétique.	16
Figure II.2: Atténuation spécifique de O ₂ et H ₂ O en fonction de la fréquence.	18
Figure II.3: Illustration des divers mécanismes de propagation.	19
Figure II.4: Utilisation du spectre dans les bandes d'ondes millimétriques.	21
Figure II.5: Plage de trou THZ de Spectre électromagnétique.	24
Figure II.6: Blocage humain entre un émetteur et le récepteur.	26
Figure II.7: Illustration du scénario auto-blocage.	26
Figure II.8: Illustration du scénario non-auto-blocage.	27
Figure II.9: Principe de blocage du modèle A 3GPP.	28
Figure II.10: Bloqueur représenté par un écran.	29
Figure II.11: Atténuation du signal due au blocage humain.	30
Figure II.12: PDP relatif avec et sans blocage humain.	30
Figure II.13: PDP relatif avec blocage et l'antenne T_x déviée de 30°.	31
Figure II.14: Événement d'ombrage à quatre états avec un seuil de SE_{mean} .	32
Figure II.15: Régions de l'événement d'ombrage à quatre états.	33
Figure II.16: Modèle de Markov à quatre états.	33
Figure III.1: Carte de la zone à étudier (ville de Chetma).	37
Figure III.2: Interface utilisateur graphique (GUI) du simulateur de NYUSIM 4.0.	42
Figure III.3: Interface des paramètres de canal.	44
Figure III.4: Interface propriétés des antennes.	46
Figure III.5: Interface de cohérence spatiale.	47

Figure III.6: Interface de blocage humain.	48
Figure III.7: Carte spatialement corrélée du SF pour la fréquence 28 GHZ.	53
Figure III.8: Carte de condition LOS/NLOS corrélée pour la fréquence 28GHZ.	54
Figure III.9: Carte de trajectoire de l'UT (T-R 100m, 28GHz, UMi, LOS).	54
Figure III.10: PDP Omnidirectionnel (T-R 100m, 28GHz, UMi, LOS).	55
Figure III.11: PDP directionnel (T-R 100m, 28GHz, UMi, LOS).	56
Figure III.12: Carte de spatialement corrélé du SF pour la fréquence 104 GHZ.	56
Figure III.13: Carte des conditions LOS/NLOS à 104GHz.	57
Figure III.14: Carte de trajectoire de l'UT (T-R 100m, 104GHz, UMi, LOS).	58
Figure III.15 : PDP omnidirectionnel (T-R 100m, 104GHz, UMi, LOS).	58
Figure III.16 : PDP directionnel (T-R 100m, 104GHz, UMi, LOS).	59
Figure III.17 : La relation entre l'atténuation moyenne de blocage et l'HPBW.	62
Figure III.18 : Évaluation du T_D selon les HPBW.	62

Liste des tableaux

Tableau II.1: Les bandes sub-THZ.	23
Tableau III.1: Températures en [°C] (statistiques 2013-2022).	37
Tableau III.2: Précipitations [mm/j] (statistiques 2013-2022).	39
Tableau III.3: Humidité en [%] (statistiques 2013-2022).	39
Tableau III.4: La pression atmosphérique en [KPa] (statistiques 2013-2022).	40
Tableau III.5: Valeurs fixées pour les paramètres de canal.	51
Tableau III.6: Valeurs fixés pour les propriétés des antennes TX/RX.	51
Tableau III.7: Valeurs des paramètres de cohérence spatiale.	52
Tableau III.8: Valeurs des paramètres de blocage humain.	52
Tableau III.9: Résultats de σ_{SF} suivant l'angle d'ouverture et l'environnement LOS/NLOS.	59
Tableau III.10: PR et TPA dans les cas DPDP et OPDP.	60
Tableau III.11: Taux λ du modèle de Markov à quatre états.	63

Liste des Abréviations

3GPP	3rd Generation Partnership Project
2G/3G/4G	Second, Third, and Fourth Generations
5G	Cinquième Génération
6G	Sixth Generation
5G Sub-6	5G Below 6 GHz
5GC	5G Core
5G SA	5G Standalone
5G NSA	5G non-Standalone
BS	Base Station
BER	Bit Error Rate
CDF	Cumulative Distribution Function
CI	Close-In
CIR	Channel Impulse Responses
CMT	Concurrent Modulation Technique
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DPDP	Directionnel Power Delay Profile
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DN	Data Network
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
EESS	Earth Exploration Satellite Service
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
FBMC	Filtered Bank Multi-Carrier
FMT	Frequency Multiple Technique
GUI	Graphic User Interface
GSM	Global System for Mobile Communications
Gnb	next Generation Node Base Station
gNB-CU-UP	gNB Central Unit User Plane
gNB-CU-CP	gNB Central Unit Control Plane

gNB-DU	gNB Distributed Unit
gNB-CU	gNB Central Unit
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HDTV	High-Definition Television
HD	High Definition
HPBW	Half Power Beam Width
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT	International Mobile Télécommunications
IoT	Internet of Things
ISI	Interférence Inter Symbole
ITU	International Télécommunication Union
IP	Internet Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
InH	Indoor Environment
LTE	Long Term Evolution
LOS	Line of Sight
LSP	large-Scale Parameter
mmWave	Millimeter Waves
MISO	Multiple Input Single Output
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MPC	Multipath Channel Parameters
NGMN	Next Generation Mobile Networks
NYUSIM	Universal Subscriber Identity Module Simulator
NTT	Nippon Telegraph and Telephone Corporation
NSF	Network Service Framework
NF	Network Function
ng-eNB	Next Generation Evolved Node B
ngNB	Next Generation Node B
NAS	Non-Access Stratum
NLOS	Non-Line of Sight
NR	New Radio
NG-RAN	Next Generation Radio Access Network

NGCN	Next Generation Core Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
O2I	Outdoor to Indoor
OPDP	Omnidirectional Power Delay Profile
P2P	Peer to Peer
PL	Path Loss
PDP	Power Delay Profile
PR	Puissances reçue
RAN	Radio Access Networks
RF	Radio Frequency
RAS	Radio Services for Special Purposes
RMa	Rural Macro Environment
SISO	Single Input Single Output
SIMO	Single Input Multiple Output
SMT	Spatial Modulation Technique
SUPI	Subscription Permanent Identifier
SF	Shadow Fading
S/B	Signal /Bruit
SSP	Small-scale Parameters
SMF	Session Management Function
UMi	Urban Micro Environment
UDN	User Density Network
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UFMC	Universal Filtered Multi-Carrier
UHF	Ultra High Frequencies
UHDV	Ultra High-Definition Video
UPF	User Plane Function
UT	User Terminal
UE	User Equipment
USIM	Universal Subscriber Identity Module
URA	Uniform Random Array
ULA	Uniform Linear Array
UMa	Urban Macro Environment
Wi Gig	Wireless Gigabit Technology
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WRC	World Radiocommunication Conference

Introduction générale

Introduction générale

L'évolution rapide des technologies de communication sans fil a ouvert la voie à de nouvelles opportunités et défis dans le domaine des réseaux mobiles de cinquième génération (5G) et au-delà. La demande croissante en matière de débits de données plus élevés, de latence réduite et de capacité accrue a conduit à l'exploration de nouvelles bandes de fréquences, notamment les ondes millimétriques (mmWave), pour répondre à ces exigences. Dans ce contexte, les systèmes MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output), qui exploitent un grand nombre d'antennes à la fois au niveau des stations de base et des terminaux utilisateur, ont émergé comme une technologie clé pour la réalisation des objectifs ambitieux de la 5G.

Toutefois, afin de bénéficier pleinement des avantages offerts par la 5G, il est indispensable de bien comprendre et d'optimiser les paramètres de Blocage humain dans les systèmes de communication. Cela implique une analyse approfondie de la manière dont les signaux se propagent, s'atténuent et interagissent dans divers environnements spatiaux, tels que les rues, les bâtiments et les zones à forte densité urbaine. Ce mémoire s'attache à étudier l'impact de ces paramètres en s'appuyant sur le simulateur NYUSIM.

L'objectif de ce mémoire est de comprendre les principes fondamentaux des réseaux 5G et les défis associés à leur déploiement, ainsi que d'étudier les ondes millimétriques pour les systèmes de communication 5G et leur rôle dans les antennes de système MIMO. De plus, notre étude vise à analyser les paramètres de Blocage humain dans la ville de Chetma (Wilaya de Biskra-Algérie) et leurs impacts sur les performances des systèmes de communication 5G, puis à effectuer des simulations à l'aide du simulateur NYUSIM pour évaluer ces paramètres dans divers cas de trajets linéaires dans deux environnements LOS et NLOS, à deux fréquences 28/104GHZ, en analysant plusieurs configurations d'antennes caractérisées par des largeurs de faisceau HPBW, il s'agit de présenter les résultats des simulations et de discuter des conclusions tirées. En comprenant mieux la façon dont ces paramètres affectent les performances du réseau, nous pouvons optimiser la conception et le déploiement des systèmes 5G pour offrir une connectivité plus fiable et efficace.

Ce travail est structuré en trois chapitres principaux :

D'abord, *le premier chapitre* : offre une vue d'ensemble sur les réseaux 5G, en mettant en évidence leurs caractéristiques clé, leurs applications potentielles et les défis associés à leur déploiement.

Ensuite, *le deuxième chapitre* met en lumière deux technologies clés de la 5G : le MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) et les ondes millimétriques. Il examine le rôle de ces innovations

dans l'optimisation des performances du réseau et dans la satisfaction des besoins croissants en connectivité sans fil, en plus d'analyser l'impact du blocage humain sur leur efficacité.

Enfin, *le troisième chapitre* : présente une étude approfondie des paramètres de blocage humain des systèmes de communication 5G sous les conditions météorologiques (la pluie, température, humidité, pression) et suivant plusieurs effets comme la distance de corrélation de l'évanouissement de l'ombre, la distance de corrélation des conditions LOS/NLOS, la vitesse et la distance de mouvement de l'utilisateur en analysant les résultats obtenus par simulateur NYUSIM.

Chapitre I : Notions sur les réseaux 5G

Chapitre I

Notions sur les réseaux 5G

I.1 Introduction

L'idée qui commence à se forger derrière la notion 5G est qu'elle ne se limite pas à une simple augmentation des débits, comme cela a été le cas pour les générations précédentes. Cette cinquième génération de réseaux vise à connecter tous les appareils et une multitude d'applications, offrant ainsi une connectivité omniprésente et permanente. En représentant un véritable bond vers les ondes millimétriques et une architecture innovante, la 5G permet une couverture améliorée et une gamme de fonctionnalités avancées pour résoudre divers problèmes de notre vie quotidienne moderne. Elle ne se limite pas aux besoins des opérateurs de téléphonie mobile, mais ouvre également de nouvelles perspectives pour l'avenir en favorisant la coexistence d'applications variées au sein d'une même technologie. Cela facilitera l'émergence d'une société entièrement connectée, garantissant à chacun un accès illimité à l'information et aux échanges virtuels, à tout moment et en tout lieu. Au-delà des simples appels, la 5G offre la possibilité de se connecter à tous les appareils, assurant une disponibilité continue, peu importe le moment ou le lieu.

I.2 Objectifs de la 5G

Les principaux industriels et opérateurs du secteur des communications sans fil élaborent actuellement les objectifs et standards de la cinquième génération de réseau mobile (la 5G).

Où la phase de normalisation a commencé au sein de différents consortiums d'opérateurs et d'industriels (3GPP–3rd Génération Partnership Project, NGMN–Next Génération Mobile Networks...) pour établir des réglementations depuis le début de l'année 2020.

L'objectif à atteindre concerne le débit montant et descendant alloué à chaque utilisateur afin d'assurer un accès internet haut débit depuis un smart phone ou une tablette. Dans un contexte d'utilisation en mobilité faible ou nulle, le débit visé en bord de cellule par utilisateur est supérieur à 100 Mbit/s et le débit maximum par utilisateur devra dépasser les 10 Gbit/s.

Dans le cas d'utilisation à forte mobilité (comme les communications entre véhicules), l'amélioration de l'architecture du réseau doit permettre de réduire la latence de la communication afin d'obtenir un délai de transmission inférieur à 10 ms. Pour d'autres applications de l'Internet des objets IoT (Internet of Thing), il est nécessaire d'obtenir un niveau élevé de fiabilité.

Il sera nécessaire d'apporter des changements majeurs à l'architecture du réseau et d'introduire de nouvelles technologies dans les réseaux existants 2G/3G/4G pour atteindre ces objectifs. De plus, le coût et la consommation d'énergie des éléments constituant de ce nouveau réseau et des appareils mobiles associés seront des points décisifs pour parvenir à une solution économiquement viable [1].

I.3 Architectures du réseau 5G

Un réseau 5G est composé d'un nouveau réseau d'accès radio, et d'un nouveau réseau cœur appelé NGCN ou 5GC (New Génération Core). Le réseau d'accès est composé par réseau d'accès radio NG-RAN (Next Génération Radio Access Networks), qui utilise une nouvelle interface radio NR (New Radio) ou une AN non-3GPP (Access Network non 3rd Generation Partnership Project « WIFI, XDSL...etc. ») [2].

I.3.1 Le mobile UE

Le mobile UE (User Équipement) du réseau 5G a la même définition qu'en 3G et 4G. Il est composé d'un USIM (Universal Subscriber Identity Module), qui contient l'identité de l'abonnée, les fonctions de sécurité et des données d'abonnement. L'abonné est identifié par SUPI (Subscription Permanent Identifier) qui est une extension de l'IMSI (International Mobile Subscriber Identity) de la 4G, il est aussi identifié à l'aide d'un identifiant temporaire GUTI (Globally Unique Temporary user Equipment Identity) attribué localement par le réseau visité dans la 3G.

L'UE ne peut dialoguer avec le 5GC que s'il supporte le protocole NAS « Non-Access Stratum ». L'UE peut établir deux support radio avec deux stations de base (c'est la 5G Dual mode), c'est-à-dire que l'appareil est compatible à la fois avec la 5G SA (Standalone) et la 5G NSA (non Standalone) [2].

I.3.2 L'accès radio 5G (NG-RAN)

Cette partie est constituée de station de base de nouvelle génération. Les UEs communiquent avec la station de base soit par un lien radio 5G, soit par un lien radio 4G. Si la communication est en 5G, la station de base se nomme ngNB (Next generation Node base station). Si la communication en 4G, la station de base se nomme eNB évoluée pour s'interconnecter avec le réseau cœur 5G nommé ng-eNB (Next generation Evolved Node B).

Les fonctions de la gNB sont assez similaires avec l'entité eNB. Cependant, les différences concernent la gestion de la qualité de service par flux et la gestion des tranches de réseau (Slices)

sur l'interface radio. Un slice est composé d'instances logiques du réseau mobile permettant de garantir la sécurité, les performances et la qualité de service propres à chaque usage.

L'architecture de la gNB est devisée selon des fonctionnalités, elle est formée par une unité centrale (gNB-CU central unit) qui nécessite une ou plusieurs unités distribuées (gNB-DU Distributed units) connecter à une carte radio distante (RRH remote radio head). L'unité centrale (gNB-CU) est encore divisée en deux parties, une pour les fonctions de plan de contrôle (gNB-CU-CP control plane function) et l'autre pour les fonctions de plan d'utilisateur (gNB-CU-UP user plane function). La figure I.1 présente l'accès Radio 5G [2].

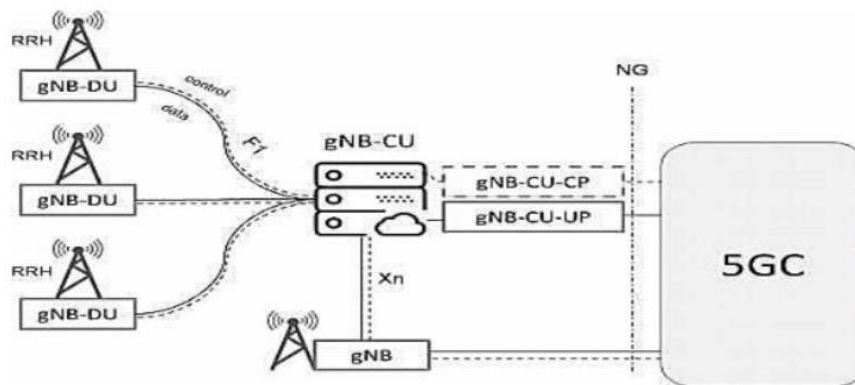


Figure I.1 : Accès radio 5G (NG-RAN) [2].

I.3.3 Réseau cœur 5G (NGCN ou 5GC)

Le réseau cœur 5GC (5G Core) est adapté pour la virtualisation des fonctions réseau aidé par l'utilisation des protocoles HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) entre les entités fonctionnelles du réseau cœur 5G et le serveur. Il s'appuie sur le découpage du plan de contrôle (Control Plane) et du plan utilisateur (User Plane). Les RANs (Radio Access Networks) dialoguent avec le réseau cœur 5G (NGCN ou 5GC) à l'aide des interfaces.

L'architecture 5G est complètement définie en termes de fonctions réseau NF (Network Function) qui sont exposés en tant que services. Dans le plan utilisateur, nous avons une ou plusieurs fonctions de plan utilisateur UPF (User Plane Function), qui portent principalement le transfert de paquets entre les différents tunnels NG. Toutes les autres fonctions réseau appartiennent au plan de contrôle. Les seuls radios autorisés à s'interfacer au 5GC sont LTE (Long Term Evolution) et ses évolutions (LTE-Advanced, LTE-Advanced Pro), aussi 5GC donne accès à des réseaux externes IP (exemple : Internet, IMS...etc.) appelées *Data Networks*. La figure I.2 montre l'architecture d'un réseau 5G : [2]

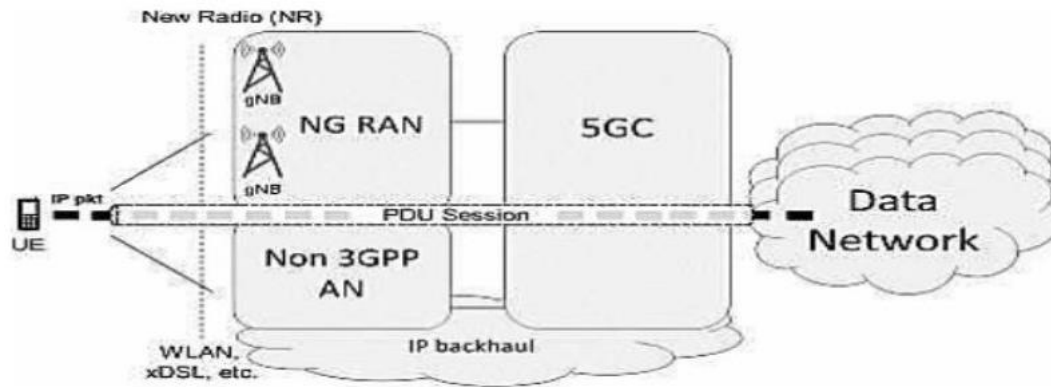


Figure I.2 : Architecture d'un réseau 5G [2].

I.3.4 Fréquences attribuées à la 5G

La 5G reprend les technologies déjà utilisées dans la 4G LTE, mais se différencie sur plusieurs points, ce qu'il s'agira d'un nouveau réseau. En premier lieu, la 5G est une évolution de la 4G LTE, elle peut réutiliser les mêmes bandes de fréquences que cette dernière grâce à la technologie DSS (Dynamic Spectrum Switching), cette dernière permet de basculer directement depuis l'antenne entre la 4G et la 5G en temps réel et selon la demande. Grâce à cette mise à jour, un utilisateur 5G peut bénéficier d'un meilleur débit qu'un utilisateur 4G pourtant connecté à la même antenne en utilisant la même fréquence ainsi que les mêmes équipements.

A ces fréquences s'ajouteront de nouvelles bandes de fréquences qui seront divisées en deux groupes, permettant d'augmenter sensiblement le débit au détriment de la portée [2].

I.3.4.1 Les bande de fréquences 5G Sub-6

Les bandes de fréquence 5G Sub-6 ou FR1 (Frequency Range 1) ce sont des fréquences qui se situent sous la barre des 6 GHZ ils couvrent une gamme de fréquences de 450 MHz à 6 GHZ, les fréquences entre 3,4 et 3,8 GHZ sont nécessaires pour offrir une capacité 5G et faire les premiers usages industriels. Elles permettent une meilleure portée et une meilleure couverture que les ondes millimétriques mais possèdent un débit maximal plus faible. Notons que les bandes de fréquences de 700 et 800MHz sont celles utilisées pour offrir une large couverture de zones urbaines et fournir les services IoT [4] [2].

I.3.4.2 Les ondes millimétriques

Les communications à ondes millimétriques (mmWave) ont été proposées comme une partie importante du réseau mobile 5G pour fournir des services de communication multi-gigabit tels que la télévision haute définition (HDTV) et la vidéo ultra haute définition (UHDV).

Le groupe d'ondes millimétriques ou FR2 (Frequency Range 2) sont des bandes de fréquences supérieures à 24GHZ. Elles correspondent à des fréquences de 10 à 30 fois plus élevées que celles

utilisées par la 4G. Le FR2 couvre une gamme de fréquences de 24.25 à 52.6 GHz avec une longueur d'onde de l'ordre du mm. Elles permettent un très haut débit mais le principal inconvénient de l'utilisation d'ondes millimétriques en 5G est que ces ondes sont très sensibles à la perte de trajectoire dans l'espace libre, la pluie, au brouillard, et ont une portée limitée (<1 km). La plupart des recherches actuelles se concentrent sur la bande de 28 GHz, la bande de 39 GHz, la bande de 60 GHz et la bande E (E- band : 71-76 GHz et 81-86 GHz). La figure I.3 présente le spectre de fréquences utilisées par la 5G [3].



Figure I.3 : Spectre des bandes d'ondes millimétriques dans la 5G [3].

I.4 Principe de réseau 5G

La 5G exploite des fréquences de diffusion ultra-hautes (UHF) allant de 6 à 100 GHz, c'est-à-dire des ondes millimétriques, pour transférer rapidement d'importantes quantités de données. Bien que la portée de diffusion soit limitée, ce problème est atténué grâce à la technologie de Beamforming combinée au MU-MIMO (multi-utilisateur Multiple Input Multiple Output), qui permet une transmission continue des données sur plusieurs appareils. De plus, le processus de multi-cell handover garantit des connexions de l'ordre du gigabit, même en déplacement [4] .

I.4.1 Les Ondes Millimétriques

Les ondes millimétriques désignent les ondes radioélectriques qui couvrent des fréquences de 30 à 100 GHz.

I.4.2 Les Micros-Celles

Les micros-celles augmentent l'efficacité spectrale en réduisant la taille des cellules. Avec moins d'utilisateurs par cellule. La réduction de leur taille permet d'attribuer plus de spectre à chaque utilisateur, augmentant ainsi considérablement la capacité totale du réseau [4].

I.4.3 MIMO Massif

Ce concept fait référence à l'utilisation d'un grand nombre d'antennes dans un réseau MIMO, ce qui améliore la capacité et l'efficacité de la transmission. Pour répondre aux demandes de haut débit exigées par les communications mobiles de dernières générations, une solution consiste à augmenter le nombre d'antennes à l'émission et à la réception de la liaison sans fil. Il peut y avoir:

- Une seule antenne du côté émission et une seule antenne du côté réception (SISO : Single-Input Single-Output).
- Plusieurs antennes du côté émission et une seule antenne du côté réception (MISO : Multiple-Input Single-Output).
- Une seule antenne du côté émission et plusieurs antennes du côté réception (SIMO : Single-Input Multiple-Output).
- Plusieurs antennes du côté émission et plusieurs antennes du côté réception (MIMO : Multiple-Input Multiple-Output), c'est le système à entrées multiples, sorties multiples.

C'est comme indiqué ci-dessous sur la figure I.4 qui présente les différentes configurations des antennes multiples.

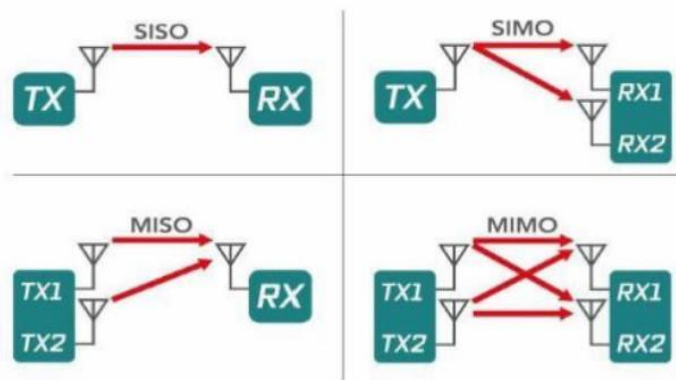


Figure I.4 : Différentes configurations des antennes multiples [4].

I.4.4 Formation de faisceau (Beamforming)

Le Beamforming permet d'adapter le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes selon un modèle spécifique, optimisant ainsi la direction des signaux.

I.4.5 Duplex integral (Full-Duplex)

Le full-duplex caractérise une connexion où le réseau permet la réception et l'émission de données simultanément, améliorant ainsi l'efficacité des communications [4].

I.4.6 Techniques d'accès multiple

Les techniques d'accès multiple sont des méthodes utilisées pour permettre à plusieurs utilisateurs ou dispositifs de partager les mêmes ressources de communication. Ces techniques sont essentielles dans les systèmes de communication modernes, notamment dans les réseaux sans fil, les systèmes de téléphonie mobile et les réseaux informatiques. La figure I.5 ci-dessus représente les différentes Techniques d'accès multiple :

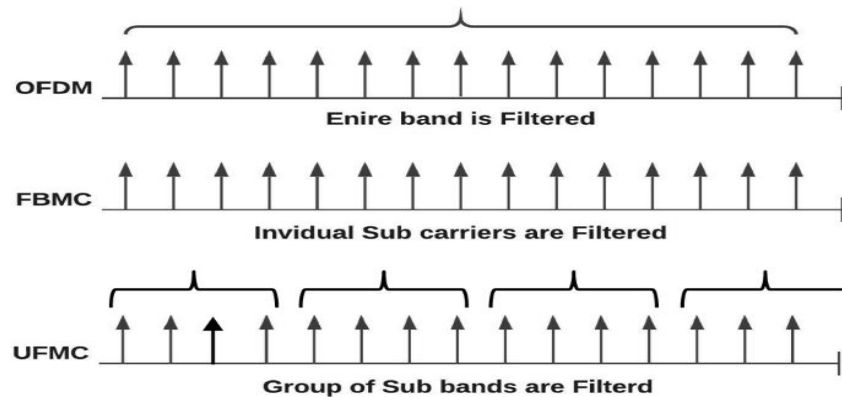


Figure I.5 : Différentes Techniques d'accès multiple. [12]

I.4.6.1 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

La modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est un type particulier de transmissions multi-porteuses dont l'originalité est de multiplexer l'information. Parmi les systèmes de modulation multi porteuse existants l'OFDM est le plus répandu. OFDM est une technique de transmission de donnée analogique ainsi qu'une solution efficace pour lutter contre les effets des trajets multiples. [5] Cette technique divise la bande du système en un grand nombre de porteuse individuelle appelée sous-porteuse, ces dernières sont dites orthogonales [6].

I.4.6.2 FBMC (Filtre-Bank Multi-Carrier)

Le système FBMC utilise un filtrage au niveau de la sous-porteuse qui est appliqué lors de l'utilisation de banques de filtres du côté émission et du côté réception. Son principe de base est de diviser le spectre de fréquence en plusieurs sous-porteuse qui sont très étroites et les filtrer individuellement, il est capable de fournir un très haut niveau d'efficacité spectrale [7].

I.4.6.3 UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier)

Il diffère de FBMC, au lieu de filtrer chaque sous-porteuse individuellement, UFMC divise le signal en un certain nombre de sous-bande qu'il filtrera. Ensuite, on peut l'utiliser pour améliorer la protection contre les interférences entre symboles [8].

I.5 Spectre pour la 5G

Pour fonctionner, un réseau mobile repose sur des fréquences et des antennes. Sans fréquences, il n'y a pas de 5G. En effet, les communications numériques utilisent des bandes de fréquence pour transmettre des données. La 5G nécessite l'utilisation de plusieurs bandes de fréquences, chacune ayant des caractéristiques distinctes :

- *Fréquences basses* : Elles offrent une bonne portée du signal, mais des débits plus faibles.
- *Fréquences hautes* : Elles permettent d'atteindre des débits élevés, mais avec une portée du signal réduite.

À terme, trois bandes de fréquences seront exploitées par le réseau mobile 5G, et c'est l'agrégation de ces bandes qui ouvrira la voie à de nombreuses applications :

- *Bande des 3,5 GHz* : Attribuée exclusivement à la 5G après un long processus d'attribution et d'enchères, cette bande offre les meilleurs débits.
- *Fréquences de la 2G, 3G, 4G* : Ces bandes (700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz, 2,6 GHz) peuvent être réaffectées par les opérateurs pour la 5G.
- *Bande des 26 GHz* : Cette bande permettra à la 5G de réaliser tout son potentiel et sera attribuée dans les années à venir. La figure I.6 montre le spectre envisagé pour la 5G [8].

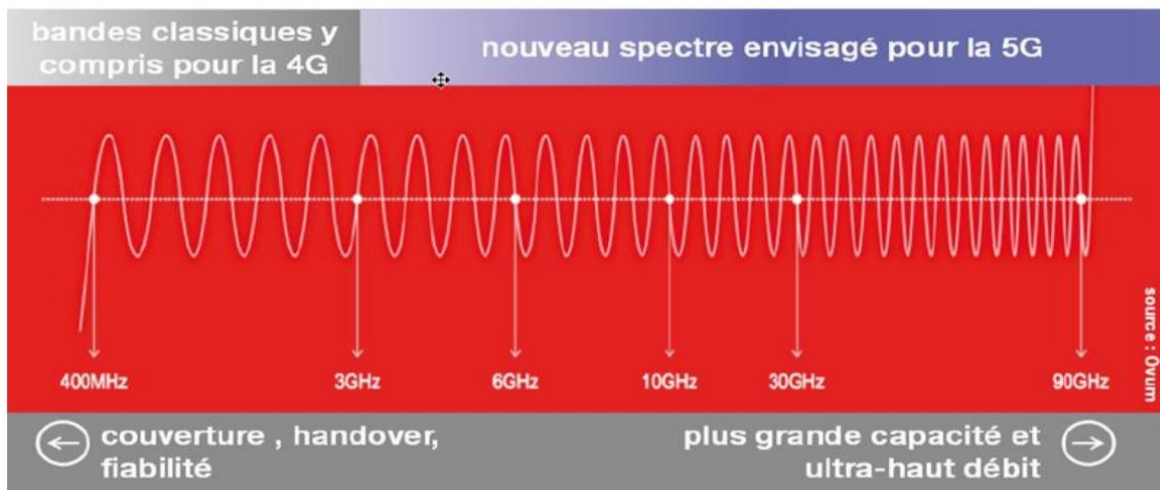


Figure I.6 : Le spectre de 5G [12].

I.6 Les avantages et inconvénients de réseau 5G

La technologie 5G apporte des changements significatifs dans le domaine des communications, et il est essentiel d'examiner ses aspects positifs avant de se pencher sur ses inconvénients.

I.6.1 Les avantages

- La 5G aura un débit dix fois supérieur à la 4G, ce qui offrira des perspectives d'évolutions importantes et touchera des secteurs beaucoup plus variés.
- Moderniser les moyens de production des entreprises, ce qui augmentera considérablement les bénéfices.
- Les réseaux 5G devraient également offrir une bande passante bien plus large et supporter beaucoup plus d'appareils.
- Permettre de réduire la latence qui passerait ainsi de 10 à 1ms. Enfin, la 5G devrait aussi permettre des connexions plus fiables notamment pour les objets connectés tels que les voitures autonomes ou les robots qui opèrent à distance au sein des hôpitaux [9].

I.6.2 Les Inconvénients

- **Coût de déploiement élevé** : L'infrastructure nécessaire pour la 5G est coûteuse à installer et nécessite des investissements significatifs.
- **Couverture inégale** : La 5G n'est pas encore disponible partout, et les zones rurales peuvent être particulièrement touchées par ce manque de couverture.
- **Préoccupations en matière de santé** : Certains s'inquiètent des effets potentiels des ondes millimétriques sur la santé, bien que les études soient encore en cours.
- **Sécurité des données** : Avec l'augmentation du nombre d'appareils connectés, les risques de cyberattaques et de violations de données peuvent également augmenter.
- **Interférences avec d'autres technologies** : La 5G pourrait causer des interférences avec certains services existants, comme les satellites et les systèmes météo [10] .

I.7 Nouvelles applications

La technologie 5G ouvre la voie à une variété d'applications qui transforment plusieurs secteurs. Elle permet une connexion massive d'appareils dans l'Internet des Objets, favorisant l'automatisation des maisons et des villes intelligentes. Dans le domaine de la santé, la télémédecine bénéficie de la transmission rapide des données pour des consultations à distance. La 5G améliore également les expériences en réalité augmentée et virtuelle grâce à des débits élevés. De plus, elle facilite la communication en temps réel pour les véhicules autonomes, permet le streaming de contenu en ultra-haute définition, et aide à gérer efficacement les infrastructures urbaines dans les smart cités. La figure I.7 montre les applications dans la 5G [13] .



Figure I.7: Applications 5G [13].

I.8 La 5G dans le monde

I.8.1 En Europe

Les efforts de recherche passés en Europe ont permis de nombreuses avancées dans les communications mobiles, ce que nous tenons pour acquis aujourd'hui. Celles-ci incluent le standard GSM (Global System for Mobile Communications) 2G (utilisé à ce jour par 80% des réseaux mobiles du monde) et les technologies utilisées dans le système de télécommunications mobiles universelles 3G (UMTS Universal Mobile Télécommunications System) et les standards 4G LTE. Le développement rapide de la technologie 5G revêt désormais une importance capitale pour que l'Europe puisse stimuler l'économie, renforcer la compétitivité de son industrie et créer de nouveaux emplois [11].

I.8.2 En Amérique du Nord

La recherche en Amérique du Nord diffère de celle en Europe, étant plus axée sur les collaborations entre universités et industries, sans financement public coordonné aux États-Unis et au Canada. Bien que des organismes comme NSF (National Science Fondation) et DARPA (Defense Advanced Research Projets Agency) financent des projets universitaires, ces recherches sont souvent influencées par des intérêts individuels. Pour la 5G, des partenariats entre universités et entreprises privées se forment, comme celui entre l'Institut polytechnique de l'Université de New York (NYU Poly) et Samsung, qui se concentre sur le développement de solutions mmWave pour la 5G [11].

I.8.3 En Asie

L'Asie, comme l'Europe, développe une feuille de route pour la 5G, avec des initiatives variées. En Corée du Sud, un forum 5G a été établi, tandis que la Chine dirige le programme IMT (International Mobile Télécommunications) 2020. La recherche sur la 5G est principalement menée par la Chine, le Japon et la Corée du Sud, avec des partenariats entre universités et industries. En Chine, les recherches sont encore à leurs débuts, tandis qu'au Japon et en Corée du Sud, des projets tels que le réseau de test de NTT (Nippon Telegraph and Téléphone) et Samsung ont atteint des débits de 10 Gbps. Cela met en lumière la position de la 5G sur la scène mondiale. La figure I.8 donne les différents classements de la 5G dans le monde [11].

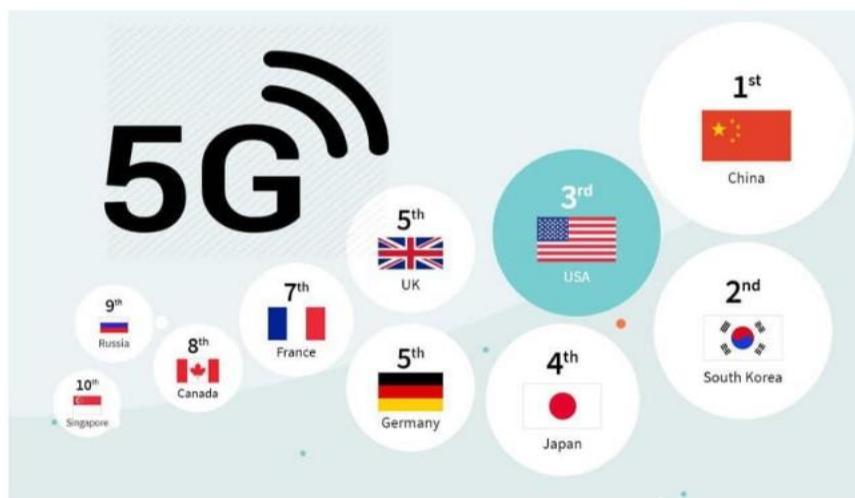


Figure I.8 : Le classement de la 5G dans le monde [11].

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit des généralités sur la 5G, qui seront une solution pour les futures générations des réseaux avec son architecture avancée, et son principe qui base sur les technologies MIMO et les ondes millimétriques et les Techniques d'accès multiple. Dans ce réseau, nous avons constaté certains inconvénients pour la santé, ainsi que les avantages de la nouvelle version 5G, qui comprend un ensemble d'applications dont le déploiement doit bientôt commencer.

Le chapitre suivant sera dédié à l'étude de l'effet du blocage par le corps humain dans les ondes millimétriques telles que l'atténuation forte de signal et le blocage causé en raison de la courte longueur d'onde. Comme on a extrait les points d'une transmission à base des ondes millimétriques.

Chapitre II : Les ondes millimétriques et l'effet du blocage humain

Chapitre II

Les ondes millimétriques et l'effet du blocage humain

II.1 Introduction

Les réseaux mobiles de la cinquième génération 5G représente une évolution majeure des réseaux de communication sans fil, visant à répondre aux exigences croissantes des services et des applications modernes tels que : *les jeux en ligne, la réalité virtuelle, les véhicules autonomes et l'Internet des objets (IoT)*, qui nécessitent des réseaux capables de fournir une capacité élevée et un débit important, tout en maintenant une faible latence. Pour relever ce défi, le déploiement de nouvelles technologies est essentiel. Ces technologies comprennent les petites cellules, ainsi que d'autres techniques qui seront abordées dans ce chapitre, telles que : *les ondes millimétriques* (mmWaves, Tera-Hertz), ainsi que les études sur les *modèles de blocage humain* et leurs effets.

II.2 Les ondes millimétriques dans le contexte de la 5G

Les ondes millimétriques sont des ondes ayant une longueur d'onde (λ) de l'ordre du mm, alors elle est plus petite que les longueurs d'onde en m ou km utilisés pour les ondes radio. Elle a une large gamme de fréquences située entre 30 et 100GHz (Fig.II.1).

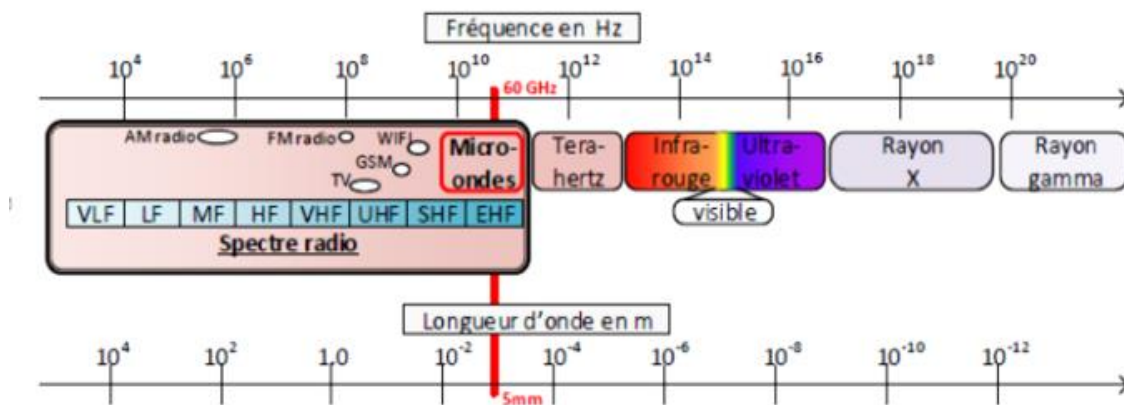


Figure II. 1 : Spectre électromagnétique. [15]

Les communications à ondes millimétriques (mmWave) sont une technologie clé pour la 5G, elles permettent de répondre aux exigences de la nouvelle génération grâce à ses potentiels techniques qui peuvent être complémentaires à d'autres technologies, tels que les réseaux ultra-denses (UDN), les entrées multiples et sorties multiples (massives MIMO) et la formation de faisceaux hybride (beamforming hybride). Néanmoins, il existe des défis techniques qui sont

principalement liés aux caractéristiques spécifiques de la propagation mmWave qui doivent être relevées ici [14] .

II.2.1 Le potentiel des ondes millimétriques

La pénurie de spectres millimétrique a déclenché des études et des efforts industriels pour utiliser des larges bandes de fréquences à des longueurs d'ondes courtes qui n'ont pas été utilisées auparavant ; combinées avec la technologie CMOS RF d'antennes miniaturisées dans des petites surfaces. À faible puissance, permettant l'emplacement d'un grand nombre (≥ 32 éléments). [15]

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

Il existe de nombreux travaux sur les systèmes cellulaires à ondes millimétriques, notamment dans l'industrie. Les campagnes de mesures ont été lancées afin d'obtenir les caractéristiques spatiales et temporelles des bandes de fréquences des ondes millimétriques et développer des nouvelles techniques et procédures en bandes 60 GHz [16].

II.2.2 Caractéristiques des communications à ondes millimétriques

Les ondes millimétriques subissent une perte de propagation par rapport aux autres ondes radio à basse fréquence. Les facteurs tels que les atténuations dues à l'atmosphère, les pertes en espace libre et les mécanismes de propagation réduisent leur capacité à se propager. Ces effets peuvent être détaillés comme suit :

II.2.2.1 Pertes en espace libre

On parle d'un milieu de propagation comme un espace libre lorsque l'espace entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice doit être libre, c'est à dire ; nous ne trouvons aucune source ou objet perturbant pendant la transmission du signal entre les deux antennes. Dans une zone d'ouverture fixe, une augmentation de fréquence provoque un affaiblissement en propagation des ondes millimétriques. Les signaux transmis en espace libre subissent une décroissance de puissance. La relation de perte en espace libre avec la fréquence de porteuse et la distance est proportionnelle. [17]

$$FSL_{[dB]} = 92.4 + 20 \log_{10} F + 20 \log_{10} R \quad (II.1)$$

Où

F : est la fréquence (en GHZ).

R : est la distance (en km).

II.2.2.2 Atténuation atmosphérique

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

Les ondes millimétriques sont absorbées par deux gaz, l'oxygène (O_2) et la vapeur d'eau (H_2O). D'un autre côté l'absorption de chaque gaz est différente, elle dépend des facteurs comme : la température, la pression, et la fréquence porteuse. L'absorption d' O_2 pour la bande de fréquence 60 GHZ vaut 15 dB/Km. Dans le cas général en courte distance, l'impact de l'atténuation atmosphérique en bande millimétrique est négligeable. La figure (2.3) représente l'atténuation spécifique d' O_2, H_2O en fonction de la fréquence [18] .

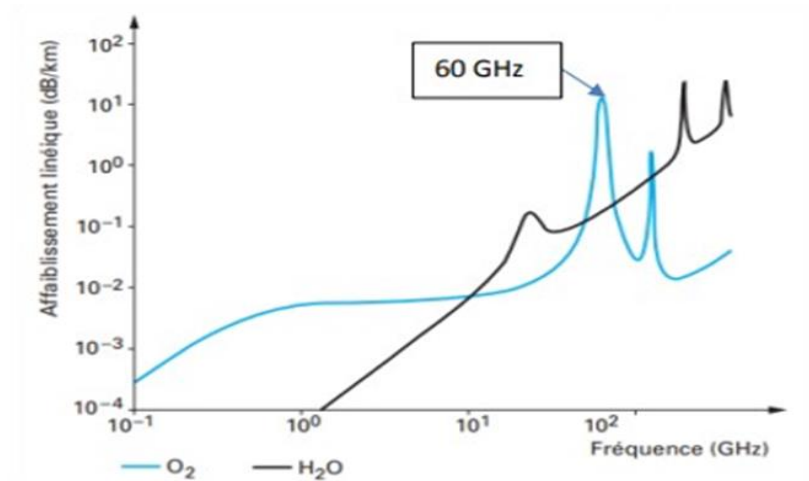


Figure II. 2 : Atténuation spécifique de O_2 et H_2O en fonction de la fréquence. [18]

II.2.2.3 Mécanismes de propagation

En raison de courte longueur d'onde [1 mm-10mm], les signaux en mmWave subissent divers mécanismes de propagation qui sont illustrés sur la figure (II. 3) [19], tels que la réflexion du rayon, la diffusion, et la diffraction. Ces mécanismes sont radicalement différents de ceux des basses fréquences, donc ils doivent être soigneusement étudiés et modélisés [20] .

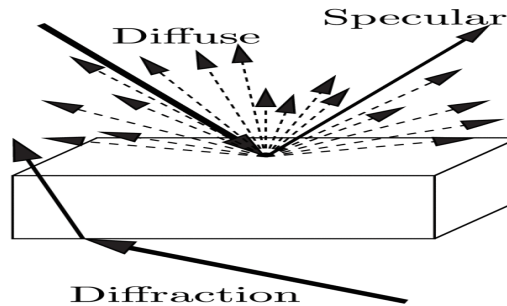


Figure II. 3 : Illustration des divers mécanismes de propagation [21] .

- **La réflexion** : se produit lorsque le signal transmis rencontre des obstacles de grandes dimensions comparées à sa longueur d'onde.
- **La diffusion** : lorsque le chemin de la propagation est obstrué par un obstacle dont les dimensions sont du même ordre de grandeur ou inférieur à la longueur d'onde, une diffraction de l'onde incidente se produit.
- **La réfraction** : se produit lorsque le signal traverse un mur, ou une surface et se retrouve dans un milieu ayant un indice de réfraction différent du premier milieu de propagation [21] .

II.2.3 Défis liés à l'utilisation d'ondes millimétriques

- Les ondes millimétriques ont une portée plus restreinte et sont davantage affectées par les obstacles physiques tels que les bâtiments et les arbres, nécessitant ainsi un déploiement plus dense des infrastructures.
- Elles subissent une atténuation plus importante par l'atmosphère, ce qui peut réduire la couverture et la stabilité du signal.
- Les équipements utilisant des ondes millimétriques demandent une consommation énergétique plus élevée, ce qui présente des défis en termes d'efficacité énergétique et d'autonomie des batteries.
- La compatibilité avec les équipements existants ainsi que la gestion des fréquences millimétriques représentent des enjeux importants pour un déploiement efficace et cohérent de la 5G utilisant ces fréquences.

II.2.4 Les applications des ondes millimétriques

Voici les principaux domaines d'applications des ondes millimétriques :

II.2.4.1 La conception des petites cellules avec la 5G

La 5G utilise des ondes millimétriques (de 24 GHz à 86 GHz) pour offrir des débits de données plus élevés. Ces ondes ont plusieurs applications importantes : elles permettent une large capacité dans des zones à forte affluence comme les stades et les aéroports, offrent un service plus fiable dans les zones urbaines aux interférences, et soutiennent des vitesses de téléchargement plus rapides, nécessaires pour le développement de nouvelles applications demandant une large bande passante.

II.2.4.2 Communication par satellite

Les ondes millimétriques sont des candidates idéales pour la communication par satellite. À des altitudes plus élevées des orbites, elles fonctionnent parfaitement avec un débit de données massif et une faible latence.

Les ondes millimétriques ont une fréquence bien plus élevée que les ondes radio, ce qui signifie qu'elles peuvent transporter davantage d'informations. De plus, elles se propagent en ligne droite, ce qui les rend idéales pour la communication par satellite [22].

II.2.4.3 WiGig (Wireless Gigabit)

WiGig est un autre nom pour une connexion Wi-Fi 60 GHz. Il a la possibilité de fournir des vitesses Wi-Fi, avec des vitesses de téléchargement allant jusqu'à 10 Gbps, WiGig peut télécharger un film HD en quelques secondes. Il offre une latence très faible.

D'onde millimétrique de 60 GHz ne peut généralement pas pénétrer les murs, mais peut propager les réflexions des murs, des plafonds, des sols et des objets en utilisant la formation de faisceaux intégré au système WiGig. Lorsque vous vous éloignez de la pièce principale, le protocole peut basculer pour utiliser les autres bandes inférieures à un taux beaucoup plus faible [23].

II.2.4.4 La bande V

La bande V, également appelée "bande en V", est une désignation standard par l'Institute IEEE (Electrical and Electronics Engineers) pour une bande de fréquences dans la partie micro-ondes du spectre électromagnétique allant de 40 à 75 (GHz). La bande V n'est pas très utilisée, sauf pour

la recherche radar à ondes millimétriques et d'autres types de recherche scientifique. Il ne doit pas être confondu avec la bande V (bande cinq) de 600-1000 MHz [24].

La bande V est également utilisée pour les systèmes de communication terrestre à ondes millimétriques de grande capacité. Aux États-Unis, Fédérale Communications Commission a attribué la bande de fréquences de 57 à 71 GHz aux systèmes sans fil sans licence. Ces systèmes sont principalement utilisés pour les communications à grande capacité et à courte distance (moins de 1mille). En outre, les fréquences à 70.80 et 90 GHz ont été attribuées comme bandes multifréquences communications sans fil gigabit. Toutes les liaisons de communication dans la bande V nécessitent une ligne de visée dégagée entre le point émetteur et le point récepteur, et l'évanouissement dû à la pluie doit être pris en compte lors de l'analyse du Bilan de liaison [25].

II.2.5 Bandes millimétriques (mmWave)

Les ondes millimétriques sont les ondes radioélectriques couvrant les fréquences de 30 à 300 GHz, où les longueurs d'onde sont comprises entre 1 et 10 mm. L'intérêt pour les ondes millimétriques est basé tout d'abord sur des considérations techniques : largeur des bandes passantes disponibles, facilité de la réutilisation des fréquences due aux fortes atténuations en fonction de la distance, et enfin compacité des équipements due aux courtes longueurs d'onde. Les ondes millimétriques subdivisées à des bandes (voir tableauII.1 et figureII.4) [26].

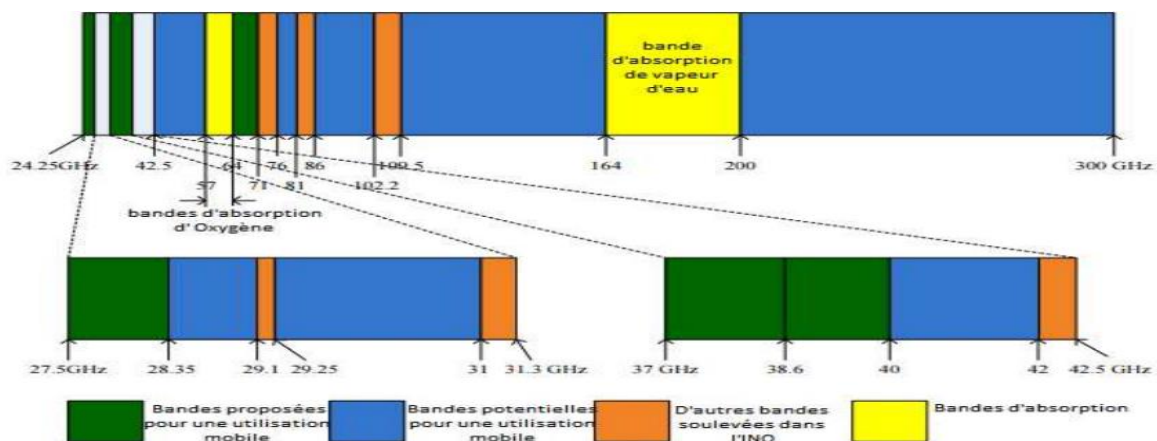


Figure II. 4 : Utilisation du spectre dans les bandes d'ondes millimétriques. [26]

II.2.6 Caractéristique des fréquences millimétriques

Selon la commission fédérale de la communication, la distribution des bandes fréquentielles est comme suit :

- *Bande 38,6 – 40,0 GHz (sous licence)* : Cette bande offre une largeur de bande de 1,4 GHz, adaptée aux communications de moyennes distances (quelques centaines de mètres), de type point à multipoint. Elle est actuellement en phase d'étude.
- *Bande 57 – 64 GHz (sans licence)* : Cette bande offre une largeur de bande de 7 GHz, adaptée aux communications de courtes portées (environ une dizaine de m). Elle est utilisée par la norme 802.11ad et permet d'atteindre des débits de plusieurs gigabits par seconde (Gbps).
- *Bandes 71 – 76 GHz, 81 – 86 GHz et 92 – 95 GHz (sous licence)* : Ces bandes offrent entre 3 et 5 GHz de largeur de bande et sont adaptées aux transmissions très hautes débit de type point à point (P2P) sur de longues distances (plusieurs km). Elles sont particulièrement utiles dans les environnements où il est difficile de déployer de la fibre optique [27].

II.2.7 Les avantages des ondes millimétriques

Voici quelques avantages des systèmes MIMO :

- **Augmentation de la capacité** : MIMO permet de transmettre plusieurs flux de données simultanément, ce qui augmente la capacité globale du système.
- **Amélioration de la fiabilité** : Grâce à la diversité des chemins de transmission, MIMO réduit les erreurs et améliore la fiabilité des communications.
- **Meilleure couverture** : Les systèmes MIMO peuvent offrir une couverture plus uniforme dans les environnements où le signal peut être affaibli.
- **Efficacité spectrale accrue** : MIMO utilise la bande passante de manière plus efficace, permettant à plus d'utilisateurs de se connecter en même temps.
- **Résistance aux interférences** : MIMO aide à minimiser les effets des interférences en utilisant plusieurs antennes pour capter le signal.
- **Performances améliorées dans des environnements complexes** : MIMO est particulièrement efficace dans les environnements urbains, où les réflexions et la multi-trajet sont fréquentes.

II.2.8 Les inconvénients des ondes millimétriques

Les ondes millimétriques présentent des inconvénients tels que : Portée limitée et LOS (ligne de visée). Dans ce qui suit nous allons donner une description pour chaque caractéristique.

II.2.8.1 Portée limitée

Les longueurs d'onde plus courtes allant de 1 mm à 10 mm subissent une forte atténuation atmosphérique en raison du brouillard, de la pluie et de l'humidité, affectent la portée de transmission des ondes millimétriques.

II.2.8.2 Ligne de visée (LOS)

Absence d'obstacles entre les deux points de communication dans les réseaux sans fil se fait dans des conditions favorables, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas d'obstacles qui réduisent la force du signal.

II.3 Bande Sub-TéraHertz (Sub-THz)

La bande Sub-TéraHertz (*Sub – THZ*) est une partie du spectre des radiofréquences (RF). Les ingénieurs en radiofréquences considèrent tout système fonctionnant au-delà de 100GHz comme un système THZ. D'autre part, les ingénieurs en optique considèrent toutes les fréquences inférieures à l'infrarouge lointain (seuil 10 THZ), la bande THZ se situe entre 300 GHz et 10 THZ avec une longueur d'onde de 100 μ à 1 mm [27].

Tableau II.1 : Les bandes sub-THz [28].

Nom	Bande	Remarques
252 – 296 GHz	252 – 275 GHz 275 – 296 GHz	Proposition préliminaire pour le service mobile terrestre et le service fixe. Convient pour une utilisation en <i>extérieur</i>
306 – 450 GHz	306 – 313 GHz 318 – 333 GHz 356 – 450 GHz	Proposition préliminaire pour le service mobile terrestre et le service fixe.

II.3.1 Bande THZ dans le spectre électromagnétique

Il existe différentes définitions de la plage des fréquences THZ, comme la région *sub – THZ* couvrant de 0.1 à 0.3 THZ et la région THZ couvrant de 0.3 à 10 THZ. Dans certaines autres littératures, la bande de fréquences de 0.3 à 3 THZ est désignée comme la bande TéraHertz. Pour des raisons de simplicité, nous considérons la bande THZ comme l'intervalle de fréquences couvrant de 0.1 à 10 THZ. Cette plage est également connue sous le nom de «*trou TeraHertz* » [29].

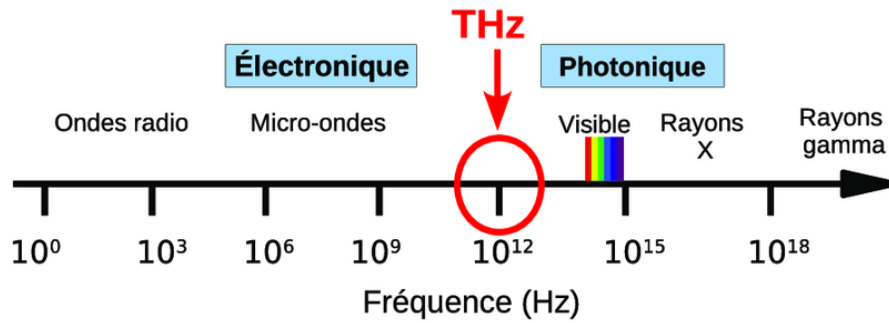


Figure II. 5 : Plage de trou THZ de spectre électromagnétique [30].

En termes de longueurs d'onde, le trou TéraHertz peut être défini comme étant compris entre 3 mm et $30\text{ }\mu\text{m}$. Ainsi, les ondes TéraHertz sont également appelées ondes submillimétriques. De plus, le rayonnement Ter hertz est aussi désigné sous les termes de rayonnement submillimétrique, ondes TéraHertz, lumière TéraHertz, T-rays, T-light, T-lux et THZ. Le rayonnement TéraHertz est une région du spectre située entre l'infrarouge lointain et les micro-ondes. En raison de cela, il possède certaines caractéristiques particulières [30].

II.3.2 Caractérisation des ondes Sub-THZ

Les caractéristiques des ondes Sub-THZ sont données par :

- **Dualité onde-particule** : En raison de l'emplacement de la bande THZ dans le spectre électromagnétique, c'est-à-dire que la bande THZ se situe en dessous de la bande optique et au-dessus de la bande des micro-ondes, l'onde THZ possède une nature particulière et une nature ondulatoire, comme l'interférence et la diffraction.
- **Pénétration** : Le rayonnement THZ a une bonne pénétrabilité sur un grand nombre de matériaux diélectriques et de liquides non polaires. Par conséquent, les ondes THZ peuvent être utilisées pour l'imagerie de perspective pour de nombreux objets non transparents.
- **Non ionisant** : L'énergie du rayonnement THZ n'est que de l'ordre du milli électron volt. Son énergie est inférieure à l'énergie de différents types de liaisons chimiques, elle ne provoque donc pas de réaction ionisante dangereuse.
- **Spectroscopie** : Divers matériaux solides et gazeux présentent des signatures THZ uniques dans la bande des 0,53 THZ. En raison de cette caractéristique unique, le rayonnement THZ peut être utilisé pour les applications de détection de matériaux.
- **L'intensité** : La collimation de l'onde est plus facile dans le régime THZ du spectre par rapport à celle du régime micro-ondes.
- **Diffusion** : La diffusion est inversement proportionnelle à la longueur d'onde et elle est faible dans la bande THZ par rapport à l'onde lumineuse.

- **Forte absorption moléculaire :** De nombreuses molécules organiques présentent de fortes caractéristiques d'absorption et de dispersion dans la bande THZ. La spectroscopie THZ des matériaux contient une multitude d'informations physiques et chimiques, ce qui leur confère des caractéristiques uniques, comme les empreintes digitales [21].

II.3.3 Les antennes THz

Des bandes massives sont donc déjà disponibles pour les futurs systèmes de communication THZ. Les attributions présentées par la WRC sont globales, elles s'appliquent au monde entier et constituent la base des activités réglementaires futures [31].

Le cuivre est le métal le plus connu pour la conception d'antennes RF et micro-ondes. La conception d'antennes métalliques dans le régime des fréquences RF et micro-ondes a été étudiée en détail et il existe des méthodes systématiques de conception d'antennes. Cependant, la conception de l'antenne métallique en cuivre dans la bande THZ est entièrement différente de l'antenne métallique micro-ondes classique. Les antennes métalliques micro-ondes classiques sont excitées par diverses lignes d'alimentation telles que les micros rubans, et les câbles coaxiaux, alors que les antennes THZ sont excitées par laser à travers la fibre ou l'air [32].

L'antenne THZ métallique et l'antenne micro-ondes présentent une autre différence, à savoir la tension de polarisation. La conception de l'antenne THZ nécessite une tension de polarisation, mais l'autre n'en a pas besoin. En outre, la fabrication d'une antenne THZ métallique est plus coûteuse et plus compliquée. Au cours des dernières décennies, plusieurs structures d'antennes et de réseaux THZ métalliques à haute directive ont été conçues, notamment des antennes et des réseaux planaires, des réseaux d'antennes, des antennes à lentille, des antennes à cornet, des antennes à nanotube de carbone et des antennes en graphène [32].

II.4 Sensibilité au blocage

Les ondes électromagnétiques ont une faible capacité de diffraction autour des obstacles dont la taille est nettement supérieure à la longueur d'onde. Avec une petite longueur d'ondes, les liaisons dans la bande de 28 GHz sont sensibles aux blocages causés par des obstacles. Par exemple, le blocage par un humain (fig.II.6) pénalise le lien de liaison de 20 à 30 dB, la propagation dans un environnement intérieur en présence de l'activité humaine, le canal est bloqué pendant environ 1 % ou 2 % du temps pour 1 à 5 personnes [33].

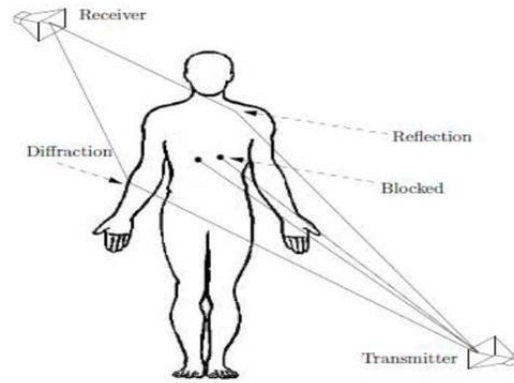


Figure II. 6 : Blocage humain entre un émetteur et le récepteur [34].

II.5 Catégorisation des bloqueurs

Le blocage constitue l'une des caractéristiques majeures du canal de propagation dans les bandes millimétriques, dont l'inconvénient est la forte atténuation de la puissance du signal en réception. Dans la littérature, on en distingue deux types, l'auto-blocage (self-blocking) qui est le blocage causé par l'utilisateur lui-même, et le non-auto-blocage (non-self-blocking) qui est caractérisé par la présence d'un bloqueur entre l'émetteur et le récepteur, pouvant être un passant ou un véhicule. Dans la chaîne de communication couche physique 5G enveloppée, c'est le non-auto-blocage de la norme 3GPP qui a été intégré [35] [36].

II.5.1 Scénario l'auto-blocage

L'auto-blocage (SB) est le scénario de blocage dans lequel le lien radio est obstrué par l'utilisateur lui-même, notamment par sa main ou son corps. Une illustration de ce scénario est donnée à la figure II.7. Sur la base de cette figure, on peut noter une forte probabilité de blocage des clusters (ou chemins) en raison de la grande dimension spatiale de l'ombrage [37].

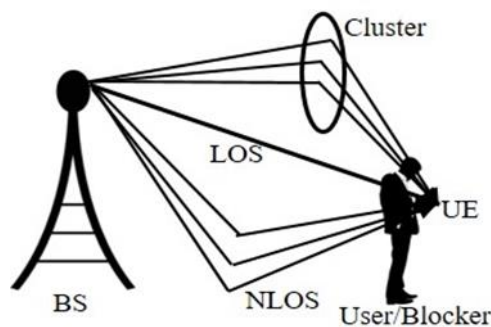


Figure II.7 : Illustration du scénario auto-blocage [37].

II.5.2 Scénario de non auto-blocage

Le non-auto-blocage (NSB) représente l'autre type de blocage, qui se caractérise par la présence d'humains ou de véhicules entre l'émetteur (T_x) et le récepteur (R_x), comme illustré à la figure II.8. Dans ce scénario, seuls quelques clusters sont susceptibles d'être bloqués, tandis que dans le scénario d'auto-blocage (SB), presque tous les clusters sont obstrués. Par conséquent, dans le scénario NSB, l'impact du phénomène de blocage est plus significatif lorsqu'il s'agit du principal cluster de propagation, qui est généralement caractérisé par le chemin de ligne de vue (LOS)[37]

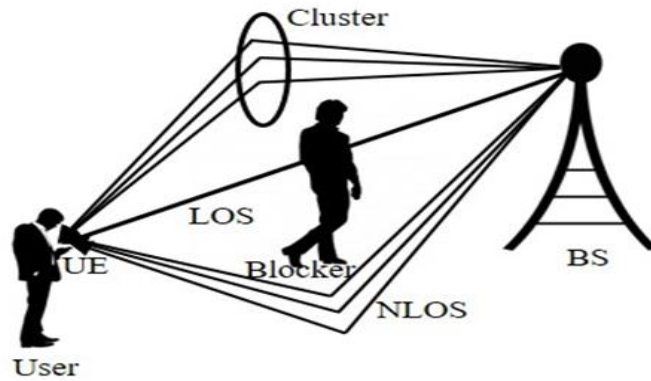


Figure II.8 : Illustration du scénario non-auto-blocage [37].

II.6 Modélisation du blocage dynamique

Dans plusieurs approches théoriques et expérimentales sont proposées pour modéliser le blocage humain dans les bandes de fréquences mmWave pour les communications 5G. et les techniques de modélisation des scénarios d'auto-blocage (SB) et de non-auto-blocage (NSB) est présenté.

II.6.1 Modèles de blocage 3GPP

Dans le dernier modèle de canal 3GPP, le phénomène de blocage dû aux humains ou aux véhicules constitue un composant supplémentaire pour lequel deux modèles ont été proposés : le modèle A (modélisé par une région) et le modèle B (modélisé par un écran rectangulaire), chacun ayant son propre domaine d'application. En effet, le modèle A est un modèle de blocage stochastique qui peut être utilisé à des fins de prévision via des outils de simulation, tandis que le modèle B est basé sur une approche complètement géométrique pour capturer l'effet de blocage dans un environnement réaliste [38].

II.6.1.1 Modèle A de la 3GPP

Comme illustré à la figure II.9, le modèle A est un modèle stochastique dans lequel le bloqueur est modélisé par une région de blocage au niveau du récepteur (R_x).

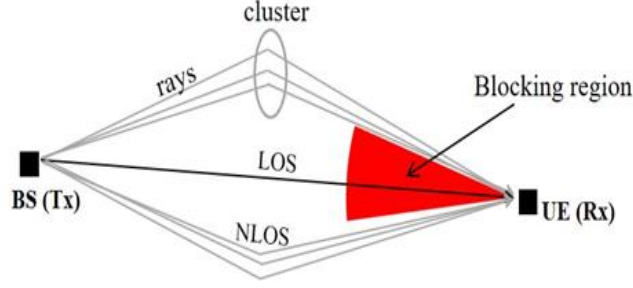


Figure II. 9 : Principe de blocage du modèle A 3GPP [38].

Le principe de cette approche est d'atténuer tout cluster dont l'angle d'arrivée se situe dans la région de blocage. En effet, la région de blocage est caractérisée par une dispersion angulaire en élévation définie de $\theta_c - \Delta\theta$ à $\theta_c + \Delta\theta$ et une dispersion angulaire en azimut définie de $\phi_c - \Delta\phi$ à $\phi_c + \Delta\phi$. Ces marges $\Delta\theta$ et $\Delta\phi$ représentent des dispersions angulaires avec une forte atténuation centrée autour de θ_c et ϕ_c en élévation et en azimut, respectivement. De cette manière, un cluster est bloqué si ses angles d'arrivée en élévation θ_{zOA} et en azimut ϕ_{AOA} sont tels que $\theta_{zOA} \in \{\theta_c - \Delta\theta, \theta_c + \Delta\theta\}$ et $\phi_{AOA} \in \{\phi_c - \Delta\phi, \phi_c + \Delta\phi\}$, et le gain de canal associé à ce cluster est atténué en unités de dB par :

$$L_{dB} = -20 \log_{10}[1 - (F(a_1) + F(a_2))(F(z_1) + F(z_2)))] \quad (II.2)$$

Où :

$$a_1 = \phi_{AOA} - \left(\phi_c + \frac{\Delta\phi}{2}\right), a_2 = \phi_{AOA} - \left(\phi_c - \frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (II.3)$$

$$z_1 = \theta_{AOA} - \left(\theta_c + \frac{\Delta\theta}{2}\right), z_2 = \left(\theta_c - \frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (II.4)$$

$F(x)$ est défini pour $(x \in \{a_1, a_2, z_1, z_2\})$ par :

$$F(x) = s(x) \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\lambda_0}} r \left(\frac{1}{\cos x} - 1 \right) \right) \quad (II.5)$$

Avec :

r représente la distance du bloqueur au récepteur (R_x).

$$s(x) = \begin{cases} +1, & \text{if } x \leq 0 \\ -1, & \text{if } x > 0 \end{cases}, x \in \{a_1, z_1\}, \quad (II.6)$$

$$s(x) = \begin{cases} +1, & \text{if } x > 0 \\ -1, & \text{if } x \leq 0 \end{cases}, x \in \{a_2, z_2\}. \quad (II.7)$$

Les paramètres de ce modèle montrent que lorsque le bloqueur est proche du R_x , la région de blocage est grande, et inversement. On peut donc déduire que la probabilité de blocage des clusters est plus élevée dans un environnement intérieur que dans un environnement extérieur [38].

II.6.1.2 Modèle B de la 3GPP

Dans le modèle B, le bloqueur (humain ou véhicule) est modélisé par un écran rectangulaire qui est orienté verticalement et perpendiculairement par rapport au chemin de ligne de vue (LOS) entre l'émetteur (T_x) et le récepteur (R_x), comme le montre la figure II.10.

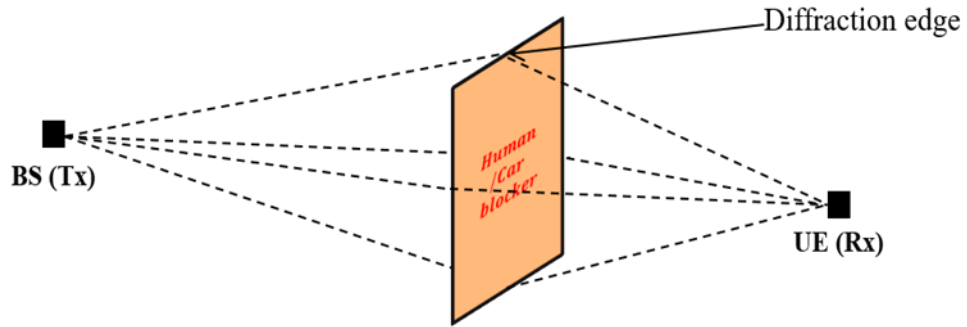


Figure II. 10 : Bloqueur représenté par un écran [38].

En effet, nous pouvons voir que tout sous-chemin obstrué par le bloqueur est diffracté dans les plans horizontal et vertical par les 4 arêtes de l'écran. De cette manière, l'atténuation due au bloqueur est déterminée à partir du gain de diffraction [38].

II.6.2 L'atténuation de blocage

L'atténuation de blocage due à la présence de l'humain basé sur le modèle A de la 3GPP est donné dans un environnement intérieur à 28GHz est représentée sur la (figure II.11). À partir de cette figure, on peut remarquer que l'atténuation est d'autant plus importante que la direction du cluster est plus proche du centre du bloqueur, caractérisé ici par l'angle en azimut $\phi_c = 90^\circ$ and l'angle en élévation $\theta_c = 90^\circ$.

Ce mécanisme est justifié par la modélisation du bloqueur humain à travers un écran rectangulaire pour lequel la formule de diffraction est appliquée l'approche par diffraction met en évidence le fait que si le cluster est plus proche des bords étroits de l'écran, la puissance du signal est très faiblement atténuée. Et si le cluster rencontre le centre de l'écran, la puissance du signal est atténuée au maximum. La valeur de l'atténuation admet un axe symétrique dans chacun des deux plans, azimut et élévation par ϕ_c et θ_c , respectivement. Par conséquent, l'atténuation varie de 0 à 12.71 dB pour 28 GHz pour un bloqueur [35].

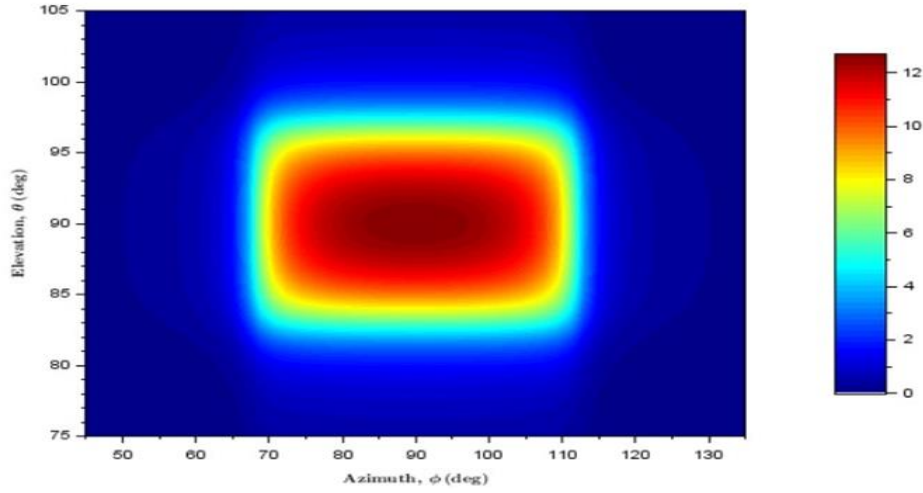


Figure II. 11 : Atténuation du signal due au blocage humain[35].

II.7 Étude des profils puissance-retard (PDP) avec et sans blocage humain

Les pertes introduites par le blocage humain, obtenues par mesure de la réponse fréquentielle sur une bande de 28 GHz, peuvent être aussi estimées en calculant la réponse impulsionnelle du canal. Celle-ci peut être calculée avec une résolution d'environ $\Delta \approx 1 / B$ qui est égale à 0,5 ns et pour un retard maximal de $\tau_{max} = (N - 1) \times \Delta = 100$ ns. Ceci permet d'obtenir le profil de puissance relative - retard (PDP) pour les différents scénarios considérés.

La figure II.12 montre le PDP relatif, c'est-à-dire le PDP normalisé par rapport à la valeur maximale calculée sur les premiers points fréquentiels. La valeur maximale (0 dB) est obtenue, comme prévu, dans le cas où les deux antennes sont en LOS (courbe bleue) et orientées l'une vers l'autre.

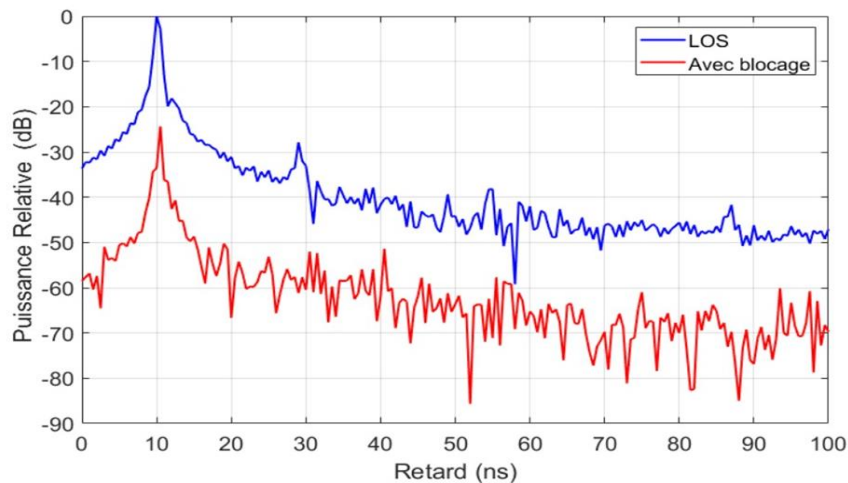


Figure II. 12 : PDP relatif avec et sans blocage humain [35].

Dans ce cas, le trajet direct arrive avec un retard de 10 ns, ce qui correspond bien à la distance $T_x - R_x$ de 3 m. Avec le bloqueur humain, on obtient une valeur de puissance relative d'environ -24,4 dB avec un retard de 10,5 ns (courbe rouge). Ce retard correspond à une distance de 3,15 m, soit une différence de marche par rapport au trajet direct de 0,15 m, les distances des trajets

réfléchis par les côtés et par la tête du bloqueur sont respectivement de 3,034m (avec un retard de 10.11ns) et de 3.14m (avec un retard de 10.47ns). En se basant sur ces calculs, le trajet réfléchi par la tête du bloqueur présente un retard de 10.47ns, très proche de celui obtenu par mesure avec un retard de 10.5ns. Par conséquent, on peut conclure que le trajet obtenu correspond à celui réfléchi par la tête du bloqueur. Ainsi, l'atténuation du blocage humain de 24.4 dB, obtenue en évaluant la puissance relative reçue, donne une valeur proche de celle calculée avec les pertes de puissance, qui est égale à 25.8 dB.

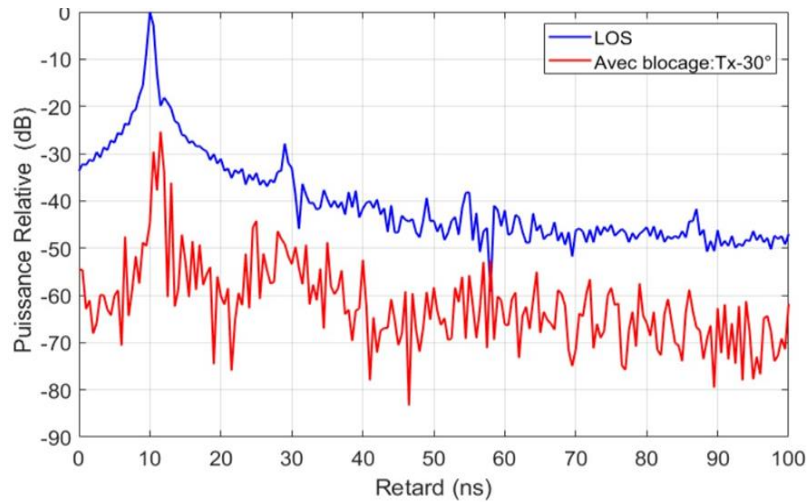


Figure II. 13 : PDP relatif avec blocage et l'antenne T_x déviée de 30° [35].

La figure II.13 donne une comparaison entre les trajets les plus forts dans le cas LOS et le cas où l'antenne T_x est orientée à 30° vers le milieu du panneau réfléchissant. On obtient une valeur de puissance relative d'environ -25.3dB avec un retard de 11.5ns, ce retard correspond au trajet réfléchi par le tableau blanc. Par rapport au cas de trajet direct bloqué, une légère augmentation de puissance relative de 0.9dB est observée. Ceci peut se justifier par le fait que nous avons utilisé des antennes directives et que le dérèglement d'une des antennes peut permettre au signal de contourner le bloqueur [36].

II.8 Modélisation de blocage quatre états

Une approche de modélisation linéaire par morceaux à quatre états est également utile pour caractériser le blocage avec les régions suivantes : non ombragé (unshadowed), ombragé (shadowed), déclin (decaying) et montée (rising) de niveau de signal déclin de non ombrager à ombrager, et une région de niveau de signal montée d'ombrager à non ombrager[39].

Le niveau de signal $SE(t)$ de l'événement de blocage (en dB) en fonction du temps est représenté par l'ensemble des équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 & r_{\text{decay}} \times t, & \text{for } 0 \leq t \leq \frac{SE_{\text{mean}}}{r_{\text{decay}}} \\
 & SE_{\text{mean}}, & \text{for } \frac{SE_{\text{mean}}}{r_{\text{decay}}} \leq t \leq tD - \frac{SE_{\text{mean}}}{r_{\text{rise}}} \\
 & SE_{\text{mean}} - r_{\text{rise}} \times t, & \text{for } tD - \frac{SE_{\text{mean}}}{r_{\text{rise}}} \leq t \leq tD \\
 & 0, & \text{otherwise}
 \end{aligned} \quad (II.8)$$

Où r_{decay} est le taux de déclin de la force du signal en dB/ms, t est le temps en ms depuis le début ($t = 0\text{ms}$) de l'événement de blocage, SE_{mean} est l'atténuation moyenne du signal de l'événement de blocage en dB, r_{rise} est le taux d'augmentation de la force du signal de l'événement de blocage en dB/ms, et tD est la durée de temps de décoloration de l'événement d'ombrage en ms [40].

Les taux r_{decay} et r_{rise} sont déterminés par le temps de déclin t_{decay} le temps de montée t_{rise} et soit un seuil prédéfini entre le dernier passage par zéro avant et le premier passage par zéro après la décoloration rapide du signal, soit strictement basé sur l'atténuation moyenne du signal de l'événement d'ombrage SE_{mean} , calculée sur l'intervalle $\left[\frac{1}{3}T_D < T < \frac{2}{3}T_D\right]$. Indépendamment de la méthode de seuil utilisée, l'atténuation moyenne du signal de l'événement de blocage SE_{mean} est déterminée sur le même intervalle. La figure II.14 montre un exemple d'un événement de blocage avec un seuil de SE_{mean} et la figure II.15. Illustre clairement les quatre événements d'ombrage avec des lignes colorées distinctes pour le même événement de blocage.

Le niveau de seuil sélectionné affectera les temps de déclin et de montée des événements de blocage, et par conséquent, influencera les taux de déclin et de montée de la force du signal [40].

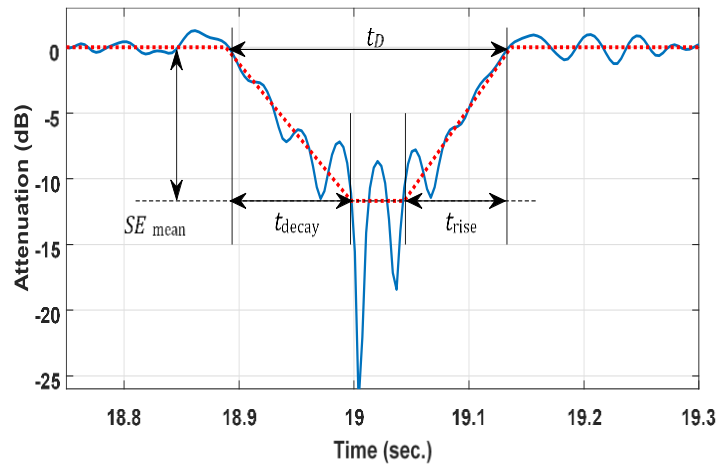


Figure II. 14 : Événement d'ombrage à quatre états avec un seuil de SE_{mean} [41].

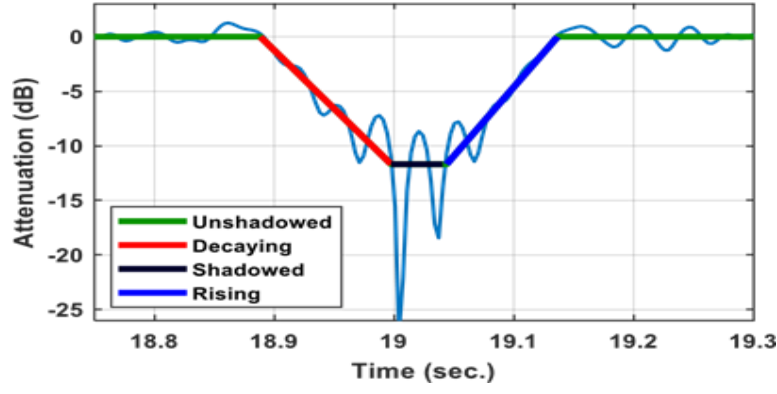


Figure II. 15 : Régions de l'événement d'ombrage à quatre états [41].

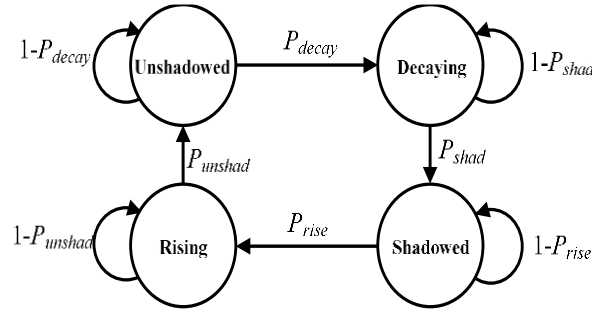


Figure II. 16 : Modèle de Markov à quatre états [41].

Le diagramme de la Fig. II. 16 représente les probabilités de transition qui sont définies comme suit : p_{decay} est la probabilité de passer d'un état non ombragé à un état de niveaux de signal déclin, p_{shad} est la probabilité de passer d'un état de niveaux de signal déclin à un état ombragé, p_{rise} est la probabilité de passer d'un état ombragé à un état de niveaux de signal montée, et p_{unshad} est la probabilité de passer d'un état de signal montée à un état non ombragé /non bloqué. La matrice de probabilité de transition pour le diagramme du modèle de Markov à quatre états de la Fig. II.16 avec l'espace [40].

$S = \{Unshadowed, Decaying, Shadowed, Rising\}$ est donnée par :

$$\begin{pmatrix} 1 - P_{decay} & P_{decay} & - & - \\ - & 1 - P_{shad} & P_{shad} & - \\ - & - & 1 - P_{rise} & P_{rise} \\ P_{unshad} & - & - & 1 - P_{unshad} \end{pmatrix} \quad (II.9)$$

La transition d'un état à un autre peut également être notée de manière linéaire par les équations données ci-dessous :

$$\lambda_{decay} = 0.2 \text{ sec} \quad (II.10)$$

$$\lambda_{shad} = 0.065 * HPBW(\text{m}) + 7.425 \text{ sec} \quad (II.11)$$

$$\lambda_{rise} = 0.05 * HPBW(\text{m}) + 7.35 \text{ sec} \quad (II.12)$$

$$\lambda_{unshad} = 6.7 \text{ sec} \quad (II.13)$$

Avec :

λ : Le taux de transition d'un état vers l'état suivant. Que nous puissions calculer à partir de la relation de probabilité de transition $p = \lambda \times t$ avec t c'est la résolution temporelle.

II.9 Conclusion

Les ondes millimétriques refont surface grâce à leurs avantages, notamment leur large bande passante qui permet d'augmenter les débits. Dans ce chapitre, nous avons examiné leurs caractéristiques générales et leur comportement.

Les ondes millimétriques sont un outil puissant qui contribue de manière significative à combler le déficit de bande passante mondial, et elles sont un élément clé dans le développement des réseaux mobiles de cinquième génération, élargissant considérablement la portée des services. Nous avons également abordé la description de l'impact du blocage dû aux interférences humaines et des mesures des canaux, avec leurs observations et résultats importants. En outre, nous avons discuté des modèles de blocage dans les modèles de canaux des ondes millimétriques des organismes de normalisation bien connus.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons les atténuations qui affectent ces ondes, telles que les conditions météorologiques, les différents obstacles, la vitesse de l'UT et la direction de ces atténuations, ce qui nécessite une étude approfondie à l'aide du simulateur NYUSIM.

Chapitre III : Simulation de l'effet blocage humain sur le réseau 5G

Chapitre III

Simulation de l'effet blocage humain sur le réseau 5G

III.1 Introduction

Le déploiement du réseau peut être limité par la portée du signal ou par la capacité du canal. Pour les services fixes, en raison des attributions de licences avec un spectre limité, la plupart des déploiements sont davantage limités par la capacité que par la portée, surtout dans les zones où il y a une grande perte de propagation. La ville de Chetma peut rencontrer des défis spécifiques lors du déploiement des réseaux 5G, notamment en ce qui concerne l'amélioration de la couverture et de la capacité. Pour étudier les divers effets, tels que les conditions météorologiques, les obstacles, la vitesse des utilisateurs, et l'impact du blocage humain, nous utiliserons le simulateur NYUSIM. Cet outil puissant permet de modéliser et d'analyser les canaux sans fil dans les réseaux 5G, fournissant des estimations de paramètres clés comme le retard, la dispersion, la puissance du signal et les effets multi-trajets.

Les paramètres de cohérence spatiale comme distribution des stations de base, Distance de cohérence spatiale sont essentiels dans la conception et l'optimisation des réseaux 5G, car ils influent sur la distribution des antennes, le retard et la puissance reçue, ce qui affecte directement les performances globales du système. De plus, l'impact du blocage humain peut considérablement influencer la qualité du signal, surtout dans les zones densément peuplées.

Dans ce chapitre, les résultats de l'analyse de l'impact du blocage humain pour l'environnement UMi (Urban Micro Cell), avec les fréquences de 28 et 104 GHz seront discutés afin d'améliorer la conception et le déploiement des réseaux 5G dans la ville de Chetma (à titre exemple). Cela inclut l'optimisation de la distribution des services sans fil et l'amélioration de l'expérience utilisateur finale, tout en tenant compte des effets de blocage humain pour garantir une communication fiable et efficace.

III.2 Étude de la nature du climat dans la ville de Chetma

III.2.1 Aperçu général

La ville de Chetma se situe dans la wilaya de Biskra en Algérie, bénéficie d'un climat sec caractérisé par des spécificités qui influencent la vie quotidienne et les activités économiques de la région. La figure III.1 présente la zone que nous allons étudier de la ville Chetma et voici des détails plus précis sur les conditions climatiques à Chetma :

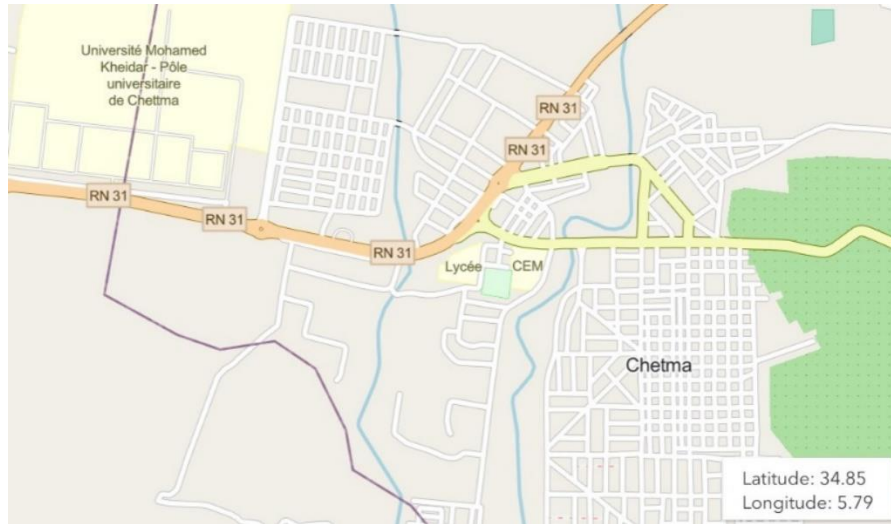


Figure III.1 : Carte de la zone à étudier (ville de Chetma).

III.2.2 Climat et météorologie

Le climat et la météorologie sont deux disciplines étroitement liées. La météorologie se concentre sur les conditions atmosphériques à court terme, telles que la température, l'humidité et les précipitations, et vise à prévoir le temps qu'il fera dans les jours ou les semaines à venir. Le climat analyse les tendances à long terme pour comprendre les régimes climatiques.

III.2.2.1 Températures

La température est une mesure de la chaleur ou du froid d'un corps ou d'un environnement, déterminant la quantité d'énergie thermique présente.

- *Été* : Chetma connaît des températures élevées durant l'été, atteignant environ 30°C au pic de la chaleur, avec des maxima pouvant dépasser 35°C certains jours.
- *Hiver* : En hiver, les températures sont plus modérées, variant entre 5 et 15°C, ce qui rend l'atmosphère plus fraîche.

Les statistiques de la température [41] durant la période 2013-2022 dans la ville de Chetma sont données par le tableau III.1.

Tableau III.1 : Températures en [°C] (statistiques 2013-2022) [41].

Année	JANV	FÉVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	Moyenne
2013	26.52	23.24	25.74	30.79	24.48	27.27	158.04
2014	19.80	24.05	21.39	24.73	27.39	27.86	145.22
2015	22.22	21.38	26.39	29.58	30.11	22.14	151.82
2016	21.34	22.74	28.27	26.64	35.54	27.54	162.07

2017	18.11	23.96	23.67	24.65	23.07	27.56	141.02
2018	23.98	25.53	27.80	26.52	30.19	28.40	162.42
2019	19.88	21.09	22.15	26.37	25.69	29.03	144.21
2020	17.65	26.15	25.66	23.55	24.62	23.52	141.15
2021	27.65	22.57	22.14	30.05	29.47	26.08	157.96
2022	20.39	21.38	22.79	27.38	30.62	27.82	150.38
Année	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DÉC	Moyenne
2013	22.22	21.38	21.63	23.04	26.90	17.06	132.23
2014	23.86	19.27	22.29	23.11	18.06	19.96	126.55
2015	22.62	23.88	23.38	26.09	21.73	18.28	135.98
2016	24.68	21.06	22.49	22.78	22.66	17.43	131.10
2017	28.25	21.74	24.02	18.87	23.95	20.98	137.81
2018	20.93	19.98	25.41	25.14	19.49	22.14	133.09
2019	23.72	23.50	18.23	20.56	22.51	21.35	129.87
2020	26.22	23.37	23.43	25.44	20.45	20.71	139.62
2021	25.85	20.48	20.18	22.05	28.30	23.46	140.32
2022	23.10	21.55	28.41	19.26	22.68	18.77	133.77
							55.31

III.2.2.2 Précipitations

Les précipitations désignent toute forme d'eau qui tombe de l'atmosphère vers la surface terrestre.

- *Saison des pluies* : La majorité des précipitations à Chetma se produisent dans les mois entre octobre et avril, avec des pluies plus fréquentes en hiver. Pendant cette période, les quantités de pluie peuvent atteindre 10,66 mm pour certains mois.
- *Saison sèche* : En été, les niveaux de précipitations diminuent considérablement, entraînant un assèchement du sol et une augmentation des besoins en gestion de l'eau.

Les statistiques de la précipitation [41] durant la période 2013-2022 dans la ville de chetma sont donnés par le tableau III.2.

Tableau III.2 : Précipitations [mm/j] (statistiques 2013-2022) [41].

Année	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	Moyenne
2013	0.77	0.42	0.75	1.76	0.39	0.32	4.41
2014	1.07	0.13	1.31	0.04	0.83	0.66	4.04
2015	0.17	0.61	0.20	0.00	0.09	0.64	1.71
2016	0.04	0.25	0.35	1.88	0.73	0.01	3.26
2017	0.53	0.08	0.12	0.85	0.58	0.38	2.54
2018	0.11	0.51	1.06	0.38	1.39	0.02	3.47
2019	0.16	0.03	1.18	1.93	0.55	0.00	3.85
2020	0.40	0.00	2.23	1.68	0.48	0.14	4.93
2021	0.10	0.16	0.43	0.38	1.15	0.18	2.40
2022	0.01	0.84	0.80	0.82	0.44	0.13	3.04
Année	JULT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DÉC	Moyenne
2013	0.50	0.97	0.53	1.06	0.49	1.16	4.71
2014	0.03	0.03	1.01	0.11	0.69	0.23	2.10
2015	0.00	0.85	1.28	1.59	0.43	0.00	4.15
2016	0.04	0.06	2.26	0.15	1.13	0.40	4.04
2017	0.01	0.00	0.17	0.85	0.35	0.32	1.70
2018	0.02	0.36	0.35	2.09	0.28	0.06	3.16
2019	0.02	0.89	0.84	0.43	1.52	0.82	4.52
2020	0.10	0.05	1.69	0.01	0.25	0.53	2.63
2021	0.00	0.05	0.37	0.16	0.77	0.08	1.43
							0.58

III.2.2.3 Humidité

L'humidité mesure la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air, influençant les conditions météorologiques et la sensation de chaleur [42].

Humidité : Le taux d'humidité à Chetma varie entre 20% et 40%, ce qui influence la sensation de chaleur pendant l'été. Les statistiques de l'humidité [41] durant la période 2013-2022 dans la ville de Chetma sont donnés par le tableau III.3.

Tableau III.3: Humidité en [%] (statistiques 2013-2022) [41].

Année	JANV	FÉEB	MARS	AVR	MAI	JUIN	Moyenne
2013	64.80	59.61	54.10	44.10	40.92	30.03	293.56
2014	64.90	58.90	56.02	39.19	37.72	34.05	290.78
2015	64.44	62.30	49.31	33.22	29.00	31.59	269.86
2016	59.74	54.99	45.87	42.72	33.87	30.06	267.25
2017	67.69	54.00	41.18	44.33	37.30	33.26	277.76
2018	60.65	61.14	53.39	41.91	44.13	31.14	292.36

2019	68.96	52.71	43.66	47.03	42.21	24.57	279.14
2020	60.70	46.13	56.35	54.97	37.80	32.60	288.55
2021	63.35	51.47	46.97	41.57	39.87	26.98	270.21
2022	56.15	51.44	55.39	44.37	36.71	20.31	264.37
Année	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DÉC	Moyenne
2014	24.58	26.62	37.51	40.69	53.77	70.01	253.18
2015	23.25	34.88	42.40	54.02	58.92	57.61	271.08
2016	25.31	29.41	39.84	46.24	58.02	70.16	268.98
2017	24.25	25.13	37.49	49.94	52.07	68.69	257.57
2018	20.70	37.21	36.45	54.23	59.92	62.75	271.26
2019	23.79	29.41	47.91	49.44	64.05	63.77	278.37
2020	27.55	24.91	48.67	41.30	57.36	67.07	266.86
2021	20.32	20.77	32.05	46.45	62.02	65.46	247.07
2022	23.82	26.39	34.92	43.33	50.63	58.32	237.41
							48.96

III.2.2.4 La pression atmosphérique

La pression atmosphérique, qui est la force exercée par l'air sur une surface donnée. La pression atmosphérique à Chetma influence les précipitations : une pression basse favorise les conditions nuageuses et les pluies, tandis qu'une pression élevée est associée à un temps clair et sec. Les statistiques de la pression atmosphérique [41] durant la période 2013-2022 dans la ville de Chetma sont donnés par le tableau III.4.

Tableau III.4: La pression atmosphérique en [KPa] (statistiques 2013-2022) [41].

Année	JANV	FÉVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	Moyenne
2013	97.33	97.00	96.56	96.81	96.77	97.06	581.53
2014	97.16	97.24	97.03	96.94	96.96	97.00	582.33
2015	97.66	96.97	97.23	97.37	97.12	97.09	583.44
2016	97.77	97.45	96.89	96.72	96.94	96.96	581.73
2017	97.38	97.48	97.34	97.15	97.07	97.04	582.46
2018	97.69	96.80	96.58	96.83	96.77	96.88	582.65
2019	97.19	97.77	97.51	96.76	96.87	96.94	582.04
2020	97.97	97.99	97.05	97.00	97.10	96.90	584.01
2021	97.25	97.59	97.46	96.89	97.06	96.98	582.23
2022	97.96	97.76	97.22	96.70	97.14	96.98	583.76
Année	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DÉC	Moyenne
2013	97.08	97.03	97.16	97.35	97.05	97.85	583.52
2014	96.92	96.93	97.09	97.32	97.00	97.56	582.82
2015	97.05	97.03	97.08	97.15	97.76	98.50	585.57
2016	97.12	97.19	97.23	97.23	97.24	97.94	585.95

2017	97.09	97.13	97.20	97.62	97.33	97.79	581.53
2018	96.92	97.05	97.34	97.03	97.22	97.92	585.16
2019	96.90	97.02	97.23	97.24	96.86	97.42	582.67
2020	96.99	96.89	97.17	97.33	97.69	97.10	583.17
2021	96.93	96.95	97.16	97.32	97.01	97.55	582.92
2022	97.11	96.86	96.95	97.68	97.40	97.27	583.27
							105.296

Pour calculer le taux annuel des conditions atmosphériques, nous avons utilisé les équations suivantes :

L'équation III.1 donne le calcul du taux de pression atmosphériques annuel :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{2022}^{2013} P_{AN}}{10} = 105.296 [KPa] = 1052.96 [mbar] \quad (III.1)$$

L'équation III.2 donne le calcul du taux de l'humidité annuel :

$$H_{moy} = \frac{\sum_{2022}^{2013} H_{AN}}{10} = 48.96 [\%] \quad (III.2)$$

L'équation III.3 donne le calcul du taux de température annuel :

$$T_{moy} = \frac{\sum_{2022}^{2013} T_{AN}}{10} = 55.31 [^{\circ}C] \quad (III.3)$$

L'équation III.4 donne le calcul du taux de précipitations annuel :

$$PREC_{moy} = \frac{\sum_{2022}^{2013} PREC_{AN}}{10} = 0.58[mm/jour] = 0.024[mm/hr] \quad (III.4)$$

III.3 Présentation de simulation NYUSIM v4.0

NYUSIM v4.0 est un simulateur de canal radio avancé utilisé pour modéliser et évaluer les performances des systèmes de communication sans fil, en particulier dans les environnements urbains complexes.

III.3.1 Introduction sur le simulateur

L'interface NYUSIM est un simulateur qui travaille sous MATLAB, développé sur la base de mesures approfondies des canaux de propagation à large bande pour les ondes millimétriques (mmWave) et sub-téraherzt (THZ) dans divers scénarios environnementaux. Il utilise des fréquences porteuses allant de 500 MHZ jusqu'à 100 GHZ et une largeur de bande RF de 0 à 800MHZ, pour générer des réponses de canal temporelles et spatiales réalistes. Cela permet de soutenir des simulations fidèles des couches physiques et de liaison, ainsi que de concevoir des systèmes de communication cellulaire (5G) [42].

Les chercheurs ont étudié des modèles de canaux omnidirectionnels pour la conception de systèmes sans fil. Cependant, l'utilisation de canaux directionnels est essentielle pour concevoir et

mettre en œuvre des modèles de réseaux d'antennes, afin d'exploiter la diversité spatiale et la formation de faisceaux MIMO [43].

III.3.2 Paramètres d'entrées

Il y a 49 paramètres d'entrée dans le simulateur de canal, qui sont regroupés en catégories principales : Paramètres de canal, Propriétés de l'antenne, Paramètres de cohérence spatiale et Paramètres de blocage humain comme indiqué sur l'interface graphique de la figure III.2. Le panneau de paramètres de canal contient 18 paramètres d'entrée fondamentaux sur le canal de propagation, comme énumérés et expliqués ci-dessous :

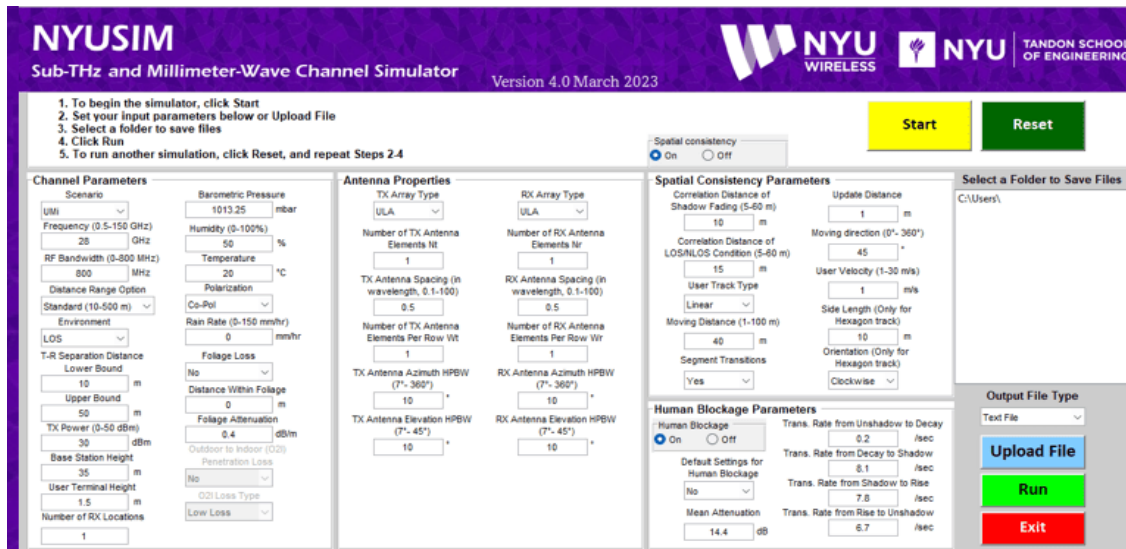


Figure III.2 : Interface utilisateur graphique (GUI) du simulateur de NYUSIM 4.0.

III.3.2.1 Les paramètres de canal

1. *Fréquence (GHZ)* : paramètre modifiable indiquant la fréquence porteuse en GHZ. La valeur par défaut est 28GHZ, et elle peut varier de 0.5 à 150GHZ.
2. *RF Bande passante (MHZ)* : paramètre modifiable indiquant la largeur de bande RF du signal transmis en MHZ. La valeur par défaut est de 800MHZ, et il peut varier de 0 à 800MHZ.
3. *Scénarios* : un paramètre sélectionnable indiquant le scénario. Quatre options UMi (Urban Micro), UMA (Urban Macro), RMa (Rural Macro) et InH (Indoor Hotspot) et InF(Indoor Factor) sont applicables.
4. *Environnement* : un paramètre sélectionnable indiquant la visibilité dans l'environnement, soit en visibilité directe (LOS) ou non visibilité directe (NLOS).
5. *la distance de séparation T-R (m) (Limite inférieure)* : un paramètre modifiable désignant la plus petite distance entre l'émetteur (TX) et récepteur (RX) en m. La valeur par défaut est de 10m et peut varier de 10m à 50m.

6. *la distance de séparation T-R (m) (Limite supérieure)* : un paramètre modifiable indiquant la plus grande distance entre le TX et le RX en m. La valeur par défaut est 50m et peut être modifiée de 10m à 50m pour la portée standard.
7. *Puissance d'émission (TX)* : paramètre modifiable indiquant la puissance d'émission en dBm la valeur par défaut est 30dBm et peut être réglée sur n'importe quelle valeur allant de 0 à 50dBm.
8. *Hauteur de la station de base (m)* : un paramètre modifiable indiquant la hauteur de la station de base, la valeur par défaut est 35m, et peut être réglée sur toute valeur comprise entre 10 et 150m.
9. *Pression barométrique* : un paramètre modifiable indiquant la pression barométrique en mbar utilisée pour l'évaluation de l'affaiblissement sur le trajet de propagation induit à l'air sec ; la valeur typique par défaut est de 1013.25mbar, et peut varier de 105 à 1015.25mbar.
10. *Humidité* : paramètre modifiable indiquant l'humidité relative de l'air en pourcentage (%), utilisé dans l'évaluation de l'affaiblissement de propagation induit par la vapeur. La valeur par défaut est de 50%, et peut être réglée à n'importe quel nombre entre 0 et 100%.
11. *Température* : paramètre modifiable indiquant la température en degrés Celsius (°C), utilisé pour évaluer l'affaiblissement sur le trajet de propagation induit par le brouillard la valeur typique par défaut est de 20°C, et peut varier de -100°C à 50°C.
12. *Intensité de la pluie* : paramètre modifiable indiquant le taux de pluie en (mm/h), utilisé dans l'évaluation de l'affaiblissement du trajet de propagation induit par la pluie. La valeur par défaut est de 0mm/h et la plage typique est de 0 à 150mm/h.
13. *Polarisations* : paramètres sélectionnables indiquant la relation de polarisation entre les antennes TX et RX ou les réseaux d'antennes. Le réglage par défaut, est Co-Pol (Co polarisation), et peut être changé en X-Pol (polarisation croisée).
14. *Atténuation du feuillage* : paramètre modifiable indiquant la perte de propagation induite par le feuillage en (dB/m). La valeur par défaut est 0, 4dB/m sur la base des résultats de la mesure, et peut être réglé sur n'importe quelle valeur entre 0 et 10dB/m.
15. *Distance à l'intérieur du feuillage* : un paramètre modifiable représentant la distance en (m) durant laquelle le signal transmis se déplace à l'intérieur du feuillage. La valeur par défaut est 0m, et peut être réglée sur n'importe quelle valeur non négative ne dépassant pas la limite inférieure de la distance de séparation T-R.

16. Nombre d'emplacements de réception (RX) : un paramètre modifiable indiquant le nombre d'emplacements RX, Il peut s'agir de n'importe quel nombre entier positif la valeur par défaut est 1 récepteur, et peut être réglé sur n'importe quel nombre entier de 1 à 10000. [44]

Channel Parameters	
Scenario UMi	Barometric Pressure 1013.25 mbar
Frequency (0.5-150 GHz) 28 GHz	Humidity (0-100%) 50 %
RF Bandwidth (0-800 MHz) 800 MHz	Temperature 20 °C
Distance Range Option Standard (10-500 m)	Polarization Co-Pol
Environment LOS	Rain Rate (0-150 mm/hr) 0 mm/hr
T-R Separation Distance Lower Bound 10 m	Foliage Loss No
Upper Bound 50 m	Distance Within Foliage 0 m
TX Power (0-50 dBm) 30 dBm	Foliage Attenuation 0.4 dB/m
Base Station Height 35 m	Outdoor to Indoor (O2I) Penetration Loss No
User Terminal Height 1.5 m	O2I Loss Type Low Loss
Number of RX Locations 1	

Figure III.3 : Interface des paramètres de canal.

L'interface « propriétés des antennes » contient 12 paramètres d'entrée liés aux réseaux d'antennes TX et RX, comme indiqué et expliqué ci-dessous :

III.3.2.2 Propriétés d'antennes

1. Type de réseau d'antennes d'émission (TX) : un paramètre sélectionnable indiquant le réseau d'antennes TX. Le réseau par défaut est ULA (Uniform Linear Array), et peut être changé en URA (Uniform Rectangular Array).

2. Type de réseau d'antennes d'réception (RX) : un paramètre sélectionnable indiquant le réseau d'antennes RX. Le type le réglage par défaut est ULA et peut être modifié en URA.

3. Nombre d'éléments d'antenne Tx (N_t) : un paramètre modifiable indiquant le nombre total d'éléments d'antenne TX dans le réseau ; la valeur par défaut est 1 élément, et peut être réglé sur n'importe quel entier de 2^1 à 2^7 .

4. Nombre d'éléments d'antenne Rx (N_r) : un paramètre modifiable indiquant le nombre total d'éléments d'antenne RX dans le réseau la valeur par défaut est 1 élément, et peut être règle sur n'importe quel entier de 2^1 à 2^7 .

5. *TX Espacement des antennes (en longueur d'onde)* : un paramètre modifiable indiquant l'espacement entre les antennes TX adjacentes dans le réseau en termes de la longueur d'onde de la porteuse. La valeur par défaut est 0.5λ , et peut être réglée sur n'importe quelle valeur positive jusqu'à une décimale de 0.1λ à 100λ .
6. *RX Espacement des antennes (en longueur d'onde)* : un paramètre modifiable indiquant l'espacement entre les antennes RX adjacentes dans le réseau en termes de la longueur d'onde de la porteuse, la valeur par défaut est 0.5λ et peut être réglée sur n'importe quelle valeur positive avec jusqu'à une décimale de 0.1λ à 100λ .
7. *Nombre d'éléments d'antenne Tx par rangée* : paramètre modifiable indiquant le nombre d'antennes TX dans une dimension (vecteur) lorsque le type de tableau est ULA ou URA, qui devrait diviser le nombre de TX éléments d'antenne. La valeur par défaut est 1 vecteur.
8. *Nombre d'éléments d'antenne Rx par rangée* : un paramètre modifiable indiquant le nombre d'antennes RX dans une dimension (vecteur) lorsque le type de tableau est ULA ou URA, qui devrait diviser le nombre de RX éléments d'antenne. La valeur par défaut est 1 vecteur.
9. *TX Azimut de l'antenne HPBW (degrés)* : un paramètre modifiable indiquant l'Angle d'ouverture de faisceau en azimute (HPBW) de l'antenne TX en degrés. La valeur par défaut est 10° et peut être réglée sur n'importe quelle valeur de 7° à 360° .
10. *TX Élévation de l'antenne HPBW (degrés)* : un paramètre modifiable indiquant l'élévation HPBW de l'antenne TX (réseau) en degrés. La valeur par défaut est 10° , et peut être réglée sur n'importe quelle valeur de 7° à 45° .
11. *RX Azimut de l'antenne HPBW (degrés)* : un paramètre modifiable indiquant l'azimut HPBW de l'antenne RX (réseau) en degrés. La valeur par défaut est 10° , et peut être réglée sur n'importe quelle valeur de 7° à 360° .
12. *RX Élévation de l'antenne HPBW (degrés)* : un paramètre modifiable indiquant l'élévation HPBW de l'antenne RX (réseau) en degrés la valeur par défaut est 10° , et peut être réglée sur n'importe quelle valeur de 7° à 45° . [44]

Antenna Properties	
TX Array Type	RX Array Type
ULA	ULA
Number of TX Antenna Elements N_t	Number of RX Antenna Elements N_r
1	1
TX Antenna Spacing (in wavelength, 0.1-100)	RX Antenna Spacing (in wavelength, 0.1-100)
0.5	0.5
Number of TX Antenna Elements Per Row W_t	Number of RX Antenna Elements Per Row W_r
1	1
TX Antenna Azimuth HPBW (7° - 360°)	RX Antenna Azimuth HPBW (7° - 360°)
10 $^\circ$	10 $^\circ$
TX Antenna Elevation HPBW (7° - 45°)	RX Antenna Elevation HPBW (7° - 45°)
10 $^\circ$	10 $^\circ$

Figure III.4 : Interface propriétés des antennes.

III.3.2.3 Cohérence spatiale

L'interface de Cohérence Spatiale contient 10 paramètres liés à l'implémentation de la cohérence spatiale :

1. *Distance de corrélation de l'ombre (5-60 m)* : définit la distance à laquelle l'effet d'ombre (shadow fading) sur le signal est considéré comme corrélé ou lié .Valeur par défaut :10 m.
2. *Distance de corrélation des conditions LOS/NLOS (5-60 m)* : utilisée pour générer des valeurs corrélées spatialement pour les conditions de visibilité (LOS ou NLOS).
3. *Type de trajectoire de l'UT* : deux options disponibles, « Linéaire » et « Hexagone », avec « Linéaire » comme valeur par défaut.
4. *Distance de trajectoire (1-100 m)* : définit la longueur du chemin de l'UT, ne devant pas dépasser le périmètre de l'hexagone.
5. *Distance de Mise à Jour (<1 m)* : définit l'intervalle entre deux instants de canal, avec une valeur par défaut de 1 m.
6. *Direction de Déplacement (0° - 360°)* : détermine la direction initiale de l'UT, valeur par défaut est de 45° .
7. *Vitesse de l'UT (1-30 m/s)* : définit la vitesse de l'UT, valeur par défaut : 1 m/s.
8. *Longueur de Côté* : définit la longueur du côté de la trajectoire hexagonale, applicable uniquement pour le chemin « Hexagone ».

9. Orientation : détermine l'orientation de la trajectoire hexagonale, avec deux options : « Horaire » et « Anti-horaire ».

10. Transitions de Segment : indique si les transitions entre segments sont fluides, avec les options « Oui » et « Non ». [44]

Spatial Consistency Parameters	
Correlation Distance of Shadow Fading (5-60 m)	Update Distance
10 m	1 m
Correlation Distance of LOS/NLOS Condition (5-60 m)	Moving direction (0° - 360°)
15 m	45 °
User Track Type	User Velocity (1-30 m/s)
Linear ▾	1 m/s
Moving Distance (1-100 m)	Side Length (Only for Hexagon track)
40 m	10 m
Segment Transitions	Orientation (Only for Hexagon track)
Yes ▾	Clockwise ▾

Figure III.5 : Interface de cohérence spatiale.

III.3.2.4 Blocage humain

L'interface concernant le « blocage humain » contient 6 paramètres d'entrée liés à la perte par atténuation due au blocage par le corps humain d'une personne près de son (UT). Le calcul de l'effet du blocage humain peut être activé ou désactivé dans le simulateur NYUSIM.

Paramètres par défaut pour le blocage humain : une option sélectionnable avec deux choix possibles, « Oui » et « Non » [45].

Si l'utilisateur choisit « Oui », les taux de transition et l'atténuation moyenne sont ajustés automatiquement par le programme, en fonction d'un ajustement linéaire aux données, avec des modifications apportées lorsque l'HPBW de l'antenne change. En revanche, si l'utilisateur choisit « Non », les taux de transition et l'atténuation moyenne sont modifiés selon les préférences de l'utilisateur, en se basant sur les critères du modèle de Markov [46].

1. Atténuation moyenne : un paramètre modifiable désignant l'atténuation moyenne de blocage SE_{mean} . La valeur par défaut est de 14,4 dB.

2. Taux de transition de l'état non ombragé à l'état de déclin [1/s] : un paramètre modifiable désignant le taux de transition de l'état non ombragé (Unshadowed) à l'état de déclin (Decay). La valeur par défaut est de 0,20/s lorsque l'HPBW de l'antenne RX est de 10°.

3. Taux de transition de l'état de déclin à l'état ombragé [/s] : un paramètre modifiable désignant le taux de transition de l'état de déclin (Decay) à l'état ombragé (shadowed). La valeur par défaut est de 8,08/s lorsque l'HPBW de l'antenne RX est de 10°.

4. Taux de transition de l'état ombragé à l'état de monter [/s] : un paramètre modifiable désignant le taux de transition de l'état ombragé (shadowed) à l'état de monter (Rise). La valeur par défaut est de 7,85/s lorsque l'HPBW de l'antenne RX est de 10°.

5. Taux de transition de l'état de monter à l'état non ombragé [/s] : un paramètre modifiable désignant le taux de transition de l'état de monter (Rise). À l'état non ombragé (Unshadowed). La valeur par défaut est de 6,70/s lorsque l'HPBW de l'antenne RX est de 10° [44].

Figure III.6 : Interface de blocage humain.

III.4 Les applications de NYUSIM pour l'analyse de système MIMO à ondes millimétriques

Les fichiers de sortie et les données de NYUSIM peuvent être utilisés de différentes manières en fonction des besoins des utilisateurs, par exemple : pour simuler des CIR (Channel Impulse Response) pour des systèmes mmWave, étudier la qualité du canal en MIMO, et simuler le taux d'erreur binaire (BER). De plus, il est possible d'analyser l'impact des obstacles humains sur les signaux sans fil, car la présence de personnes dans l'environnement affecte la qualité de la communication et les performances du réseau, nécessitant des études précises pour déterminer comment le mouvement des personnes et les obstacles influencent les ondes mmWave.

III.4.1 Modèle de perte du trajet de chemin à grande échelle (LSP)

NYUSIM utilise des modèles de PL (Path Loss) à grande échelle pour estimer la puissance reçue en fonction de la distance par rapport à l'émetteur Tx. Ces modèles ont des paramètres comme l'exposant de perte de chemin (PLE) et l'ombrage qui reflètent les caractéristiques de variation lente du canal sans fil dans le temps et l'espace. Le modèle PL de référence « Close IN

CI », qui suppose une distance de référence de 1 m, est utilisé pour calculer le PL dans les microcellules urbaines (UMi), est employé dans NYUSIM, qui est formulé selon l'équation III.5 :

$$PL^{CI}(f, d)_{[dB]} = FSPL(f, 1m)_{[dB]} + 10 \log_n(d) + AT_{[dB]} + X_{\sigma}^{CI} \quad (III.5)$$

Avec :

f : Fréquence de la porteuse en GHz.

d : distance de séparation T-R .

n : L'exposant sur affaiblissement de trajet (PLE).

AT : Terme d'atténuation induit par l'atmosphère.

X_{σ}^{CI} : Variable gaussienne aléatoire de moyenne zéro avec une déviation standard en dB.

$FSPL(f, 1m)$: Perte de trajectoire dans l'espace libre en dB à une distance de séparation T-R de 1m et une fréquence porteuse f .

$$FSPL(f, 1m)_{[dB]} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f 10^9}{c} \right) = 32.4_{[dB]} + 20 \log_{10}(f) \quad (III.6)$$

Avec :

c : la vitesse de la lumière.

$$AT_{[dB]} = \alpha_{[dB/m]} \times d_{[m]} \quad (III.7)$$

Où :

α est le facteur d'atténuation en dB/m [1GHZ à 100GHZ] qui comprend les effets d'atténuation.

d : distance de séparation [47].

III.4.2 Modèle de perte de chemin à petite échelle (SSP)

Les paramètres à petite échelle englobent : les angles, les délais et la puissance de chaque composante de chemin multi-trajet (MPC), qui doivent être actualisés de manière réaliste en fonction de la trajectoire de (UT) à chaque instant dans le canal. NYUSIM utilise une approche géométrique pour mettre à jour ces paramètres à petite échelle [48] :

- Actualisation des angles.
- Actualisation des délais.
- Actualisation des puissances.

III.4.3 Profil de retard de puissance (PDP)

Dans la conception des systèmes de télécommunications sans fil, il est crucial de gérer l'interférence inter-symbole (ISI) ainsi que, le taux d'erreur binaire (BER). L'ISI est étroitement lié aux effets des trajets multiples causés par divers objets (murs, meubles, personnes, etc.) sur le chemin de propagation entre l'émetteur et le récepteur. Ces trajets multiples se caractérisent par un profil de retard de puissance (PDP). L'étalement du délai dans le canal de propagation radio

constitue une mesure du PDP, qui peut avoir un impact négatif sur la performance du système [49]

III.5 Étude du système MIMO dans des environnements NLOS/LOS à Chetma

Dans Cette étude, nous avons choisi le scénario UMi qui reflète la cellule convenable pour la ville de Chetma. L'étude doit prendre en considération les deux types d'environnements LOS et NLOS. Le système choisi dans cette simulation est le MIMO 4×4 avec le chemin linéaire ce qui signifie que l'utilisateur suit une trajectoire linéaire à un angle donné, sans effectuer de tourner ni modifier sa trajectoire. L'étude du ce système est réalisé pour différents cas d'azimut des antennes aux fréquences de 28 et 104 GHZ.

III.6 Environnement de simulation des résultats

Notre étude se concentre principalement sur l'impact de la perte de blocage humain sur les bandes mmWave de 28 et 104 GHZ. Nous avons considéré une fréquence porteuse de 28 et 104 GHZ dans 2 environnements UMi (LOS et NLOS) avec une largeur de bande RF de 800 MHz. Une plage de distance standard (10-500 m), avec une distance maximale de 10 m et une séparation minimale de 10 m. La puissance de l'émetteur est fixée à 30 dBm, avec une hauteur d'émetteur de 35 m et une hauteur de terminal utilisateur de 1,5 m. Le nombre de récepteurs est fixé à 1.

En ce qui concerne les conditions environnementales, une pression barométrique de 1052,96 mbar, avec une humidité de 48,96 % et une température de 55,31 °C et un taux de pluie 0,024mm/hr. De même, une atténuation de feuillage de 0,4 dB/m a été sélectionnée, et la perte de pénétration O2I (Outdoor to Indoor) n'est pas prise en considération dans notre étude.

En ce qui concerne les propriétés des antennes, le type d'antenne émettrice et réceptrice c'est ULA, avec 4 éléments d'antenne de chaque côté. L'espacement entre les antennes de l'émetteur et du récepteur est maintenu à $0,5\lambda$, tandis que l'azimut de l'antenne pour l'émetteur et le récepteur est fixé à 10°.

En ce qui concerne les paramètres d'ombrage humain : l'atténuation est fixée à 14,4 dB, tandis que le taux de transition de non ombragé au déclin est de 0,20/s, le taux de transition du déclin à l'ombre est de 8,10/s, le taux de transition de l'ombre à monter est de 7,80/s, et le taux de transition de montée à non ombragé est de 6,70/s. Ces propriétés sont résumées dans les tableaux III.5-8.

Tableau III.5 : Valeurs fixées pour les paramètres de canal.

Paramètre	Valeurs
Scenario	UMI
Frequency	28 GHZ/104GHZ
RF bandwidth	800 (MHZ)
Distance range option	Standard (10-500 m)
Environment	LOS/NLOS
Lower bound	100 (m)
Upper bound	100 (m)
TX power	30 (dBm)
Base station height	35 (m)
User terminal height	1.5 (m)
Number of RX location	1
Barometric pressure	1052.96 (mbar)
Humidity	48.96 %
Temperature	55.31 °C
Polarization	CO-Polarisation
Rain rate	0.024 (mm/hr)
Foliage loss	No
Distance whithin Foliage	0 (m)
Foliage attenuation	0.4 (dB/m)

Tableau III.6 : Valeurs fixés pour les propriétés des antennes TX/RX.

Paramètre	Valeurs
TX Array type	ULA
Number of TX antenna	4
TX antenna spacing	0.5 λ
Number of TX antenna elements per row WT	4
TX antenna Azimuth HPBW	10°
TX antenna Elevation HPBW	10°
RX Array type	URA
Number of RX antenna	4
RX antenna spacing	0.5 λ
Number of RX antenna elements per row WT	4
RX antenna Azimuth HPBW	10°
RX antenna Elevation HPBW	10°

Tableau III.7 : Valeurs des paramètres de cohérence spatiale.

Paramètres	Valeurs
Correlation distance of shadow fading SF	10 (m)
Correlation distance of LOS/NLOS condition	15 (m)
User track type	Linear
Moving distance	40 (m)
Segment transitions	Yes
Update distance	1(m)
Moving direction	45°
User velocity	1(m/s)
Side length	10 (m)
Orientation	Clockwise

Tableau III.8 : Valeurs des paramètres de blocage humain.

Paramètres	Valeurs
Trans.Rate from Unshadow to Decay /sec	0.2
Trans.Rate from Decay to shadow /sec	8.1
Trans.Rate from shadow to Rise /sec	7.8
Trans.Rate from Rise to Unshadow /sec	6.7
Mean Attenuation	14.4 dB
Default Settings for Human Blockage	No

III.7 Évaluation des performances des systèmes MIMO dans les canaux LOS/NLOS à 28 et 104 GHz

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'apport de la technologie MIMO pour améliorer les performances des communications sans fil dans des environnements LOS/NLOS opérant à 28 et 104 GHz.

III.7.1 Carte d'intensité d'évanouissement de l'ombre spatialement corrélé (dB)

Une carte d'intensité du phénomène de décoloration des ombres représente visuellement la variation de la lumière et de l'obscurité dans un environnement donné, influencée par des obstacles comme des bâtiments et des personnes.

La ligne blanche (figure III.7) représente la direction dans laquelle se déplace l'UT. La direction peut affecter la qualité du signal reçu par l'UT, Si l'UT se déplace vers des zones avec une décoloration plus élevée (zones bleues) il peut rencontrer des difficultés de connexion c'est-à-dire que la qualité de connexion peut se détériorer. En revanche, si l'UT se déplace vers une zone meilleure (comme les zones jaunes), le signal sera plus fort. Les résultats diffèrent entre LOS et

NLOS, car plus la distance entre l'UT et l'émetteur (comme la tour de communication) augmente, plus le signal s'affaiblit. De plus, les obstacles présents dans un environnement NLOS ont un impact significatif.

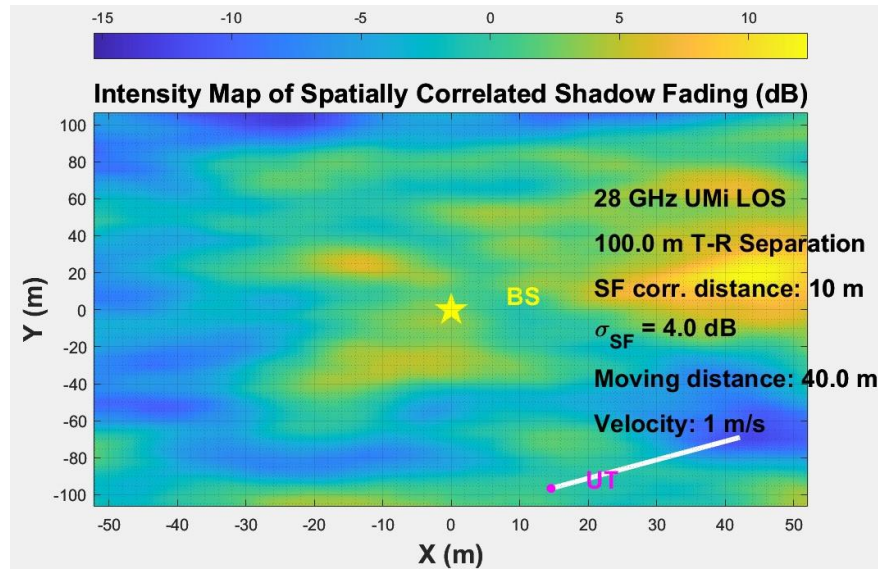


Figure III.7 : Carte spatialement corrélée du SF pour la fréquence 28 GHz.

III.7.2 Carte des conditions LOS/NLOS

La carte (figure III.8) montre les zones de visibilité directe (LOS) et visibilité indirecte (NLOS) entre l'UT et la BS. La couleur noire représente les zones où il y a une atténuation importante (signal faible). La couleur blanche représente des zones où il n'y a ni interférences ni des obstacles. Les zones blanches sont supposées fournir une bonne connexion entre (UT) et (BS), où il y a une ligne de vue directe (LOS). Dans ces zones, la qualité du signal est plus élevée, offrant ainsi une meilleure expérience utilisateur. L'UT peut se déplacer librement dans ces zones sans craindre de perdre la connexion ou de voir la qualité du signal se détériorer. Les zones noires désignent que la connexion est faible ou inexistante en raison d'obstacles. Dans ces zones la qualité du signal est faible, ce qui peut entraîner une perte de connexion et des interférences qui affectent le signal, rendant difficile le maintien d'une bonne connexion entre (UT) et (BS).

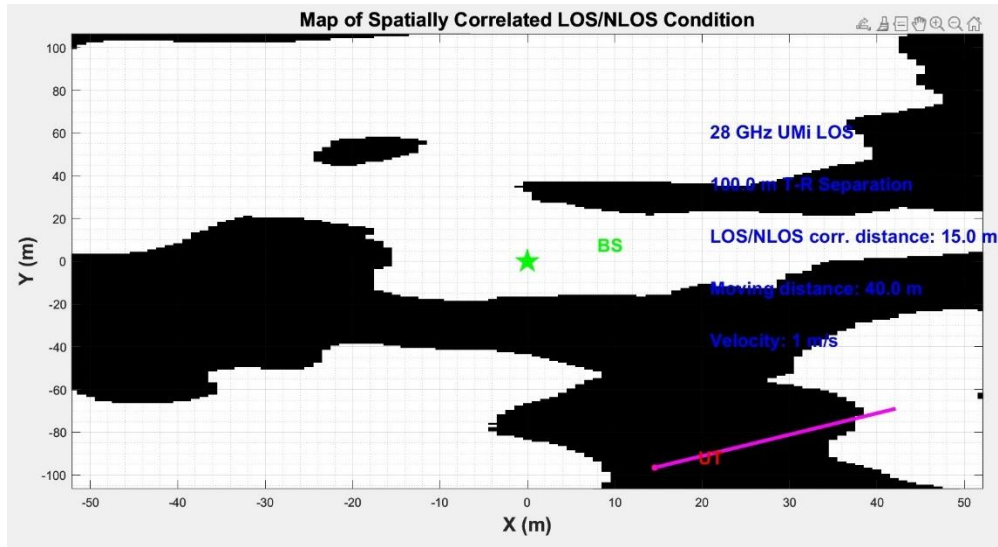


Figure III.8 : Carte de condition LOS/NLOS corrélée pour la fréquence 28GHZ.

III.7.3 La carte de trajectoire de l'UT

La ligne blanche (figure III.9) indique les positions de l'UT dans une zone souffrant d'un signal faible (NLOS). Cela est dû à plusieurs facteurs qui affectent la qualité de la connexion ; En premier, la présence d'obstacles tels que des personnes qui peuvent empêcher le signal d'atteindre directement l'appareil, ce qui entraîne une dégradation de la qualité du signal. Deuxièmement, la distance entre l'UT et la BS joue un rôle important ; plus la distance augmente, plus la probabilité d'affaiblissement du signal augmente. Troisièmement, des interférences provenant d'autres signaux peuvent affecter négativement la qualité de la connexion, rendant difficile pour l'UT d'obtenir un signal fort. Enfin, un angle d'émission défavorable et le mouvement de l'UT vers des zones ombragées augmentent la probabilité que la flèche se trouve dans une zone de signal faible.

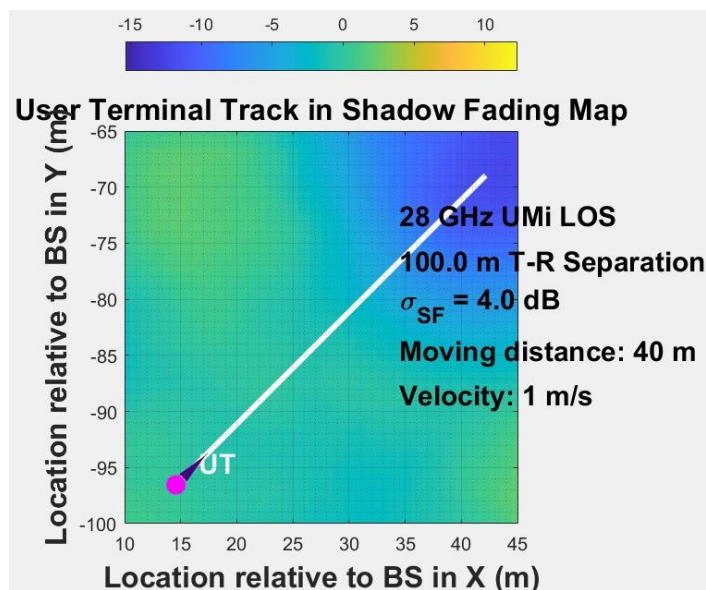


Figure III.9: Carte de trajectoire de l'UT (T-R 100m, 28GHZ, UMi, LOS).

III.7.4 Profil de retard de puissance OPDP et DPDP pour le système LOS à 28 GHZ

On peut observer dans la figure III.10 que la puissance reçue varie considérablement au fil du temps et de la distance. Ces variations reflètent l'impact des facteurs environnementaux tels que les réflexions et les interférences, où des obstructions peuvent réduire la qualité du signal. Ensuite, le profil de retard de puissance omnidirectionnelle (OPDP) montre comment les composants de chemin multiple (MPCs) peuvent entraîner une variation de l'énergie reçue, certaines voies renforçant la puissance tandis que d'autres peuvent la réduire. Chaque sommet représente l'arrivée d'un signal puissant, tandis que les creux indiquent des zones de faibles puissances. La présence de plusieurs sommets dans le (OPDP) indique l'existence de multiples chemins pour le signal, ce qui correspond à la nature de la communication dans les environnements urbains. Cette diversité dans les chemins peut avoir un impact significatif sur l'expérience utilisateur, car la qualité du signal influence la vitesse et la stabilité de la connexion.

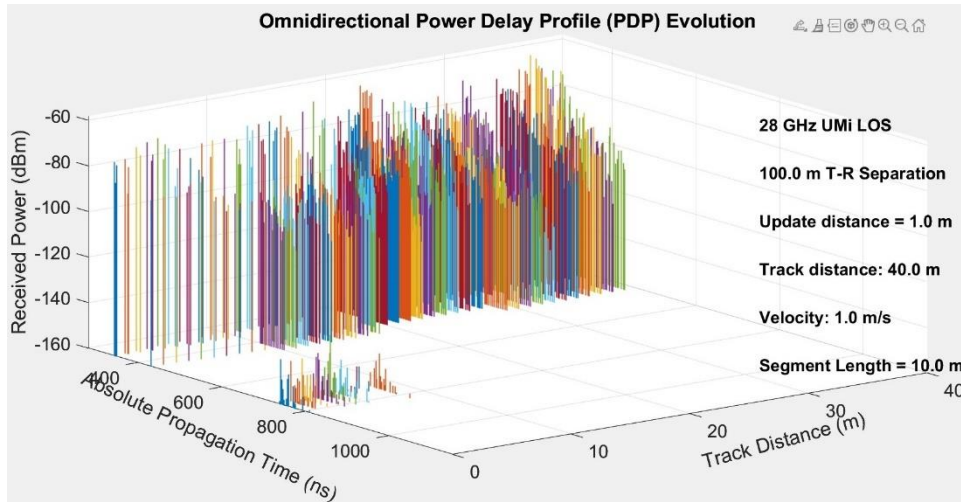


Figure III.10 : PDP omnidirectionnel (T-R 100m, 28GHZ, UMi, LOS).

La figure III.11 présente l'évolution des puissances DPDP consécutives et montre la puissance reçue la plus élevée le long du parcours de l'utilisateur illustrent ainsi la variation de la puissance et la dérive de multi-trajet Components (MPCs). La variation de la puissance indique que la force du signal fluctue en raison des interférences constructives et destructives des différents trajets. La dérive des composantes multi-trajets (MPCs) signifie que les caractéristiques de ces trajets (délai, angle d'arrivée, puissance) changent avec le mouvement de l'utilisateur, car les réflexions et les diffractions du signal varient en fonction de la position. Les données essentielles telles que la fréquence, l'environnement, la distance entre l'émetteur et le récepteur, la trajectoire, et la vitesse sont notées dans le graphique du DPDP.

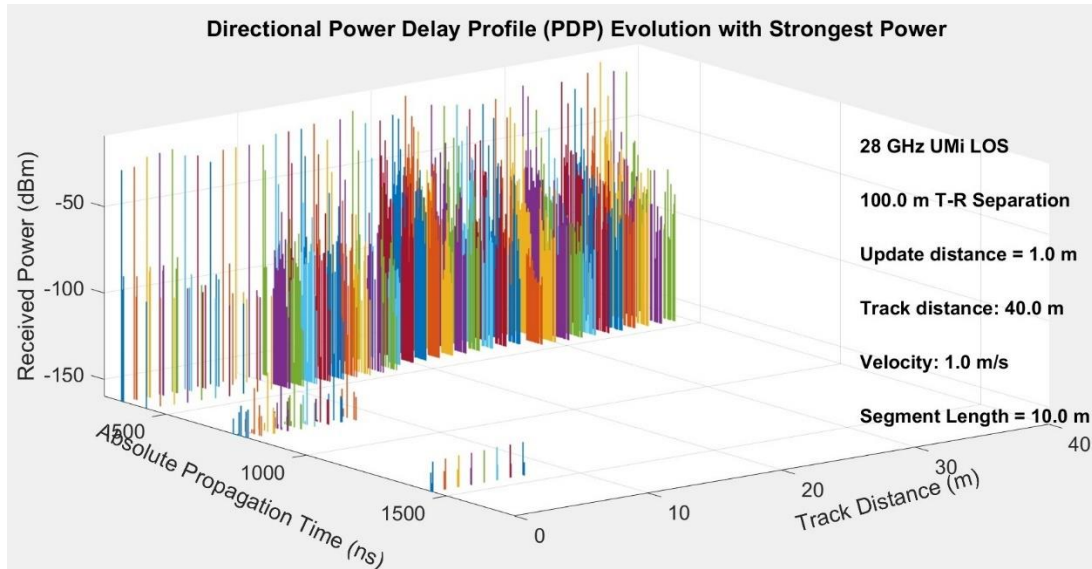


Figure III.11 : PDP directionnel (T-R 100m, 28GHZ, UMi, LOS).

III.7.5 Cas de 104 GHZ

Afin d'analyser la signification des résultats obtenus, nous avons fixé la valeur de la distance SF à 10 m (valeur par défaut). Ainsi, les résultats suivants ont été obtenus :

La figure III.12 présente une carte de l'atténuation d'ombre spatiale à 104 GHZ en condition ligne de vue (LOS). Les couleurs illustrent la variation de la puissance du signal : le bleu foncé indique une forte atténuation (signal faible). Tandis que le côté coloré en jaune représente une atténuation plus faible (signal plus fort).

La trajectoire blanche représente le mouvement du récepteur (UT) sur une distance de 40m à une vitesse de 1m/s, ou le signal subit des variations dues aux obstacles et aux interférences.

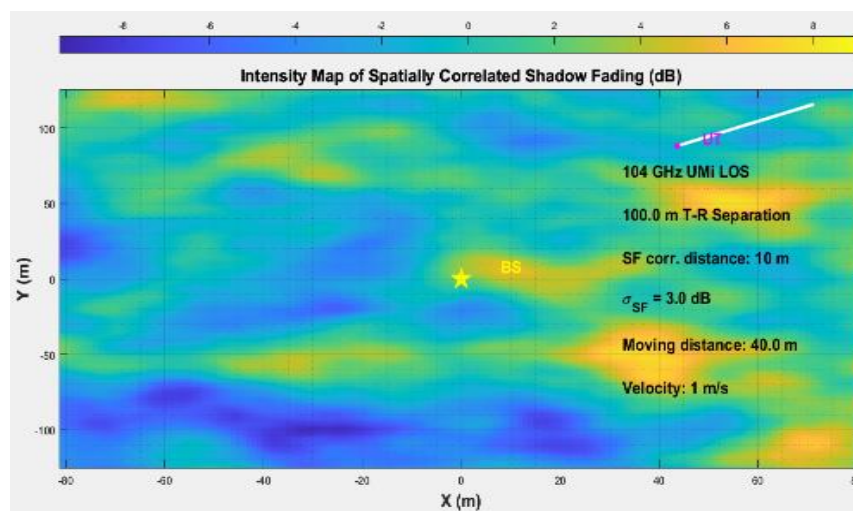


Figure III.12 : Carte de spatialement corrélé du SF pour la fréquence 104 GHZ.

La figure ci-après (Figure III.13) représente tout type de visibilité (LOS ou NLOS) à 104 GHz, ou les zones noires indiquent NLOS (signal obstrué) et les zones blanches indiquent LOS (signal clair). La trajectoire de l'UT, correspond à un déplacement linéaire de 40m, tandis que la station de base (BS) est représentée par une étoile verte. Cette carte illustre l'impact des obstacles sur la propagation des ondes en milieu urbain.

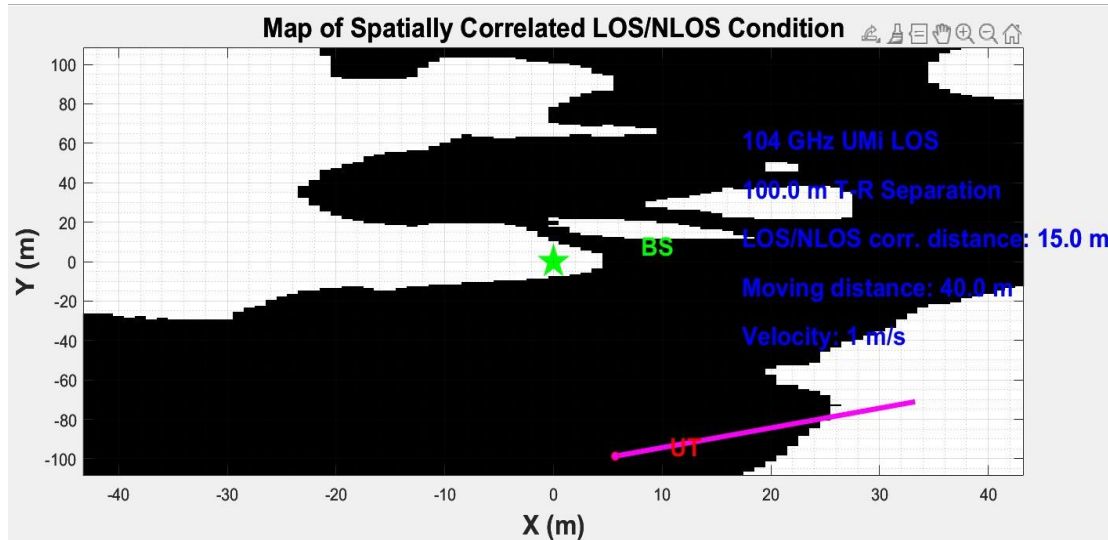


Figure III.13 : Carte des conditions LOS/NLOS à 104GHZ.

La carte de trajectoire de l'UT (Figure III.14) indique un chemin linéaire (ligne droite blanche). Cette ligne suit le choix du type de trajectoire dans le logiciel NYUSIM et a un angle de 45°. Cela pourrait désigner une piste ou un axe de déplacement dont l'orientation est inclinée par rapport aux axes principaux de la carte ou du système de simulation.

La carte de l'atténuation de l'ombre (figure III.14) présente le suivi d'un UT à une fréquence de 104 GHz, avec une distance de 100 m entre la BS et l'UT avec une atténuation de 3 dB. Les données indiquent un déplacement de l'UT sur une distance de 40 m à une vitesse de 1 m/s, ce qui permet d'analyser l'impact des obstacles sur la qualité du signal dans les environnements de communication sans fil.

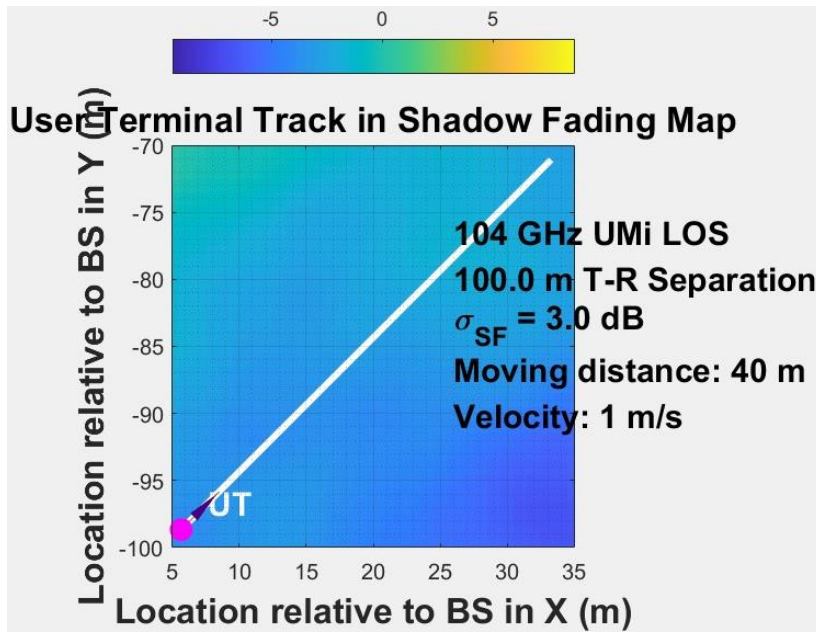


Figure III.14 : Carte de trajectoire de l'UT (T-R 100 m, 104GHZ, UMi, LOS).

La figure III.15 représente l'évolution du profil de retard de puissance (PDP) à une fréquence de 104 GHz, avec une distance de séparation de 100m entre la BS et l'UT. Le graphique illustre comment la puissance reçue (en dBm) varie en fonction du temps de propagation absolu (ns) et de la distance de mise à jour reflète la précision des mesures, tandis que la longueur du segment (10.0 m) aide à analyser la qualité du signal. Ces données contribuent à améliorer la conception des réseaux sans fil et les stratégies de gestion des interférences.

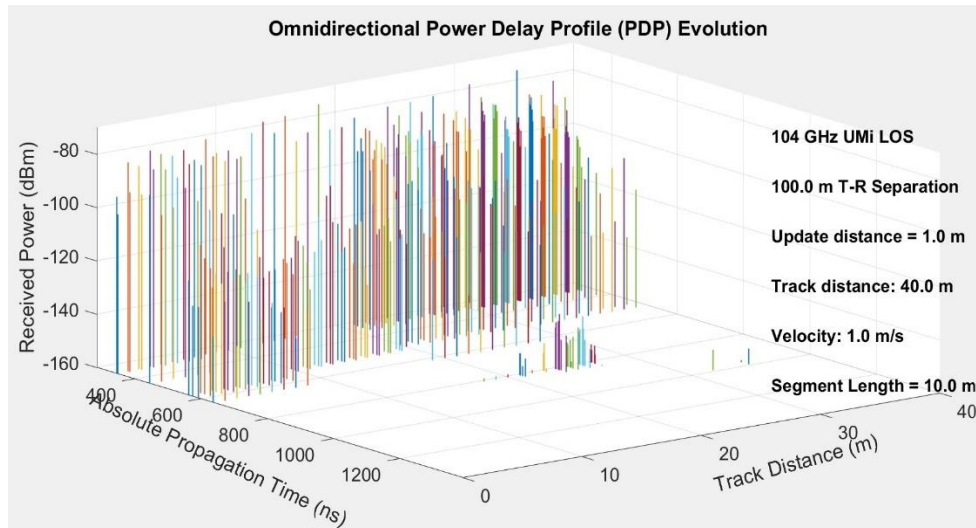


Figure III.15 : PDP Omnidirectionnel (T-R 100m, 104GHz, UMi, LOS).

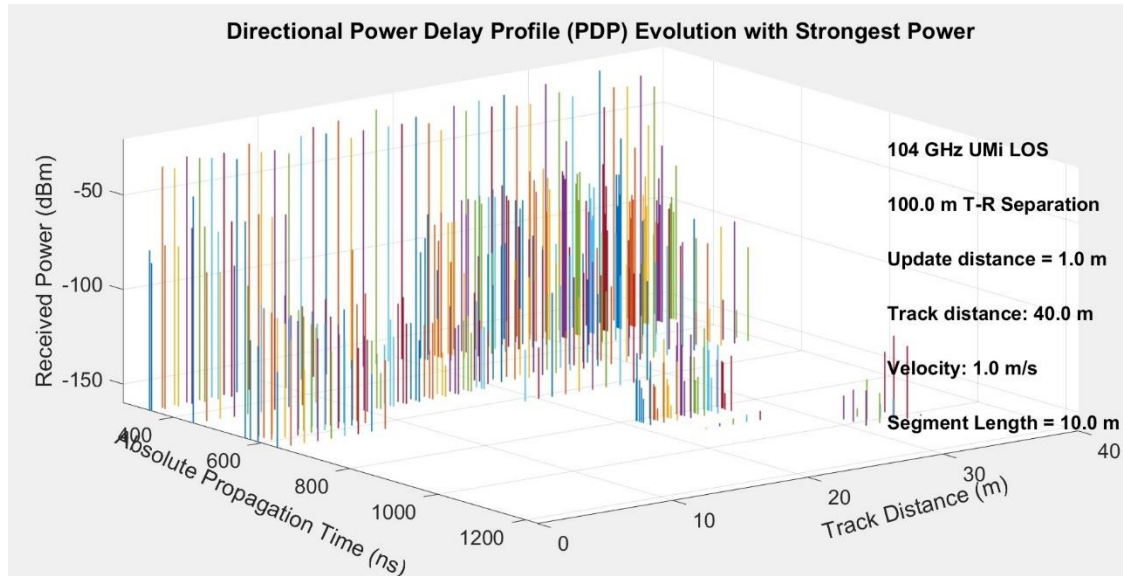


Figure III.16 : PDP directionnel (T-R 100m, 104GHZ, UMi, LOS).

Le graphique de la figure III.16 illustre le DPDP à une fréquence de 104 GHz, montrant comment la puissance reçue (en dBm) varie en fonction de la distance sur le parcours choisi. L'axe des abscisses représente la distance entre l'émetteur et le récepteur, tandis que l'axe des ordonnées reflète la puissance reçue au fil du temps. Les lignes colorées représentent différentes mesures, montrant les variations des signaux reçus. Les paramètres annexes, tels que « T-R séparation » et « update distance », font référence aux distances et à la vitesse utilisées dans les mesures.

III.8 Étude des performances des antennes MIMO avec différentes orientations (Az, Élé)

Pour notre étude les angles choisis sont : 7° , 15° et 30° pour le paramètre angle d'ouverture. Le tableau III.9 résume les résultats obtenues (Écart type σ_{SF}) pour les différentes valeurs de l'angle d'ouverture et les environnement LOS/NLOS avec une distance de mouvement fixée à 100m.

Tableau III.9: Résultats de σ_{SF} suivant l'angle d'ouverture et l'environnement LOS/NLOS.

Environnement	Angle d'ouverture ($^\circ$)	Distance T-R (m)	σ_{SF} (dB)
LOS	7°	100	4
LOS	15°	100	4
LOS	30°	100	4
NLOS	7°	100	7
NLOS	15°	100	7
NLOS	30°	100	7

Suivant le tableau III.9 nous avons fixé la distance de mouvement à 100m entre l'émetteur et le récepteur pour différents angles avec le même environnement qu'il soit LOS ou NLOS. La distance maximale que le signal peut atteindre est 100 m, cela signifie que les différentes valeurs de l'angle d'ouverture n'a aucun effet sur la distance T-R. En revanche, σ_{SF} reste constant avec une valeur de 4dB dans l'environnement LOS et 7dB dans le NLOS. Cela signifie que l'écart-type σ_{SF} , devient plus élevé dans le milieu NLOS en raison des obstacles entre l'émetteur et le récepteur.

Pour mieux comprendre l'effet de différentes valeurs de l'angle d'ouverture le tableau III.10 résume les valeurs des puissances reçues (en dBm) et le temps de propagation absolu (en ns) des profils DPDP et OPDP pour ces différentes valeurs et les environnements LOS/NLOS avec une distance de mouvement fixée à 100m :

Tableau III.10 : PR et TPA dans les cas DPDP et OPDP.

Environnement	Distance (m)	Angle d'ouverture (°)	DPDP		OPDP	
			Temps de propagation absolu (ns)	Puissance reçue (dBm)	Temps de propagation absolu (ns)	Puissance reçue (dBm)
LOS	100	7	353.26	-20.44	353.26	-75.85
LOS	100	15	345.03	-33.88	345.03	-76.04
LOS	100	30	354.33	-46.73	354.33	-76.85
NLOS	100	7	355.19	-71.23	355.19	-101.24
NLOS	100	15	350.20	-68.42	350.20	-92.44
NLOS	100	30	352.95	-59.10	352.95	-89.23

Dans les deux environnements, pour les deux composantes de rayonnement, la puissance reçue augmente en fonction de l'angle d'ouverture. Cependant, pour l'environnement LOS, la puissance maximale est atteinte à un angle de 7° (puissance reçue de -20,44 dBm pour la DPDP et de -75.85 dBm pour l'OPDP), tandis que pour l'environnement NLOS, elle est maximale à un angle de 30° (puissance reçue de -59.10dBm pour la DPDP et de -89.23dBm pour l'OPDP). Ces résultats indiquent que l'angle d'ouverture a un impact sur la puissance reçue à la fréquence de 28 GHz dans les systèmes de communication 5G.

III.9 Résultats et analyse du modèle de blocage à quatre états

L'atténuation moyenne du signal pour les quatre angles d'ouverture a montré que les antennes à largeur de faisceau plus étroite représentent des atténuations moyennes de signal plus importantes pour les états de blocage individuels. En particulier, les antennes à 7° ont produit une atténuation moyenne du signal de 15,8 dB, tandis que les antennes à 15°, 30° et 60° ont montré une atténuation moyenne de 12,4 dB, 11,9 dB et 11,5 dB, respectivement. La relation inverse entre la HPBW de l'antenne et l'atténuation moyenne du signal peut être attribuée aux antennes à largeur de faisceau plus grande capturant plus d'énergie diffractée autour des bloqueurs humains pendant l'événement de blocage, par rapport aux antennes à faisceau plus étroit.

Une simple expression analytique peut être utilisée pour déterminer l'atténuation moyenne du signal en fonction de la HPBW des antennes TX/RX :

$$\mu A_{[dB]} = 10 \log_{10} \left(b + \frac{180}{A_{BW}} \right) \quad (III.8)$$

Où :

b : est une constante égale à 9.8.

A_{BW} : est le HPBW azimutal de l'antenne RX en degrés, qui peut varier de 1° à 180°.

La figure III.17 montre l'atténuation moyenne pour chaque paire d'antennes TX/RX HPBW. Une estimation de l'équation III.8 est ajustée aux atténuations du signal présentées, avec $b=9.8$. L'équation est utilisée pour décrire l'observation de l'environnement physique où un seul cluster LOS est bloqué et lorsque aucun chemin secondaire n'est disponible. À mesure que la HPBW de l'antenne TX/RX augmente, l'atténuation moyenne du signal diminue, ce qui entraîne plus d'énergie diffractée autour du bloqueur et donc capturée par un angle de vue plus large au niveau du récepteur. Pour des antennes à HPBW très étroite, l'atténuation moyenne du signal sera élevée, car la diffusion de l'onde frontale transmise et l'angle de vue au niveau du récepteur sont complètement bloqués par un obstacle, entraînant peu d'énergie diffractée observée au récepteur. Il existe une limite au-delà de laquelle l'augmentation de la HPBW de l'antenne n'apportera pas d'avantages significatifs, car le cluster de chemin LOS prend une trajectoire si étroite entre le TX et le RX en l'absence des éléments réfléchissants. Comme montré dans la figure III.17 l'atténuation moyenne minimale du signal atteint une limite d'environ 10 dB pour des HPBW d'antennes TX/RX de 70° ou plus.

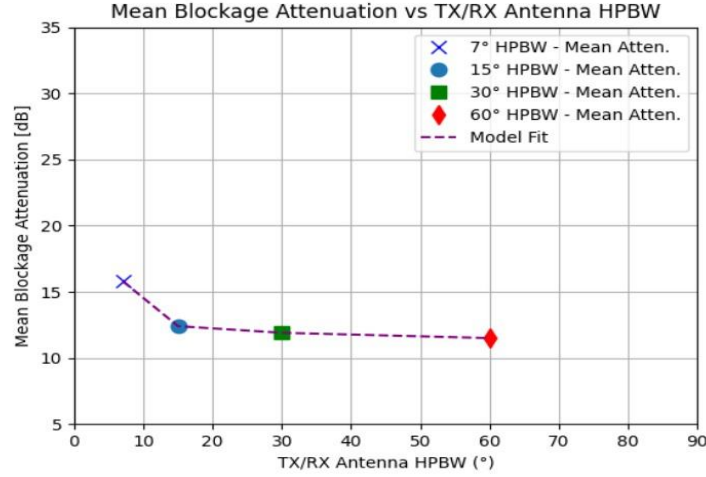


Figure III.17 : La relation entre l'atténuation moyenne de blocage et l'HPBW.

Les durées de temps d'évanouissement T_D (Fade Time Duration) sont représentées dans la figure III.18. Les antennes à faisceau large ont montré des durées d'évanouissement plus courtes que les antennes à faisceau étroit. Des durées d'évanouissement plus longues pour les antennes étroite par rapport aux antennes large sont attendues, car les antennes larges ont de grands angles d'ouverture pour capturer l'énergie diffractée autour d'un bloqueur piéton. Plus précisément, les antennes à 60° HPBW ont entraîné une durée d'évanouissement moyenne de 321,3 ms, tandis que les antennes à 7° HPBW ont montré des durées d'évanouissement moyennes de 378,0 ms. Les durées T_D plus longues pour les antennes étroites pourraient donner une indication que les taux de variation de la puissance du signal sont plus lents que pour les antennes à faisceau large, comme observé précédemment. Notez que les durées de T_D pour le modèle à quatre états de Markov sont plus longues.

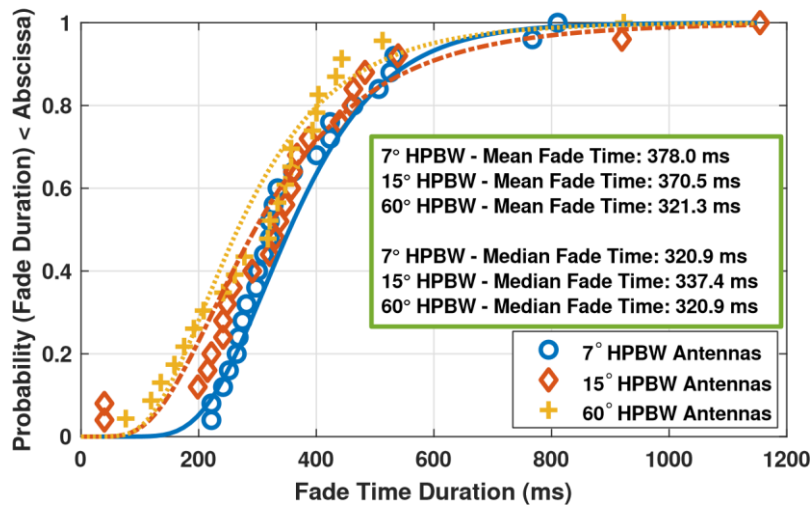


Figure III.18 : Évaluation du T_D selon les HPBW [40].

Étant donné que les durées T_D sont de l'ordre de plusieurs centaines de ms, les systèmes mmWave doivent être conçus pour commuter électriquement les faisceaux dans un délai de l'ordre de ms, grâce à une architecture MIMO distribuée où plusieurs nœuds peuvent servir le même utilisateur. Plus spécifiquement, il peut être nécessaire de mettre en œuvre des algorithmes de suivi de faisceau à double liaison [50] au lieu de ceux à liaison unique qui sont actuellement mis en œuvre dans la norme 802.11ad [51].

Les taux de probabilité de transition (Taux λ) du modèle de Markov à quatre états sont fournis dans le tableau III.11 et sont utiles pour créer de simples simulations d'événements de blocage humain pour diverses configurations de HPBW d'antenne, et pour modéliser la performance des réseaux de petites cellules à des fréquences mmWave.

Tableau III.11 : Taux λ du modèle de Markov à quatre états.

TX/RX HPBW	État actuel	État suivant	Taux λ (trans/sec)
7°	Unshadowed	Decaying	0.21
	Decaying	Shadowed	7.88
	Shadowed	Rising	7.70
	Rising	Unshadowed	7.67
15°	Unshadowed	Decaying	0.21
	Decaying	Shadowed	10.49
	Shadowed	Rising	9.79
	Rising	Unshadowed	5.48
30°	Unshadowed	Decaying	0.20
	Decaying	Shadowed	9.37
	Shadowed	Rising	8.85
	Rising	Unshadowed	6.70
60°	Unshadowed	Decaying	0.18
	Decaying	Shadowed	11.30
	Shadowed	Rising	10.36
	Rising	Unshadowed	6.88

III.10 Étude et comparaison des canaux MIMO à 28, 73 et 104 GHz à l'aide du simulateur de canal NYUSIM

Notre étude comparera les performances des canaux MIMO à 28, 73 et 104 GHz. Nous analyserons l'impact de l'environnement urbain et du blocage humain, ainsi que la comparaison entre les antennes DPDP et OPDP dans différentes conditions.

III.10.1 Étude de l'environnement urbain

L'étude montre que les fréquences de 28 GHz, 73 GHz et 104 GHz diffèrent dans leurs performances de signal dans les environnements urbains, affichant toutes de bonnes performances en conditions de ligne de vue (LOS). Cependant, en conditions de non ligne de vue (NLOS), la fréquence de 28 GHz subit une perte modérée, tandis que la 73 GHz connaît une augmentation notable de la perte, et la 104 GHz fait face à une perte très importante. Cela indique que les hautes fréquences nécessitent des conditions idéales et l'application de techniques telles que le beamforming pour améliorer les performances.

Le modèle de canal pour l'environnement urbain a été testé à ces mêmes fréquences dans un scénario UMi. Selon [51], les résultats indiquent que la propagation dans cet environnement, tant en conditions LOS qu'en conditions NLOS, présente une portée compensable. Cependant, la perte de chemin dans le cas de la propagation directionnelle en NLOS est supérieure à celle de la propagation omnidirectionnelle et augmente rapidement avec la distance. Cela souligne l'importance d'optimiser les techniques de transmission, notamment pour les fréquences les plus élevées.

III.10.2 Analyse de l'effet de blocage humain dans les canaux mmWave

Cette étude porte sur l'effet de blocage humain dans les canaux mmWave à des fréquences de fonctionnement de 28, 73 et 104 GHz, en considérant différents scénarios et largeurs de faisceau azimut/élévation des antennes TX/RX (7° , 15° et 30°). Les résultats montrent que les canaux à 73 et 104 GHz sont plus affectés par le blocage humain, tandis que le canal à 28 GHz se révèle le meilleur en termes de résistance à cet effet.

Il est important de noter que, dans le même canal, l'effet des événements de blocage humain est plus présent avec des antennes à faisceau étroit par rapport à celles à faisceau large. De plus, la largeur de faisceau de l'antenne n'influence pas les paramètres du canal pour les distributions de puissance temporelle (PDP). En effet, le PDP omnidirectionnel est plus affecté par le blocage humain que le PDP directionnel.

III.10.3 Comparaison entre DPDP et OPDP

Basé sur la simulation et l'analyse comparative entre le DPDP et le OPDP, il a été observé que le DPDP présente des valeurs supérieures. Cela s'explique par le fait que l'antenne directionnelle peut atteindre des chemins bloqués, ce qui améliore sa performance par rapport à l'omnidirectionnel.

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié une zone urbaine micro cellulaire (ville de Chetma) durant les années 2013 et 2022 à l'aide du simulateur NYUSIM sous MATLAB. Nous avons choisi le type de chemin linéaire, pour deux environnements : LOS et NLOS, à deux fréquences de 28 et 104 GHZ utilisant une antenne MIMO 4×4. Cette étude a été réalisée dans quatre situations : (1) Distance de corrélation d'évanouissement de l'ombre (SF), (2) Distances de corrélation des conditions LOS/NLOS, (3) Vitesse de déplacement de l'UT et enfin (4) le changement du l'angle d'ouverture.

Les résultats obtenus présentent l'analyse des pertes par l'effet de blocage humain dans les canaux mmWave à des fréquences de fonctionnement entre 28 et 104 GHZ pour différents scénarios (LOS/NLOS, antennes TX/RX avec un HPBW d'azimut/élévation de 7°/15°/30°).

Après l'étude des canaux mentionnés ci-dessus, le canal à 28 GHZ est moins affecté par l'impact de changement des largeurs de faisceau azimut/élévation des antennes TX/RX (7°, 15°, 30°), tandis que le canal à 104 GHZ sont meilleurs pour supporter l'impact de ce changement. L'analyse approfondie des différentes bandes mmWave (28, 73 et 104 GHZ) conclut que la perte de parcours directionnelle et l'exposant de perte de parcours dans le profil de délai DPDP ont considérablement augmenté, et la puissance reçue a diminué en raison des pertes dues au blocage humain. Le profil OPDP indique également que la puissance reçue a diminué tandis que la perte de parcours et l'exposant de perte de parcours ont augmenté à cause du blocage humain. Le DPDP à petite échelle montre que la puissance reçue est inférieure pour les antennes directionnelles par rapport aux antennes omnidirectionnelles, et que la perte de parcours où la puissance maximale reçue montre également une augmentation de la perte de parcours.

Ainsi, nous concluons que la perte due au blocage humain a un grand impact sur toutes les bandes mmWave, car ces bandes sont très sensibles à l'environnement externe. L'impact de la perte due au blocage humain dans la fréquence 28 GHZ est significatif. Par conséquent, la modélisation de tout modèle 5G doit incorporer ces pertes ainsi que d'autres.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les systèmes de communication mobile ont connu un développement significatif avec l'émergence de la 5G, qui nécessite des débits de données élevés pour soutenir des applications comme la réalité virtuelle. Cette technologie exige une grande capacité de réseau pour répondre aux besoins d'un grand nombre d'appareils connectés et d'une faible latence. L'utilisation des bandes de fréquence mmWave a été proposée pour atteindre ces exigences. Cependant, les antennes directionnelles peuvent entraîner des problèmes tels que le blocage du signal en raison de la présence d'obstacles comme des personnes et des véhicules entre l'émetteur et le récepteur.

La modélisation de canal pour la communication 5G à ondes millimétriques dans un environnement UMI. Dans les cas LOS/NLOS est simulée à des fréquences de fonctionnement de 28 et 104 GHz avec 4 éléments d'antenne au niveau de l'émetteur et du récepteur (MIMO). Notre travail a été réalisé à l'aide du simulateur NYUSIM pour étudier une zone urbaine (la ville de Chetma) afin de proposer l'installation d'un réseau 5G dans cette zone, en tenant compte des statistiques des conditions météorologiques locales (climat désertique) entre l'année 2013 jusqu'à 2022.

L'étude des canaux 28 /104 GHz a été effectuée pour différents angles de faisceau (azimut/élévation) des antennes TX/RX (7°, 15°et 30°), et des paramètres tels que la distance de corrélation (SF), les conditions LOS/NLOS, ainsi que la vitesse et la direction de mouvement du mobile ont été enregistrés et discutés.

Nous avons principalement concentré sur l'impact du blocage non-auto causé sur la performance des communications 5G, en utilisant un modèle de Markov à quatre états pour simuler les événements de blocage humain causés par le trafic piéton. Les résultats ont montré que l'atténuation moyenne du signal est inversement liée à la largeur du faisceau principal de l'antenne (HPBW). Pour comparer l'effet du blocage, nous avons analysé la performance de communication dans un scénario avec blocage et un autre sans blocage, où les résultats ont montré que le système de communication à 28 GHz nécessitait une augmentation de 13 dB du rapport signal sur bruit (SNR) en cas de présence d'un humain dans la ligne de vue. Les résultats indiquent également que le phénomène de blocage peut réduire considérablement la portée de communication. Les résultats ont donné les conclusions suivantes :

- La distance de corrélation (SF) pour les environnements LOS/NLOS donne une puissance reçue plus forte dans le type de rayonnement (omnidirectionnel).
- Le canal à 28 GHz est moins affecté par l'impact de changement de différentes largeurs de faisceau azimut/élévation des antennes TX/RX (7°, 15°et 30°), tandis que le canal à 104 GHz sont meilleurs pour supporter l'impact de ce changement de l'antenne HPBW.

- La perte de parcours directionnelle et l'exposant de perte de parcours dans le profil de délai de puissance directionnel ont considérablement augmenté, et la puissance reçue a diminué en raison des pertes dues au blocage humain.
- Le profil de délai de puissance omnidirectionnel indique également que la puissance reçue a augmenté et que la perte de parcours ainsi que l'exposant de perte de parcours ont diminué à cause des pertes dues au blocage humain.

Les résultats montrent que, malgré les avancées de la 5G, le blocage humain affecte significativement la qualité du signal. La présence de personnes peut réduire la puissance de la connexion. Cependant, la 5G présente des avantages, notamment sa capacité à gérer le mouvement rapide des individus, améliorant ainsi l'expérience utilisateur dans les zones densément peuplées.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Bisognin, Aimeric. (2015). (Doctoral dissertation). "Évaluation de technologies organiques faibles pertes et d'impression plastique 3D afin de contribuer au développement de solutions antennaires innovantes dans la bande 60 GHz–140GHz".
- [2] Detti, Andrea. (2020). (Thèse). "Functional Architecture." CNIT - Electronic Engineering Department, University of Rome Tor Vergata,
- [3] "5G technologie, déploiement, débit." Journal du Net, 7 mars 2023, www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-de-l-iot/1196828-5G-technologie-deploiement-debit/. Accessed 18 MAR. 2025.
- [4] Iragaba , Bernard. (2022). (Thèse) "Étude analytique des performances d'un réseau mobile 5G pour son déploiement dans une zone urbaine",
- [5] Hadjmekhnèche, Khadidja, et REGUIBI, R. ACHA. (2019). (Doctoral dissertation). "Étude et implémentation des modulations multi porteuses pour la 5G."
- [6] Bouaziz, Samir. (2018). (Doctoral dissertation). "Réduction du PAPR du système OFDM-MIMO en 4G".
- [7] Gupta, Sunil Kumar. (2022) (Thèse) . "Numerical Simulation and Implementation of FBMC System with Low PAPR for Efficient 5G Applications." Mathematical Statisticien and Engineering Applications,
- [8] Bendahmane, Ghermoul(2017) (Doctoral dissertation). "Étude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC"
- [9] Lagrue, Alizée. "Les avantages de la 5G." Prestige Téléphonie, 23 mai 2019, www.prestige-telephonie.fr/avantages-de-5g/. Accessed 24 Feb 2025.
- [10] Durand, Sarah. "Ce qu'il faut savoir sur la 5G." www.systemed.fr/high-tech/ce-qu-il-faut-savoir-sur-5g. Accessed 26 Feb 2025.
- [11] Rodriguez, Jonathan. (Thèse) (2015). "Fundamentals of 5G mobile networks"
- [12] Andrews, Jeffrey, et al. (Thèse) (2014) "What will 5G be?" IEEE Journal on selected areas in communications
- [13] Rajiv. "Applications de la technologie 5G." 8 juin 2024, www.rfpage.com/applications-5g-technology/. Accessed 26 Feb 2025.
- [14] Hachemi, Yasser Aboubaker. (Doctoral dissertation).(2020) "Étude et simulation d'un système beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G.", Université Aboubakar Belkaïd, Tlemcen, Faculté de Technologie.
- [15] Shokri-Ghadikolaie, Hossein. (Doctoral dissertation). (2017). "Millimeter-wave Networking: Fundamental Limits, Scalable Algorithms, and Design Insights "
- [16] Khelil, Abdellatif. (Doctoral dissertation). (2018). "Étude et performance d'un système de communication sans fil à base d'OFDM MIMO".

- [17] Khadidja, Nesrine BOUHENNI. (2019) (Mémoire de fin d'études.). "Étude et évaluation des performances des systèmes sans fil multi gigabits à ondes millimétriques et ondes TéraHertz "
- [18] Theodore , al. (Thèse) (2015). "Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design." IEEE transactions on Communications
- [20] Aggarwal, Reena, Ajay Roy, and Rajeev Kumar. (Thèse) (2024) "Millimeter wave antennas: A state-of-the-art survey of recent developments, principles, and applications."
- [21] "Wigig." Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/WiGig>. Accessed 20 MAR 2025.
- [22] "V Band." Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/V_band. Accessed 18 MAR. 2025
- [23] Boudouaia, Cherifa, et BELMIMOUN (2018) (Mémoire master) "Génération d'ondes millimétriques dans les systèmes photoniques Radio sur Fibre".
- [24] Abdellaoui C, et Mesbahi B. (Mémoire de master en Télécommunications), (2019-2020). "Étude et simulation de la bande 28 GHz avec MIMO dans la ville d'El Oued."
- [25] Guwahati, T. (Thèse) (July 2015). "Investigation on Certain Aspects of Photo conductive Antenna & Wireless Communication in The Terahertz Band."
- [26] Tripathi, Shuchi, et al. (Thèse) (2021). "Millimeter-wave and terahertz spectrum for 6G wireless."
- [27] Federici, John, and Lothar Moeller. (Thèse) (2010). "Review of terahertz and sub terahertz wireless communications." Journal of Applied Physics
- [28] Pawar, Ashish Y., et al. (Thèse) (2013) "Terahertz technology and its applications."
- [29] International Telecommunication Union (ITU). WRC-19 Final Acts, (Thèse) (Mar. 2020).
- [30] Dash, S., and Patnaik, A. (livre) (2021) "Next Generation Wireless Terahertz Communication Networks. "
- [31] Niu, Yong, et al. (Thèse) (2015) "A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges."
- [32] Hemadeh, Ibrahim A., et al. (Thèse) (2017) "Millimeter-wave communications: Physical channel models, design considerations, antenna constructions, and link-budget."
- [33] Zhao, Xiongwen, et al. (Thèse) (2016) "Attenuation by human bodies at 26-and 39.5-GHz millimeter wavebands." IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters
- [34] Collonge, Sylvain, Gheorghe Zaharia, and G. E. Zein. (Thèse) (2004) "Influence of the human activity on wide-band characteristics of the 60 GHz indoor radio channel." IEEE Transactions on Wireless Communications
- [35] Dembele, Hamidou, et al. (Thèse) (2021). "Impact of human blockage on 5G communication system in the 26 GHz band." 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE,
- [36] Generation, Third. (2019). "Technical specification group radio access network; study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz."

- [37] Jacob, Martin, Christian Mbianke, and Thomas Kürner. (2010)."A dynamic 60 GHz radio channel model for system level simulations with MAC protocols for IEEE 802.11 ad."
- [38] Jacob, M., et al. (2010). "Modeling of Dynamical Human Blockage"
- [39] MacCartney, George R., Theodore S. Rappaport, and Sundeep Rangan. (2017)."Rapid fading due to human blockage in pedestrian crowds at 5G millimeter-wave frequencies."
- [40] Madushan, Hansana, Chandana Jayaratne, and Ajith Wijemanne. (2025)"Evaluation of NASA POWER Daily Rainfall Products Against Ground Observations in Sri Lanka."
- [41] "Prévisions météorologiques mensuelles pour Chetma, Wilaya de Biskra." Weather.com, www.weather.com. Accessed 10 MAR. 2025
- [42] Sun, Shu, George R. MacCartney, and Theodore S. Rappaport. (2017)"A novel millimeter-wave channel simulator and applications for 5G wireless communications." 2017 IEEE international conference on communications (ICC).
- [43] Ju, Shihao, Shu Sun, and Theodore S. Rappaport. (2020). "NYUSIM user manual." New York University and NYU WIRELESS
- [44] Saleh, Adel AM, and Reinaldo Valenzuela. (2020)."A statistical model for indoor multipath propagation." IEEE Journal of selected areas in communications
- [45] Matthaiou, Michail, David I. Laurenson, and Cheng-Xiang Wang. (2008)"Reduced complexity detection for Ricean MIMO channels based on condition number thresholding." 2008 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference.
- [46] Jaeckel, Stephan, et al. (2014) "Quadriga: A 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials." IEEE transactions on antennas and propagation
- [47] Ju, Shihao, et al. (2019)"A millimeter-wave channel simulator NYUSIM with spatial consistency and human blockage." 2019 IEEE global communications conference (GLOBECOM).
- [48] Holloway, Christopher L., Michael G. Cotton, (2020)"A model for predicting the power delay profile characteristics inside a room." IEEE transactions on vehicular technology
- [49] Gao, Bo, et al. (2014) "Double-link beam tracking against human blockage and device mobility for 60-GHz WLAN." 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC).
- [50] IEEE 802.11 ad Part 11. (2012). "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment 3: enhancements for very high throughput in the 60 GHz band."
- [51] Zekri, Abdelbaset, Riadh , and Messaoud. (2022) "Impact of azimuth and elevation half power beam width on human blockage scenarios in mmwave channels." 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP).