

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur

et de la Recherche scientifique

Lakhder d'El-Oued Hamma Université

Echahid Faculté de Technologie



Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Télécommunication

Spécialité: Systèmes de Télécommunication

Thème

Étude et simulation de la bande 73 GHz avec
MIMO dans la ville d'El Oued

Réalisé par:

- MESSAOUDI SALIMA
- SAHRAOUI OUIAM

Le jury:

Dr. Khalil Abdelatif	M.C.A	Président
Mr. AJGOU Riadh	M.C.A	Rapporteur
Mr. Ourar Nabil	M.C.A	Examineur

Année Universitaire: 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous adressons nos remerciements : Tous d'abord à nos chers parents, merci d'avoir été là toutes ces années de nous avoir aidées à faire ce très long parcours, merci aussi de nous avoir guidé vers le chemin droit, merci infiniment pour l'encouragement et l'aide pour arriver à ce stade de notre formation.

En second lieu, à notre encadreur Mr :AJGOU Riadh , son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail. Nos plus grands remerciements vont à nos profs qui tout au long de notre cursus nous ont appris que le gout de la constance dans le travail scientifique est la clef de tout succès.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail

إهداء

لعائلتي الحبيبة أمي و أبي إخواني أخواتي و زوج أختي

أردت فقط أن أشكركم من القلب على كل الدعم الذي قدمتموه لي على مر السنوات. لقد كنتم دائماً هنا لي في الأوقات الجيدة والسيئة، ولم أكن أستطيع تحقيق ما حققته دون دعمكم اللامحدود.

لقد كنتم دائماً مصدر إلهام لي، وكيف ساعدتموني في تجاوز التحديات وتحقيق أهدافي. لا يمكنني أن أشكركم بما يكفي على كل ما قدمتموه لي.

أدعو الله أن يمنحكم الصحة والسعادة وأن يبارك لنا بالمزيد من اللحظات الجميلة معاً. أحبكم من القلب، وسأكون دائماً ممتناً لكم

بكل حب وامتنان

إهداء

نهدي هذا العمل المتواضع الى

والدينا.

عائلتنا.

اساتذتنا.

زملائنا

كل اولئك الذين ساعدونا على اكمال هذا العمل

Résumé:

La technologie 5G a métamorphosé le paysage des communications sans fil, offrant des débits de données inégalés et une connectivité ultra-rapide. Cependant, le succès de la 5G dépend grandement de la fréquence utilisée, en particulier des fréquences millimétriques (mmWave). Notre étude se focalise sur l'influence de la fréquence de (73 GHz) dans la technologie 5G, avec une attention particulière portée à son application dans la région de la Vallée. Nous avons minutieusement évalué les performances de cette fréquence dans des contextes de visibilité directe (LOS) et de non-visibilité directe (NLOS) en utilisant l'application Nyusim pour mesurer des paramètres clés tels que la puissance, le délai, ainsi que les angles de départ et d'arrivée. De surcroît, nous avons pris en compte les facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité et les précipitations, susceptibles d'influer sur les performances des ondes millimétriques. Les résultats de notre étude mettent en lumière l'importance cruciale de la fréquence de 73 GHz pour l'optimisation des performances de la 5G dans la région de la Vallée, ouvrant ainsi la voie à d'importantes avancées dans le domaine des communications sans fil.

Mots clés: 5G , MIMO , ondes millimétriques , NYUSIM ,

ملخص:

أحدثت تقنية 5G تحولاً جذرياً في مشهد الاتصالات اللاسلكية حيث قدمت سرعات بيانات لا مثيل لها واتصالاً فائق السرعة. ومع ذلك فإن نجاح 5G يعتمد بشكل كبير على التردد المستخدم وخاصة ترددات الموجات المليمترية (mmWave). تركز دراستنا على تأثير التردد (73 جيجا هرتز) في تقنية الجيل الخامس (5G)، مع إيلاء اهتمام خاص لتطبيقه في منطقة الوادي. لقد قمنا بتقييم أداء هذا التردد بدقة في كل من إعدادات خط البصر (LOS) وغير خط البصر (NLOS) باستخدام تطبيق Nyusim لقياس المعلمات الرئيسية مثل الطاقة والتأخير والزوايا. . بالإضافة إلى ذلك، أخذنا في الاعتبار العوامل البيئية مثل درجة الحرارة والرطوبة وهطول الأمطار التي يمكن أن تؤثر على أداء الموجات المليمترية. تسلط نتائج دراستنا الضوء على الأهمية الحاسمة للتردد 73 جيجا هرتز لتحسين أداء 5G في منطقة الوادي، مما يمهد الطريق لتحقيق تقدم كبير في الاتصالات اللاسلكية.

الكلمات المفتاحية: الجيل الخامس , الموجات المليمترية , MIMO , NYUSIM ,

ABSTRACT:

5G technology has transformed the wireless communications landscape, delivering unparalleled data speeds and ultra-fast connectivity. However, the success of 5G depends greatly on the frequency used, particularly millimeter wave (mmWave) frequencies. Our study focuses on the influence of the frequency of (73 GHz) in 5G technology, with particular attention paid to its application in the Valley region. We thoroughly evaluated the performance of this frequency in both line-of-sight (LOS) and non-line-of-sight (NLOS) settings using the Nyusim app to measure key parameters such as power, delay, and angles. departure and arrival. In addition, we took into account environmental factors such as temperature, humidity, and precipitation that could impact mmWave performance. Our study results highlight the critical importance of the 73 GHz frequency for optimizing 5G performance in the Valley region, paving the way for significant advancements in wireless communications

Keywords : 5G , MIMO , mmWave , NYUSIM

Sommaire

Remerciements III

Résumé:	I
Sommaire	II
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VII
Listes des acronymes et abréviations.....	IX
Introduction générale:	1

Chapitre I : Enjeux de la 5G

I.1 -Introduction :	4
I.2 - Historique des générations :	5
I.3 - La 5eme Génération :	7
I.4 - Objectifs de la 5G :	8
I.5 - Familles d'usage 5G :	9
I.6 - Fréquences utilisées pour la 5G :	10
I.7 - Avantages et inconvénients de la 5G :	10
I.7.1 - Avantages :	10
I.7.2 - Inconvénients :	11
I.8 - Les exigences de la 5G :	11
I.8.1 - Efficacité spectrale :	11
I.8.2 - Débit de données maximal :	13
I.8.3 - Débit de donnée perçu par utilisateur :	14
I.8.4 - Latence :	15
I.8.5 - Mobilité :	16
I.8.6 - Capacité de trafic d'une zone :	16
I.8.7 - L'efficacité énergétique des réseaux :	17
I.8.8 - La densité de connexion :	17
II.9 - Comparaison entre 4G et 5G :	18
I.10 – Applications :	19
I.11 - Spectre 5G :	20

Chapitre II : Technologie massif MIMO de la 5G

II.1. Introduction :	23
II.2 . Les systèmes MIMO:	24
II.3. Principes du MIMO :	25

II.4 .Types de MIMO:	25
II.4.1 Système SISO:	26
II.4.2. Système MISO:	27
II.4.3 .Système SIMO:	28
II.4.4. Système MIMO:.....	29
II.5. Massive MIMO.....	30
1.5.1 Beamforming	31
1.5.2 Mu-MIMO (Multi utilisateurs- MIMO)	32
II.6 Types Massive MIMO.....	32
II.6.1 Single-User MIMO	32
II.6.2 Multi-User Massive MIMO	33
II.6.3 MU- Massive MIMO avec Multi-Cell scénario.....	34
II.6.4 Massive MIMO distribuée	36
II.7 Caractéristique de Massive MIMO.....	36
II.7.1 Évolutivité.....	36
II.7.2 Préférence du schéma TDD en Massive MIMO.....	37
II.8 Comparaison entre MIMO traditionnel et MIMO massif	38
II.10 Conclusion	39

Chapitre III : Ondes millimétriques (mm Wave) pour la5G

III.1. Introduction :	41
III.2. Ondes millimétriques:	41
III.2.1.Définition Ondes millimétriques:	41
III.2.2. Utilisation des fréquences des ondes millimétriques:.....	42
III.2.3.Les avantages des ondes millimétriques :	44
III.2.4.Inconvénients des ondes millimétriques :	45
III.3. Caractéristique de propagation des ondes millimétriques :	45
III.3.1 .Une large bande passante:	45
III.3.2.Courte longueur d'onde :	45
III.3.3. Pertes en espace libre:.....	46
III.3.4 .Atténuation atmosphérique:.....	47
III.4.Antennes à ondes millimétriques:	48
III.4.1. Définition d'une Antenne :	48
III.4.2.Paramètres et caractéristiques d'antenne:	48
III.4.2.1.Diagramme de rayonnement :	49
III.4.2.2. Directivité :	51
III.4.2.5. Polarisation :	52

III.5.PATH LOSS MODEL :	53
III.6. Conclusion :.....	54
Chapitre IV: Simulation et Résultats	
IV.1 Introduction	56
IV.2 Logiciel et model utilise	57
IV.3 Simulateur de canal NYUSIM 5G	57
IV.3.1 Réseaux d'antennes MIMO pour TX et RX	57
IV.3 .2 Paramètres d'entrée.....	57
IV.4 Étude de la nature du climat dans El Oued :	65
IV.5 Répartition de la pression barométrique pour la ville d'El-Oued.....	67
IV.6 Analyse de MIMO pour l'environnement NLOS en utilisant la Microcellule Urbaine pour la ville d'EL Oued.	68
IV.6.1 Analyse de MIMO en utilisant différentes distances de séparation T-R.....	68
IV.6.2 Analyse de MIMO 2*2 en utilisant différentes distances de séparation T-R et température pour l'environnement NLOS	71
IV.7 Analyse de MIMO pour l'environnement LOS pour la ville d' EL Oued en utilisant la microcellule urbaine	75
IV.8 AoA , AoD et PDP pour MIMO 2 * 2 et 6*6 en utilisant différentes conditions.....	84
IV.8.1 Spectre de puissance des lobes AOA et AOD pour l'environnement NLOS	84
IV.8 .2 Spectre de puissance des lobes AOA et AOD pour l'environnement LOS	88
IV.8.3 Profil de retard de puissance omnidirectionnel et omnidirectionnel pour les systèmes NLOS et LOS à 73 GHz à une température de 22.8 C°	90
IV.8.4 Profil de retard de puissance directionnel et directionnel pour NLOS et LOS 73 GHz à 22.8 C°	92
IV.8.5 Perte de trajets	94
IV.9.Conclusion	97
Conclusion Générale	98
Bibliographie.....	100

Liste des figures

Figure I.1: Évolution des réseaux mobiles].....	7
Figure I. 2 L'efficacité spectrale	11
Figure I-3: Débit de données maximal	13
Figure I .4: Débit de donnée perçu par utilisateur	14
Figure I.5: Latence supporté pour 5G	15
Figure I-6: La mobilité supportée	16
Figure II.1 Schéma bloc d'un système MIMO.....	24
Figure II.2 Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO.....	26
Figure II.3 Système SISO.....	27
Figure II.4 Système MISO.....	28
Figure II.5 Système SIMO.....	28
Figure II. 6 Système MIMO.....	30
Figure II.7 une illustration de MIMO massif.....	31
Figure II.8 système massive MIMO en transmission multi –utilisateurs.....	32
Figure II.9 Single-User Massive MIMO.....	33
Figure II.10 Système MU-MIMO massif.....	34
Figure II.11 La BS dans la l-ième cellule et le k-ième UT dans la j-ième cellule.....	35
Figure II.12 Les régions de possibles (M, K) dans les systèmes TDD et FDD, pour un intervalle de cohérence de 200 symboles.....	37
Figure III .1 Quelques bandes millimétriques pour les applications 5G.....	42
Figure III .2 Absorption atmosphérique des ondes millimétriques en dB / km	43
Figure III .3 Pertes en espace libre entre antennes isotropes.....	47
Figure III. 4 Atténuation spécifique de O2 et H2O en fonction de la fréquence.....	48
Figure III.5 Exemple de diagramme de rayonnement.....	50
Figure III.6 Antenne en mode émetteur.....	52
Figure IV.1 Interface utilisateur graphique de NYUSIM.....	57
Figure IV.2 Spectre de puissance AoD et AoA pour 73GHz à 22.8C°.....	86
Figure IV.3 Spectre de puissance AoD et AoA pour 73 GHz à 10 C°.....	87
Figure IV.4 Spectre de puissance AoD et AoA pour 73GHz à 34 C°.....	88
Figure IV.5 Spectre de puissance AoD et AoA pour 73 GHz 34 C°.....	88
Figure IV.6 Spectre de puissance AoD et AoA pour 73 GHz 10 C°.....	89

Figure IV.7 Spectre de puissance AoD et AoA pour 73 GHz 34 C° .	89
Figure IV.8 PDP omnidirectionnel pour environnement NLOS 73 GHz.	91
Figure IV.9 PDP omnidirectionnel pour environnement LOS 73 GHz.	91
Figure IV.10 PDP directionnel pour environnement NLOS 73 GHz.	92
Figure IV.11 PDP directionnel pour environnement LOS 73 GHz.	92
Figure IV.12 Perte de trajet omnidirectionnelle et directionnelle pour NLOS 73GHz.	95
Figure IV.13 Perte de trajet omnidirectionnelle et directionnelle pour LOS 73GHz.	95

Liste des tableaux

Tableau I.1: Résumé des générations de communications mobiles.....	6
Tableau I.2: Comparaisons entre les performances de la 4G et de la 5G.....	18
Tableau I.3: Valeurs estimées sur des temps de téléchargement moyens.	18
Tableau II.1 : Comparaison entre le Massive MIMO et MIMO Traditionnel	38
Tableau IV.1 Statistiques climatiques sur une période de 22 ans.	66
Tableau IV.2 Pression atmosphérique moyenne de la ville d'El-Oued	67
Tableau IV.3 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario NLOS 73 GHz à 100 m de distance , pour l'antenne omnidirectionnelle).	69
Tableau IV.4 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario NLOS 73 GHz à 100 m de distance, pour l'antenne directionnelle).	69
Tableau IV.5 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario NLOS 73 GHz à 300 m de distance, pour l'antenne omnidirectionnelle).	69
Tableau IV.6 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario NLOS 73 GHz à 300 m de distance, pour l'antenne directionnell).	70
Tableau IV.7 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario NLOS 73 GHz à 600 m de distance, pour l'antenne omnidirectionnelle).	70
Tableau IV.8 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario NLOS 73 GHz à 600 m de distance, pour l'antenne directionnelle).	70
Tableau IV.9 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario NLOS 73 GHz à 34 C°, pour l'antenne omnidirectionnelle).	72
Tableau IV.10 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario NLOS 73 GHz 34 C°, pour l'antenne directionnelle).....	72
Tableau IV.11 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario NLOS 73 GHz à 10 C°, pour l'antenne omnidirectionnelle).	74
Tableau IV.12 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario NLOS 73 GHz 10C°, pour l'antenne directionnelle).....	74
Tableau IV.13 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario LOS 73 GHz à 100 m de distance, pour l'antenne omnidirectionnelle).	76

Tableau IV.14 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario LOS 73 GHz à 100 m de distance, pour l'antenne directionnelle).	76
Tableau IV.15 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario LOS 73 GHz à 300 m de distance, pour l'antenne omnidirectionnelle).	77
Tableau IV.16 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario LOS 73 GHz à 300 m de distance, pour l'antenne directionnelle).	77
Tableau IV.17 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario LOS 73 GHz à 600 m de distance, pour l'antenne omnidirectionnelle).	78
Tableau IV.18 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario LOS 73 GHz à 600 m de distance, pour l'antenne directionnelle).	78
Tableau IV.19 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario LOS 73 GHz à 10 C°, pour l'antenne omnidirectionnelle).	80
Tableau IV.20 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario LOS 73 GHz 10 C°, pour l'antenne directionnelle).	80
Tableau IV.21 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario LOS 73 GHz à 22.8 C°, pour l'antenne omnidirectionnelle).	82
Tableau IV.22 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario LOS 73 GHz 22.8 C°, pour l'antenne directionnelle).	82

Listes des acronymes et abréviations

1G	Première Génération
2G	Deuxième Génération
3G	Troisième Génération
4G	Quatrième Génération
5G	Cinquième Génération
IoT	Internet of Things
FDMA	Frequency Division Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CDMA	Code Division Multiple Access
3GPP	3rdGeneration Partnership Project
NGMN	Next Generation Mobile Networks
Mmtc	Massive Machine Type Communications
Urlc	Ultra-Reliable Low-Latency Communication
ITU	Union Internationale des Télécommunications
ITU-R	International Télécommunications Union
IMT	Radiocommunication
Embb	Enhanced Mobile Broadband
RAN	Radio Access Network
IdO	Internet des Objets
TDD	Time Division Duplexing
FDD	Frequency Division Duplexing
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MU-MIMO	Multi-User MIMO
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SIMO	Single Input Multiple Outputs.
MISO	Multiple Input Single Output
SU-MIMO	Single User MIMO
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BS	Base Station
RF	Radio Frequency
Wi-Fi	Wireless Fidelity
mm Wave	Des Ondes Millimétriques

FCC	Fédéral Communications Commission
FSPL	Free-Space Path Loss
UHDV	Ultra High Définition Vidéo
HDTV	High-Definition Television
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
TNT	Télévision Numérique Terrestre
SEE	Société de l'Electricité, de l'Electronique
LOS	Line Of Sight
NLOS	Non Line Of Sight
LAN	Local Area Network
ISI	Inter Symbol Interference
PDP	Power Delay Profile
AoA	Angle of Arrival
AoD	Angle of Departure
UMi	Urban Micro Cell
UMa	Urban Macro Cell
RMa	Rural Macro Cell
RMS	Root-Mean-Square
UE	User Equipment
CSI	Channel State Information
SSCM	Statistical Spatial Channel Mode
HPBW	Half Power Beamwidth
URA	Uniform Rectangular Array
ULA	Uniform Linear Array
CIR	Channel Impulse Response

PLE	Path Loss Exponent
PL	Path Loss
Pr	Puissance reçue
Hz	Hertz
KHz	Kilo Hertz
MHz	Mega Hertz
GHz	Giga Hertz
mm	Millimeter
cm	Centimeter
m	Meter
mbar	Millibar
dB	Decibe

Introduction générale:

Le rapide développement des technologies de communication a profondément remodelé notre société au cours des dernières décennies. Les communications mobiles occupent désormais une place centrale dans notre vie quotidienne, connectant les individus, les communautés et les entreprises du monde entier. Alors que nous pénétrons dans une ère caractérisée par la cinquième génération de réseaux mobiles, couramment désignée sous le nom de 5G, il est impératif de comprendre les avancées technologiques qui sous-tendent cette nouvelle ère de connectivité.

La technologie 5G représente une avancée majeure dans le domaine des communications mobiles, offrant une connectivité ultra-rapide, une latence réduite, une fiabilité accrue, et la possibilité de connecter un grand nombre d'appareils, ouvrant ainsi la voie à un éventail diversifié d'applications révolutionnaires.

Au cœur de cette transformation se trouvent les ondes millimétriques (mmWave), une bande de fréquences qui offre des capacités de transmission de données sans précédent, avec un accent particulier sur la bande de fréquence 73 GHz, qui constitue le cœur de notre analyse. En raison de ses caractéristiques uniques, cette bande de fréquences offre un terrain fertile pour la recherche et le développement de nouvelles technologies et services. Cette thèse s'attache à explorer en profondeur le rôle des ondes millimétriques (mmWave) dans le contexte du réseau mobile de cinquième génération (5G). Nous mettrons également en évidence l'utilisation du MIMO (Multiple Input Multiple Output), une technologie de transmission avancée, pour exploiter pleinement le potentiel des ondes millimétriques dans le cadre de la 5G. Les simulations effectuées à l'aide de l'outil NYUSIM constitueront notre principal moyen d'évaluation et d'amélioration des performances de ces systèmes complexes dans divers scénarios.

Cette recherche vise à apporter une contribution significative à la compréhension et à l'amélioration des systèmes de communication sans fil de cinquième génération dans cette bande de fréquences fascinante et exigeante. Pour ce faire, le manuscrit de recherche est structuré en une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale.

Introduction générale

Le premier chapitre offre un aperçu du réseau 5G et de ses objectifs, comprenant une étude historique de l'évolution des réseaux de téléphonie mobile jusqu'à l'émergence de la cinquième génération, avec des comparaisons entre les différentes générations.

Le deuxième chapitre présente les concepts fondamentaux de la technologie MIMO massif, suivi d'une exploration du MIMO traditionnel, de ses types et de ses caractéristiques.

Dans le troisième chapitre, nous fournissons une vue d'ensemble complète des ondes millimétriques, qui se distinguent par leur capacité à transmettre d'énormes volumes de données à des vitesses exceptionnelles. Nous examinons en détail le rôle crucial des antennes dans la réception et la transmission de ces ondes, tout en analysant l'impact des facteurs environnementaux sur leurs performances.

Enfin, le quatrième chapitre se penche sur l'incidence des éléments naturels sur les ondes millimétriques à une fréquence de 73 GHz, dans le contexte de la technologie mmWave. Cette analyse repose sur l'utilisation de modèles de canaux NYUSIM pour étudier divers scénarios et leurs implications.

Cette thèse aspire à enrichir notre compréhension des systèmes de communication de cinquième génération, notamment dans le domaine exigeant des ondes millimétriques, et à contribuer ainsi aux progrès futurs de cette technologie révolutionnaire.

Chapitre I

Enjeux De La 5G

I.1 -Introduction :

De nos jours, l'utilisation des technologies de communication mobile est très répandue, ce qui pose des défis aux réseaux de télécommunications en raison de leur grande diversité. Jusqu'à présent, chaque génération de réseaux mobiles (1G, 2G, 3G, 4G) a été conçue pour répondre à des besoins spécifiques liés à des applications particulières. Cependant, la 5G (cinquième génération) représente un changement majeur, car elle vise à satisfaire une gamme variée de besoins, y compris les nouveaux appareils communicants tels que l'Internet des objets (IoT).

La 5G, en tant que cinquième génération, offre des fonctionnalités avancées pour résoudre les défis de notre vie quotidienne moderne. Elle ne se limite pas aux besoins des opérateurs de téléphonie mobile et du grand public, mais ouvre également de nouvelles perspectives pour l'avenir en permettant la coexistence d'applications et d'utilisations diverses au sein d'une même technologie. Cette évolution vise à créer une société totalement connectée, offrant un accès illimité aux informations et aux communications virtuelles, à tout moment et en tout lieu, non seulement pour les appels, mais également pour la connexion à tous les types d'appareils.

I.2 - Historique des générations :

La prochaine génération de technologie sans fil mobile sera appelée la « 5G ». Comme son appellation l'indique, elle succède aux générations antérieures de la téléphonie mobile. La première génération de téléphones mobiles, désignée sous le nom de « 1G » ou « téléphones de voiture », fit son apparition vers 1980. Ces téléphones, lancés sur le marché par Motorola, fonctionnaient comme des radios et utilisaient des fréquences en mode analogique. Au début des années 1990, les téléphones de deuxième génération, baptisés « 2G », firent leur entrée, apportant avec eux la transition vers les réseaux numériques. Les taux de transfert de données pour ces téléphones demeuraient bien en deçà de 1000 bits par seconde (bps), mais des améliorations notables en termes de performances furent introduites en l'an 2000, aboutissant à la dénomination de « 2,5G ». Peu de temps après, la troisième génération (« 3G ») fit son avènement, atteignant des débits de données de 100 000 bps. Cette amélioration était significative, permettant notamment la transmission d'appels vidéo restreints et la mise en place de connexions Internet à des vitesses raisonnables. Des améliorations supplémentaires furent apportées au codage numérique de la communication, incarnées par les versions « 3,5G » vers 2009 et « 3,9G » en 2012.

En 2015, avec l'adoption de la norme ultérieure désignée comme la génération « 4G », des vitesses de transmission dix fois plus rapides devinrent possibles [1]

Le **tableau I.1** récapitule les caractéristiques spécifiques des différentes générations de systèmes de communication mobiles.

Génération	1G	2G	3G	4G	5G
1ère année de déploiement	1981	1992	2001	2010	2020
Débit de données	2 kbs	64kbs	2Mbs	100Mbs	10Gbs
fréquences	900Mhz	900 Mhz et 1,8 Ghz	800 900 Mhz 1,7à 1,9Ghz 2100Mhz	800Mhz 900Mhz 1800Mhz 2100Mhz 2600Mhz	28Ghz 37Ghz 39Ghz 64-71Ghz
Description fonctionnelle générale	Téléphones cellulaires analogiques	Téléphones cellulaires numériques (GSM/CDMA)	Première bande passante mobile utilisant des	Le haut débit mobile sur un standard unifié	Internet tactile - Améliorer le réseau de communication M2M

Tableau I.2: Résumé des générations de communications mobiles. [2].[3]

En observant la **figure I.1**, nous voyons une période de 10 ans entre les principales générations de technologies de communication sans fil.

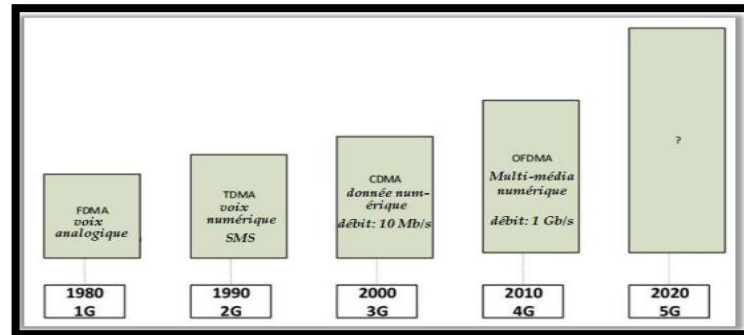


Figure I.1: Évolution des réseaux mobiles.[3]

Bien que son nom puisse prêter à confusion, la 5G ne se contente pas d'améliorer les normes de télécommunication précédentes. En réalité, elle incarne une véritable innovation disruptive destinée à révolutionner le secteur des communications. Cette technologie a le potentiel de provoquer des transformations majeures dans les modèles commerciaux actuellement adoptés par les opérateurs, et ce malgré les apparences. [1]

I.3 - La 5eme Génération :

La 5G, ou les réseaux mobiles de cinquième génération, englobe un ensemble de technologies qui marquent la prochaine grande avancée dans les normes de télécommunications mobiles, évoluant à partir des standards actuels de la 4G LTE (Long Term Evolution). Cette transition vers la 5G est soutenue par des organismes renommés tels que l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) et le consortium 3GPP (Projet de Partenariat de Troisième Génération). Prévues pour être pleinement opérationnelles vers 2020 [4], la 5G ne peut être définie de manière univoque [5]. Cependant, à sa base, elle représente la cinquième étape des réseaux cellulaires, marquant ainsi la prochaine phase de la technologie mobile et définissant l'usage futur des appareils tels que téléphones et tablettes pour les données.

Chaque génération de réseau a une durée de vie d'environ 20 ans. Si la 4G a vu ses premiers travaux amorcés en 2003 pour être déployée en 2010 et opérer jusqu'en 2030, la réflexion sur la 5G a débuté en 2012 pour une commercialisation à partir de 2020.

Deux acteurs majeurs spécifient une nouvelle génération de téléphonie mobile : les exigences techniques IMT-2020 de l'UIT-R, prévues pour être finalisées en février 2017, et le rapport technique sur les scénarios et exigences du 3GPP, achevé en mars 2017 [4].

L'objectif principal de la 5G est de fournir des débits de données très élevés à une multitude d'utilisateurs, tout en supportant simultanément de multiples connexions pour prendre en charge une multitude de capteurs. Cette technologie vise également à améliorer l'efficacité spectrale du réseau [3], ouvrant ainsi la voie à des avancées significatives dans le domaine des communications sans fil.

I.4 - Objectifs de la 5G :

La 5G est la technologie qui permet les connexions et les téléchargements plus rapides que les autres générations et intègre toute une série de nouveaux usages, la future de la technologie 5G n'y fera pas exception en se concentrant sur l'internet des objets les objectifs la 5G vise à :

- L'amélioration de la vitesse de transmission des données.
- Un temps de latence plus court donne l'impression que le réseau est très réactif.
- (1 milliseconde de latence). 100% de couverture.
- 90% de réduction en utilisation énergie du réseau.
- Jusqu'à 10 ans de durée de vie de la batterie.
- 1000 fois plus de bande passante par unité de la surface.
- Jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface.
- 99,999% de disponibilité.
- La vitesse de transmission des données est double par rapport à 4G. [6]

Une multitude d'applications découlent de l'utilisation de cette technologie, couvrant un large éventail de domaines. À titre d'exemple, elle permet d'enrichir les fonctionnalités de la maison connectée, de propulser le développement des véhicules autonomes, de rendre possible l'expérience immersive des vidéos et de transformer le secteur médical. L'objectif central de ces avancées est de simplifier la vie quotidienne des individus, en leur offrant des solutions innovantes qui répondent à leurs besoins et facilitent leurs activités. [7]

1.5 - Familles d'usage 5G :

L'Union internationale des télécommunications (UIT) a défini trois grandes catégories d'usages pour le standard IMT-2020, qui est plus couramment connu sous le nom de 5G :

1.5.1- MMTC – Massive Machine Type Communications :

Ce scénario d'application se distingue par la présence d'un nombre considérable d'appareils connectés, qui transmettent typiquement des quantités de données relativement modestes et non sensibles à des intervalles rapides. Il est primordial que ces appareils présentent un faible coût de fabrication et une autonomie extrêmement étendue. L'objectif majeur de cette catégorie est de faire face à la croissance exponentielle de la densité d'objets interconnectés, en mettant en place des solutions adaptées pour répondre à ce défi. .[4]

1.5.2 - EMBB – Enhanced Mobile Broadband :

Connexion en ultra haut débit en outdoor et en indoor avec uniformité de la qualité de service, même en bordure de cellule.[4].

1.5.3 - URLLC – Ultra-reliable and Low Latency Communications:

Ce scénario d'application se caractérise par des demandes rigoureuses concernant des capacités essentielles telles que le débit, .[4] la latence et la disponibilité. Parmi les exemples notables figurent le contrôle à distance des procédés industriels de fabrication ou de production, la réalisation de procédures chirurgicales médicales à distance, l'automatisation de la distribution au sein d'un réseau intelligent, ainsi que la sécurisation des systèmes de transport, entre autres.

I.6 - Fréquences utilisées pour la 5G :

La 5G représente une avancée majeure étant la première génération à fonctionner à travers trois plages de fréquences radio distinctes : les bandes basses, moyennes et élevées. [8]

- La 5G à basse bande opère dans des fréquences inférieures à 2 GHz, englobant ainsi les fréquences cellulaires les plus anciennes. Bien qu'elle offre une couverture étendue, les canaux disponibles sont limités et la plupart sont déjà utilisés par la 4G. En conséquence, la 5G à basse bande affiche une vitesse relativement modérée et présente des similitudes avec la 4G en termes de performances.
- La 5G à bande moyenne utilise les fréquences de 2 à 10GHz. Ceci couvre la plupart des fréquences WIFI et cellulaires actuelles.
- La 5G à bande haute, il est possible d'utiliser jusqu'à huit canaux 100MHz. Les ondes millimétrées sont la véritable nouveauté. Il s'agit d'ondes comprises entre 20 et 100GHz. Ces ondes n'avaient presque jamais été utilisées auparavant pour des applications grand public.

Les fréquences déjà utilisées par les autres générations pourront également être utilisées pour la 5G : 800 Mhz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz [8]

I.7 - Avantages et inconvénients de la 5G :

I.7.1 - Avantages :

- **Débit** : La 5G va permettre d'aller vite, beaucoup plus vite : des débits de 10 Gbit/s contre 100 Mb/s aujourd'hui. Ce débit peut se comparer avec le réseau de fibres standard disponible chez vous actuellement.
- **Latence réduite** : désigne le délai entre une action et le déclenchement d'une réaction.
- **Objets connectés** : Tous vos objets du quotidien vont pouvoir être connectés simplement et à moindre coût au réseau. C'est l'explosion des volumes de données transmises. . [9].

I.7.2 - Inconvénients :

Le déploiement futur du réseau 5G suscite cependant certaines inquiétudes, principalement en ce qui concerne l'exposition aux ondes. En effet, le débat sur l'impact des radiofréquences sur notre santé et notre environnement persiste. L'arrivée de la 5G, de la même manière que la 4G, entraînera inévitablement une augmentation de l'exposition aux ondes, nécessitant l'installation de nouvelles antennes pour assurer une couverture 5G optimale sur le territoire. Afin d'évaluer les éventuels risques pour la santé liés à la 5G, les expérimentations pilotes actuellement en cours en France visent à mesurer les niveaux d'exposition du public aux ondes. L'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses) devra également définir les limites sanitaires à mettre en place pour encadrer le déploiement du réseau 5G [9].

I.8 - Les exigences de la 5G :

I.8.1 - Efficacité spectrale :

L'efficacité spectrale (η) est une mesure qui définit le débit global pour l'ensemble des utilisateurs, représenté par le nombre de bits correctement reçus, c'est-à-dire le nombre de bits contenus dans les unités de données de service (SDU) délivrées à la couche 3, sur une période donnée. Cette valeur est ensuite divisée par la largeur de bande du canal, laquelle est elle-même divisée par le nombre de cellules. La largeur de bande du canal utilisée dans ce contexte est déterminée en prenant en compte la largeur de bande effective multipliée par le facteur de réutilisation de la fréquence. La largeur de bande effective, quant à elle, est calculée en normalisant la largeur de bande de fonctionnement de manière appropriée, en tenant compte du rapport entre la liaison montante et la liaison descendante. En conséquence, l'efficacité spectrale est exprimée en bit/s/Hz [10]

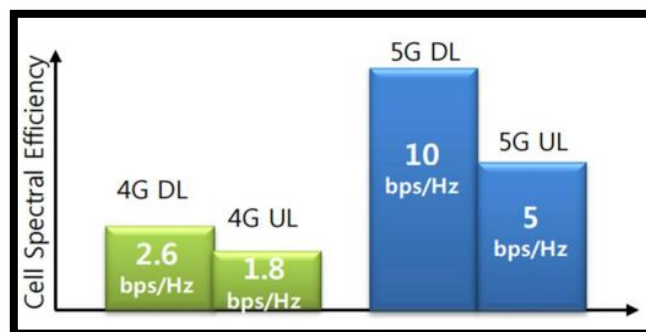


Figure I. 2 L'efficacité spectrale [10]

Soit ψ_i le nombre de bits correctement reçus par l'utilisateur i (liaison descendante ou montante) dans un système comprenant une population de N utilisateurs et de M cellules. De plus, notons w la largeur de bande du canal et T le temps pendant lequel les bits de données sont reçus. L'efficacité spectrale dans une cellule est alors définie par [10] :

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N X^i}{T \cdot \omega \cdot M} \quad (\text{I.1})$$

X^i : représente le nombre de bits correctement reçus par utilisateur dans une liaison montant i ou dans une liaison descendante i dans un système comportant un nombre N populations d'utilisateurs et M cellules

ω : désigne la largeur de bande du canal de transmission.

T : le temps nécessaire pour que les bits d'informations puissent être reçus par l'utilisateur. Cette exigence est définie principalement à des fins d'évaluation dans le scénario d'utilisation d'EMBB. Les exigences minimales pour les efficacités spectrales pour l'ITM-2020 sont les suivantes.

I.8.2 - Débit de données maximal :

Le débit de données de pointe représente le niveau maximal théoriquement atteignable en termes de transfert de données, attribuable à une unique station mobile, sous l'hypothèse que les conditions sont parfaites et exemptes d'erreurs. Cela suppose également que toutes les ressources radio disponibles sont exploitées pour soutenir le lien correspondant. Dans cette situation, les ressources radio dédiées à des tâches telles que la synchronisation de la couche physique, les signaux de référence ou les pilotes, les bandes de garde ainsi que les intervalles de temps réservés à la transition entre les signaux, sont exclues du calcul. [10]

Pour garantir la performance requise du débit de données de pointe, une valeur minimale de 20 Gbps a été établie comme norme à respecter. Cette norme reflète l'objectif de fournir des capacités de transmission de données à des niveaux exceptionnellement élevés, en tenant compte des progrès technologiques et des exigences croissantes en matière de communication sans fil.

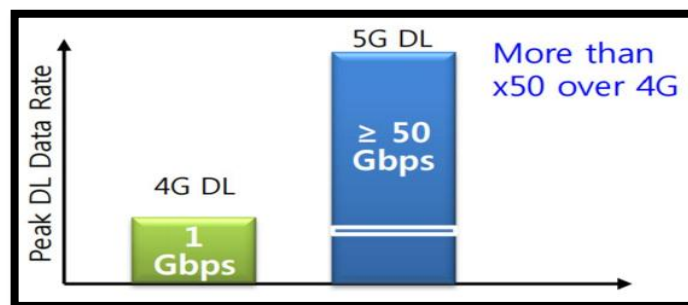


Figure I-3: Débit de données maximal [10]

I.8.3 - Débit de donnée perçu par utilisateur :

C'est le point à 5% de la fonction de distribution cumulative (CDF) du débit utilisateur. Le débit utilisateur (pendant la durée d'activité) est défini comme le nombre de bits correctement reçus, c'est-à-dire le nombre de bits contenus dans les unités de données de service (SDU) livrées à la couche 3, sur une certaine période [10].

Les valeurs cibles pour le débit de données expérimenté par l'utilisateur dans l'environnement sont les suivantes :

- Le débit de données expérimenté par l'utilisateur de liaison descendante est de 100 Mbit/s.
 - Le débit de données expérimenté par l'utilisateur de liaison montante est de 50 Mbit/s.
- Considérons ψ_i comme le nombre de bits correctement reçus de l'utilisateur i , T_i le temps de session actif de l'utilisateur i , le débit de données de l'utilisateur i , y_i est défini par:

$$y_i = \frac{\psi_i}{T_i} \text{ Mbit/s} \quad (\text{I.2})$$

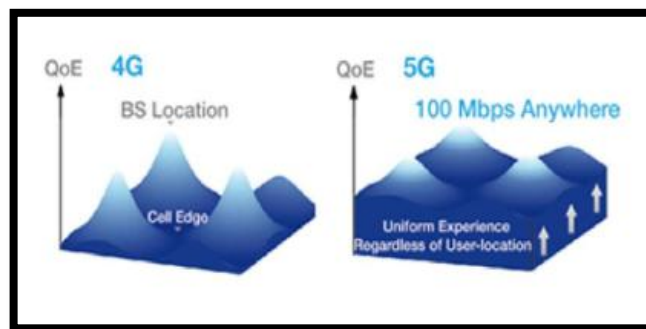


Figure I.4: Débit de donnée perçu par utilisateur [10]

I.8.4 - Latence :

a) Latence du plan utilisateur :

Il s'agit de la contribution du réseau radio à l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant où un paquet est émis par la source et celui où il est réceptionné par la destination, mesuré en millisecondes. Cette valeur correspond au temps unidirectionnel nécessaire pour acheminer avec succès un paquet depuis la couche application jusqu'au point d'entrée SDU de la couche de protocole radio, pour un service spécifique, dans des conditions où le réseau n'est pas surchargé. Cette mesure est établie en considérant l'état actif de la station mobile. [10]

Dans le contexte de la norme 5G, une latence minimale de 1 milliseconde est requise pour le plan utilisateur. Cette exigence souligne l'importance de garantir des temps de transmission exceptionnellement rapides, contribuant ainsi à des expériences utilisateur optimales et à la prise en charge de diverses applications nécessitant des délais de communication extrêmement courts.

b) Latence du plan de contrôle :

La latence du plan de contrôle, également appelée plan C, est couramment évaluée en tant que durée de changement entre différentes configurations de connexion, telles que le passage de l'état inactif à l'état actif. Cette mesure de transition, excluant les délais liés à la recherche de la liaison descendante ainsi qu'aux processus de signalisation via le réseau filaire, doit être maintenue en dessous ou égale à 50 millisecondes. [10] Cette exigence vise à permettre la transition rapide de l'état inactif à l'état actif, favorisant ainsi l'établissement efficace du plan utilisateur.

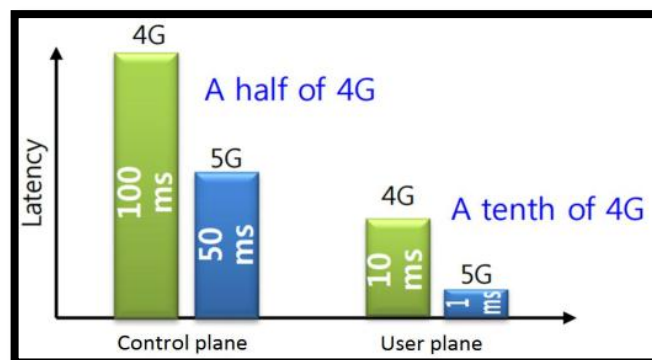


Figure I.5: Latence supporté pour 5G [10]

I.8.5 - Mobilité :

Une classe de mobilité est prise en charge si le lien de canal de trafic peut être maintenu lorsque l'utilisateur se déplace à la vitesse maximale dans cette classe de mobilité [10].

Les classes de mobilité sont définies comme suit :

- stationnaire: 0 km / h
- Piéton: > 0 km/h à 10 km/h
- Véhicule: 10 à 120 km/h
- Véhicule à grande vitesse: 120 à 350 km/h
- Train à Très Grande Vitesse: 350 à 500 km/h

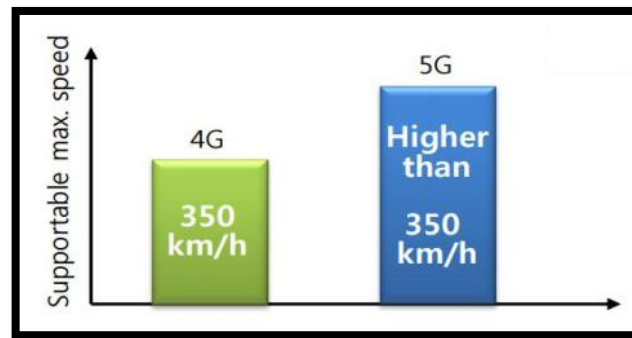


Figure I-6: La mobilité supportée [10]

I.8.6 - Capacité de trafic d'une zone :

Il s'agit du débit global de trafic qui est desservi dans une zone géographique spécifique, mesuré en mégabits par seconde par mètre carré (Mbit/s/m²). Dans ce contexte, le débit est calculé en fonction du nombre de bits correctement reçus, c'est-à-dire les bits inclus dans les unités de données de service (SDU) transmises à la couche 3, au cours d'une période donnée.

Dans le cadre de la norme 5G, la valeur cible établie pour la capacité de trafic en liaison descendante dans une zone est de 10 mégabits par seconde par mètre carré (10 Mbit/s/m²). Cette mesure illustre l'objectif de fournir une capacité de transmission de données à un niveau spécifique, tout en tenant compte de la surface géographique couverte par le réseau, afin de répondre aux besoins de communication actuels et futurs. [10]

I.8.7 - L'efficacité énergétique des réseaux :

L'efficacité énergétique d'un réseau se réfère à la capacité inhérente d'une technologie d'interface radio (RIT) ou d'un ensemble de technologies d'interface radio (SRIT) à minimiser la consommation d'énergie du réseau d'accès radio par rapport à la capacité de trafic fournie. Pour sa part, l'efficacité énergétique d'un périphérique se rapporte à la capacité du RIT/SRIT à réduire la consommation d'énergie du modem de l'appareil, en corrélation avec les caractéristiques du trafic qui y transite. Dans les deux cas, une mesure métrique exprimée en bits par joule (bit/J) est spécifiée . L'efficacité énergétique du réseau et du périphérique peut se pencher sur les deux aspects suivants : [10]

- ❖ Une transmission de données efficace, même dans des conditions de charge élevée du réseau. Cela implique que le réseau parvienne à maintenir des performances de transmission optimales tout en utilisant une quantité minimale d'énergie.
- ❖ Une faible consommation d'énergie lorsque la transmission de données est absente, c'est-à-dire durant les périodes où aucune donnée n'est transférée. Ceci assure que le réseau et les appareils consomment le moins d'énergie possible lorsqu'ils ne sont pas activement engagés dans la communication.

Cette dualité d'efficacité énergétique englobe à la fois l'optimisation des performances en période de trafic élevé et la réduction de la consommation d'énergie lorsque le trafic est faible ou inexistant, contribuant ainsi à une utilisation plus judicieuse des ressources énergétiques.

I.8.8 - La densité de connexion :

La connectivité en 5G n'est tout simplement pas limitée aux appareils mobiles. Au lieu de cela, chaque unité utilisant une fonction modem se connectera pour des raisons de sécurité, de communication, de vie agréable, etc. [10]

II.9 - Comparaison entre 4G et 5G :

Le tableau ci-dessous résume les performances attendues de la 5G et celles qui sont actuellement disponibles avec la 4G : [11]

3:

Caractéristiques 4G 5G	4G	5G
Débit maximal (Gbit/s)	1	20
Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
Efficacité spectrale	1x	3x
Vitesse (km/h)	350	500
Latence (ms)	10	1
Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/ km ²)	10 ⁵	10 ⁶
Efficacité énergétique du réseau	1x	100x
Débit sur une zone (Mbit/s/m ²)	0.1	10

Tableau I.2: Comparaisons entre les performances de la 4G et de la 5G [11]

• Le temps de téléchargement :

La 5G absorbera la croissance exponentielle du trafic mobile, et rendra possible un grand nombre de cas d'usages par l'amélioration des débits en mobilité et la meilleure qualité de la connexion. [12]

	Vitesse de téléchargement		
	Film HD 30 GO	Album MP3	200 Photos
4G	1h40m	15s	1mn20s
5G	20mn	35s	16s

Tableau I.3: Valeurs estimées sur des temps de téléchargement moyens. [12]

I.10 – Applications :

Le réseau 5G, contrairement aux réseaux mobiles actuels, ne sera pas axé prioritairement sur la téléphonie. Cette particularité est un challenge et fera la force de celle-ci. Ce réseau mondial repose sur l'utilisation de toutes les communications disponibles [13]. En effet on peut identifier plusieurs applications majeures auxquelles devra servir le réseau 5G :

- ❖ La ville intelligente (smart-city) dont l'infrastructure pourrait être gérée plus efficacement tout en optimisant sa consommation de ressources grâce à des réseaux de capteurs complexes.
- ❖ La maison connectée qui grâce à des capteurs et à la domotique pourra être gérée, notamment en terme de ressources, et utilisée facilement et efficacement ou encore sécurisée à distance.
- ❖ Les transports connectés, avec notamment l'avènement des voitures autonomes, qui permettra de sécuriser et d'optimiser le réseau routier.
- ❖ La santé connectée avec des innovations majeures telles que la chirurgie à distance des patients et personnes à risques [13].

D'autres applications moins révolutionnaires mais tout aussi majeures sont à prévoir dans les domaines de l'industrie, la logistique et la sécurité. Le divertissement reste une source d'applications futures orientées vers l'utilisateur telles que la réalité virtuelle, le jeu en réseau, le streaming vidéo en ultra haute définition, la télévision interactive en haute définition et de nombreuses applications auxquelles nous ne pensons pas encore devraient voir le jour. L'amélioration du réseau mobile et de la qualité d'expérience sont bien entendu des objectifs Clés de la 5G : tout et tout le monde sera connecté partout tout le temps.

I.11 - Spectre 5G :

Le spectre a joué un rôle central tout au long de l'évolution technologique de la 1G à la 5G, en réponse aux demandes croissantes d'une utilisation efficace de cette ressource. Pour répondre à ces besoins, il est crucial de mettre en place des procédures de gestion du spectre et des systèmes (informatisés) efficaces. Ceci facilite le déploiement optimal des systèmes radioélectriques tout en minimisant les risques d'interférences indésirables [14]. Tout au long de ce processus, diverses caractéristiques telles que la conformité aux normes, la sécurité, l'efficacité et autres paramètres pertinents sont attentivement pris en considération [15].

Le spectre de la 5G peut être largement divisé en trois :

- ❖ 1 GHz : Utilisé pour la couverture haut débit 5G, IoT (Internet des objets).
- ❖ 1-6 GHz : Utilisé pour les applications de couverture et de capacité.
- ❖ Au-delà de 6 GHz : Haut débit mobile à très haut débit.

L'IMT-2020 (5G) propose des bandes de fréquence inférieures à 6 GHz. La décision finale sur les propositions sera prise lors de la WRC-19. Pour les fréquences supérieures à 6 GHz, des travaux très intéressants sont en cours dans certaines bandes de fréquences. Cela comprendra 14, 18, 28, 60 GHz, etc [14, 15].

I.12 – Conclusion :

L'évolution technologique continue de remodeler notre monde et notre mode de vie personnel. Dans cette continuité, la 5G se rapproche rapidement pour satisfaire les exigences de notre époque actuelle, où la rapidité et la disponibilité élevée constituent des critères prépondérants.

Au sein de ce chapitre, nous entreprenons de détailler la cinquième génération de technologie de communication et ses objectifs. Ensuite, nous explorons les gammes de fréquences ainsi que les technologies mises en œuvre au sein de la 5G.

Chapitre II

Technologie massif MIMO de la 5G

II.1. Introduction :

Avec l'augmentation rapide de l'utilisation des systèmes de communication sans fil, la plupart des recherches dans ce domaine se sont concentrées sur la mise en œuvre de nouvelles technologies pour accroître l'efficacité des réseaux sans fil. Lors de la conception de nouvelles générations de réseaux sans fil, il y a toujours le problème des limitations de bande passante, qui sont causées par des bandes passantes faibles et des capacités de transmission souvent limitées. Pour surmonter ces obstacles, la nouvelle technologie du, baptisée MIMO (Multiple-Input Multiple Output), tente d'exploiter la dimension spatiale en installant plusieurs antennes sur les émetteurs et/ou récepteurs. L'utilisation de cette technologie permet donc une augmentation significative de la vitesse de la liaison de transmission (à vitesse et débit identiques). La technologie MIMO et Massive MIMO est l'une des nouvelles technologies les plus innovantes dans le monde sans fil [16].

Aussi MIMO massive, cette technologie se présente comme l'une des méthodes les plus prometteuses pour les systèmes 5G révolutionnaires pour les réseaux mobiles et l'Internet des objets (IoT, de Internet of Things).

Dans ce chapitre, nous présentons une description de la technologie MIMO et son évolution Massive MIMO ; ainsi que les différentes catégories des deux systèmes.

II.2 . Les systèmes MIMO:

La technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) est une avancée majeure dans les systèmes de communication sans fil. Elle repose sur le concept d'utiliser plusieurs émetteurs et récepteurs pour transmettre et recevoir simultanément des données. Cette technologie tire parti du phénomène des trajets multiples, où les signaux rebondissent sur diverses surfaces pour atteindre l'antenne de réception sous différents angles et à des moments légèrement décalés.

MIMO améliore considérablement les performances et la portée des réseaux sans fil en augmentant le débit de données, en réduisant les interférences et en optimisant la qualité du signal. Il rend les antennes plus intelligentes en exploitant au maximum leur potentiel. En utilisant des antennes excédentaires, MIMO ajoute de la diversité aux récepteurs, ce qui renforce la fiabilité de la communication sans fil. Cette technologie est essentielle pour répondre à la demande croissante en matière de connectivité haut débit et pour soutenir les applications avancées telles que la 5G et l'Internet des objets (IoT). [17].

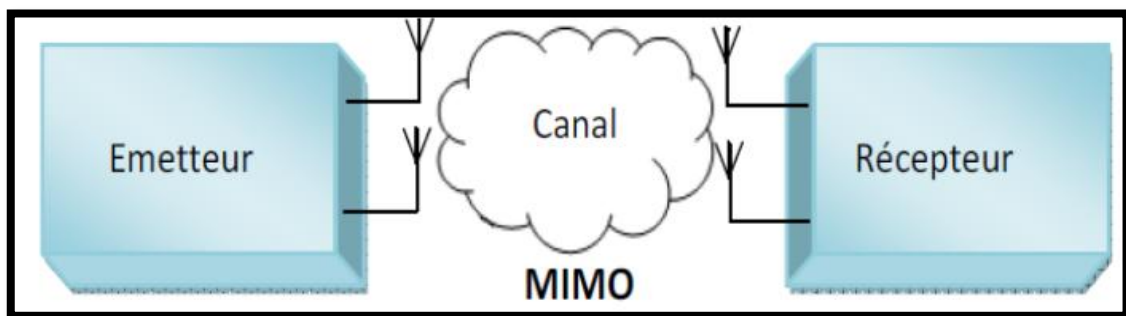


Figure II .1: Schéma bloc d'un système MIMO [18].

Il est clair que la richesse en multi-trajets peut augmenter clairement la capacité du système en se basant sur la diversité spatiale présente dans le canal. C'est dans ce contexte que se justifie notre choix de la technique MIMO à implémenter au sein du milieu en vue d'assurer des communications fiables et à haut débit. [17]. [18].

II.3. Principes du MIMO :

Comme cela a été expliqué précédemment, la principale source des perturbations, que subit un signal lors de sa propagation, est le canal. En effet, à cause des phénomènes de propagation multi-trajets, le signal subit des évanouissements, des décalages fréquentiels ou même temporels. Contrairement aux systèmes classiques, les systèmes à diversité prennent avantage de ces types de propagation pour améliorer les performances du système. Pour mettre en place ces améliorations, les systèmes MIMO exploitent les techniques de : [18]

- ❖ *Diversité d'espace* : Aussi connue sous le nom de diversité d'antenne
- ❖ *Diversité fréquentielle* : Cette technique demande l'envoi du même signal sur des fréquences différentes. Il faut toutefois faire attention à la largeur de bande cohérente et à l'étendue fréquentielle due aux multi-trajets et aux distances à franchir par la transmission.
- ❖ *Diversité temporelle* : Lorsque l'on sépare l'envoi du même signal par le temps cohérence du canal, il est possible de profiter de la diversité temporelle. Tout dépend également de la vitesse de déplacement du mobile et de la fréquence porteuse. [19]

II.4 .Types de MIMO:

De part le nombre d'antennes existant dans les différents dispositifs d'antennes, nous pouvons distinguer quatre configurations (systèmes) :

- SISO - Single Input Single Output
- MISO - Sortie unique à entrées multiples
- SIMO - Entrée unique Sortie multiple
- MIMO - Entrée multiple Sortie multiple

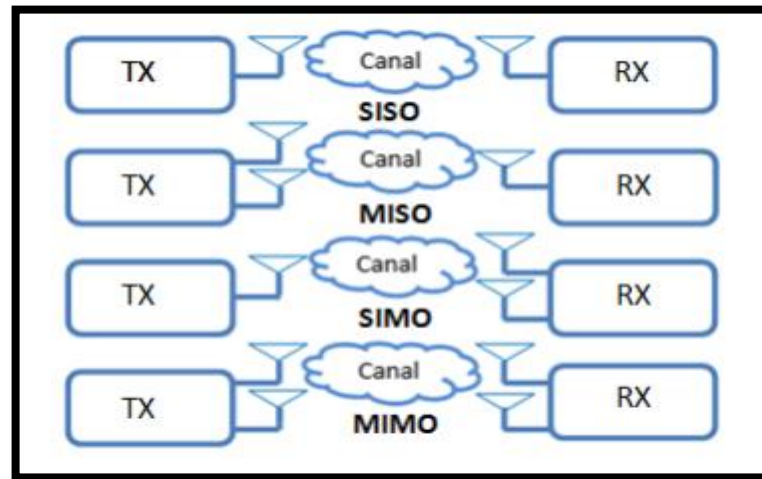


Figure II.2: Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO. [20]

II.4.1 Système SISO:

C'est la plus simple des architectures radio peut définies en termes MIMO comme SISO – Single Input Single Output. Ce système ressemble à un canal radio standard (l'émetteur fonctionne avec une antenne comme le récepteur. Il ne nécessite aucun traitement en fonction de diversité ni aucun autre traitement). [21] La capacité du canal SISO est donnée par:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{W N_0} \right) \text{ bps} \quad (\text{II.1})$$

Où :

P : La puissance du signal utile en Watt.

N₀ : La densité spectrale de puissance du bruit calculé en W/Hz.

W : La bande passante donnée en Hz.

En normalisant la capacité par la bande utile **w**, on obtient :

$$C = \log_2 (1 + p) \text{ bps} \quad (\text{II.2})$$

Avec **p** le rapport signal sur bruit (**P/N₀**)

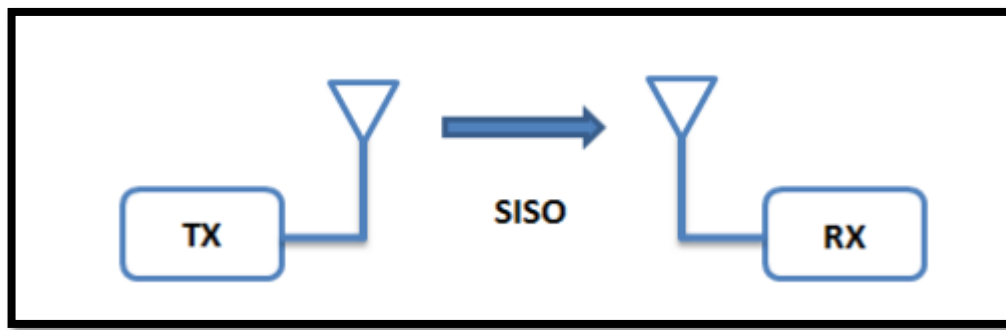


Figure 11.3. Système SISO. [22]

II.4.2. Système MISO:

MISO est aussi appelé diversité d'émission. Dans ce cas, les données sont transmises en redondance à partir des deux antennes émettrices. A la réception les données sont alors seront récupérées par le traitement du signal optimal reçu (la somme des signaux des deux chemins).

[21]

La capacité du canal MISO :

$$C = \log_2 \left(1 + N_t \frac{P_i}{W N_0} \right) = W \log_2 \left(1 + N_t \frac{P_i}{W N_0} \right) \quad (\text{II.3})$$

N_t : Nombre d'antenne d'émission.

En normalisant la capacité par la bande utile W , nous obtenons :

$$C = \log_2 (1 + p) \text{ bps}$$

L'équation 1.5 et 1.6 sont identiques, mais l'avantage de la technique de la MISO par rapport à la technique SISO est que dans les multi trajets, la probabilité d'évanouissement dans antennes est inférieure à la probabilité d'évanouissement sur une seule antenne. [21]

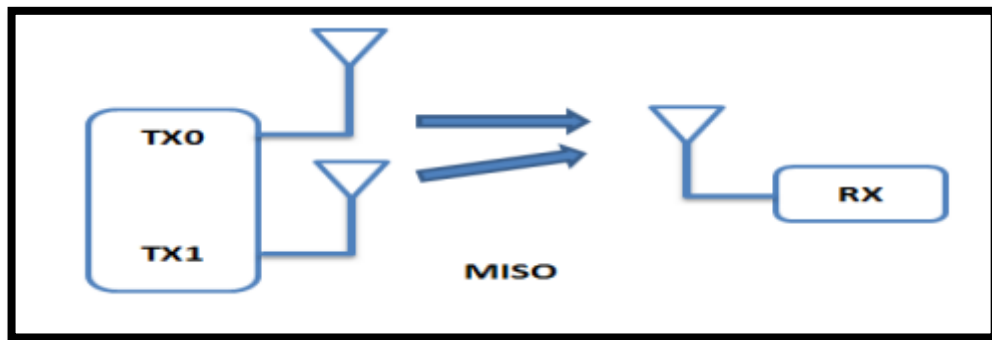


Figure II.4. Système MISO. [22]

II.4.3 .Système SIMO:

Le système SIMO utilise à l'émission une seule antenne et plusieurs antennes à la réception. Il est souvent utilisé pour lutter contre les effets de la décoloration qui se produit lors de la réception de plusieurs signaux d'un certain nombre de sources indépendantes. [21]

La capacité du canal SIMO :

$$C = W \log_2 \left(1 + N r^2 \frac{P}{W N_0} \right) \text{ bps} \quad (\text{II.4})$$

N_r : Le nombre d'antenne réceptrice.

En normalisant la capacité en par la bande utile W , nous obtenons :

$$C = \log_2 (1 + N r^2 p) \text{ bps} \quad (\text{II.5})$$

Avec p le rapport signal sur bruit.

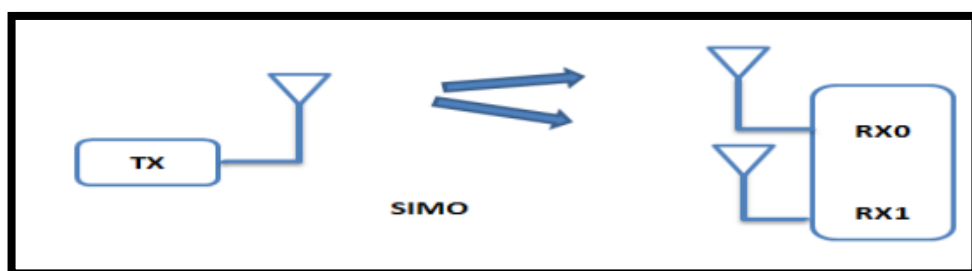


Figure II.5. Système SIMO. [22]

II.4.4. Système MIMO:

La technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) repose sur antennes De transmission et antennes de réception. MIMO peut être utilisé pour améliorer la capacité des canaux ainsi que le débit de canal. Dans le cas de la figure 1.5 ou nous avons un système MIMO à émetteurs et récepteur ,le canal MIMO est traduit par une matrice H de taille $N M$ dite matrice de canal H . [22]

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_{R_1}} & h_{N_{R_2}} & \dots & h_{N_T N_t} \end{pmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Un signal MIMO peut être défini par :

$$Y = HX + \eta \quad (\text{II.7})$$

Ou

X : la séquence émit.

Y : la séquence reçue.

η : représente le bruit qui corrompt le signal lors de la traversée du canal.

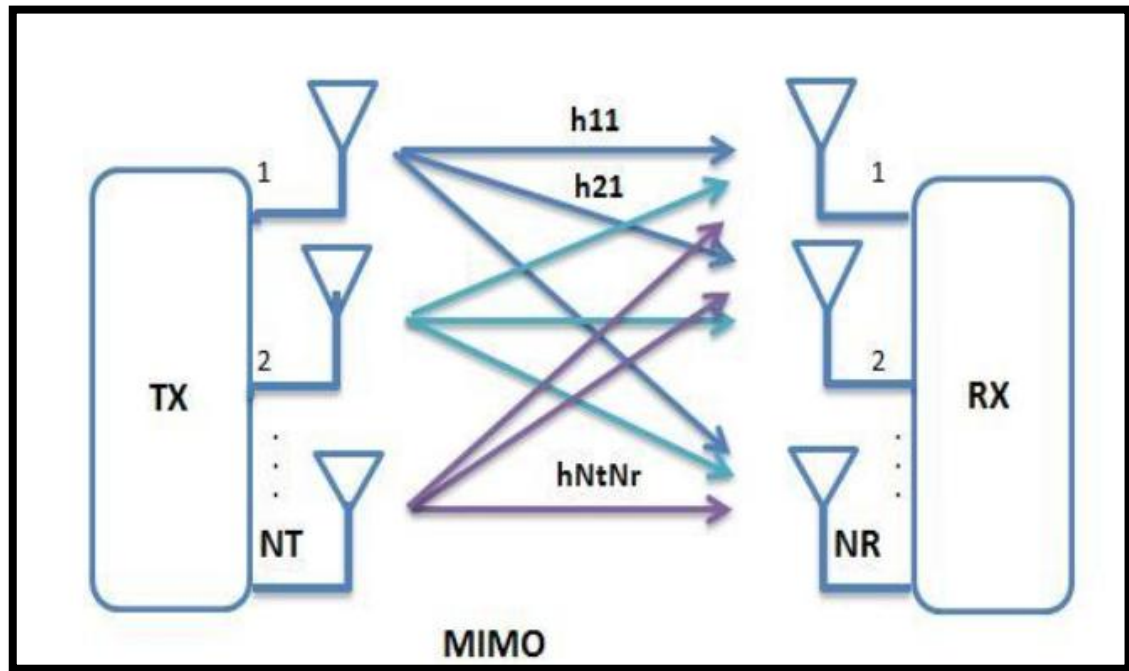


Figure II.6. Système MIMO [22]

II.5. Massive MIMO

Le MIMO massif est l'une des technologies clés pour la prochaine génération des réseaux sans fil. Son principe fondamental est de réaliser le multiplexage spatial, ce qui signifie qu'il utilise simultanément les mêmes fréquences radioélectriques pour transmettre des signaux différents. Plusieurs antennes d'émission d'une station de base peuvent recevoir et diviser ces signaux simultanément. Dans les réseaux MIMO standard, il est courant d'utiliser deux ou quatre antennes pour la transmission des données, ainsi que le même nombre pour la réception. En revanche, le MIMO massif est caractérisé par un nombre d'antennes particulièrement élevé, augmentant significativement le nombre d'antennes d'émission, parfois jusqu'à des dizaines ou même plus de 100 éléments, sur une seule station de base [19]. Cette technologie permet d'exploiter au maximum la capacité du spectre radioélectrique en utilisant efficacement l'environnement spatial pour améliorer les performances des réseaux sans fil, notamment en augmentant la capacité, la fiabilité et la portée des communications.

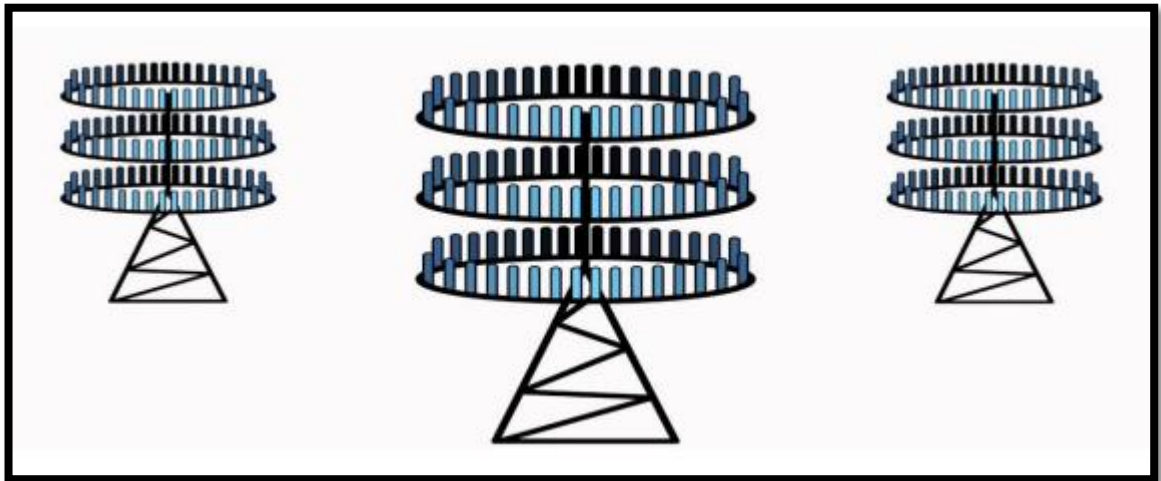


Figure 11.7. une illustration de MIMO massif. [21].

Massive MIMO propose deux innovations principales :

1.5.1 Beamforming

Est un système de signalisation du trafic pour stations de base cellulaires qui identifie la voie de transmission de donnée la plus efficace pour un utilisateur particulier et réduit les interférences pour les utilisateurs à proximité. Aux stations de base MIMO massives, des algorithmes de traitement du signal tracent le meilleur itinéraire de transmission par voie aérienne vers chaque utilisateur. Ils peuvent ensuite envoyer des paquets de données individuels dans des nombreuses directions différentes, en les renvoyant des bâtiments et d'autres objets selon un modèle parfaitement coordonné. En résumé, pensez à la technologie MIMO massive en tant que structure 3D (trois dimension) massive augmentant les capacités de couverture horizontale et verticale. [19].

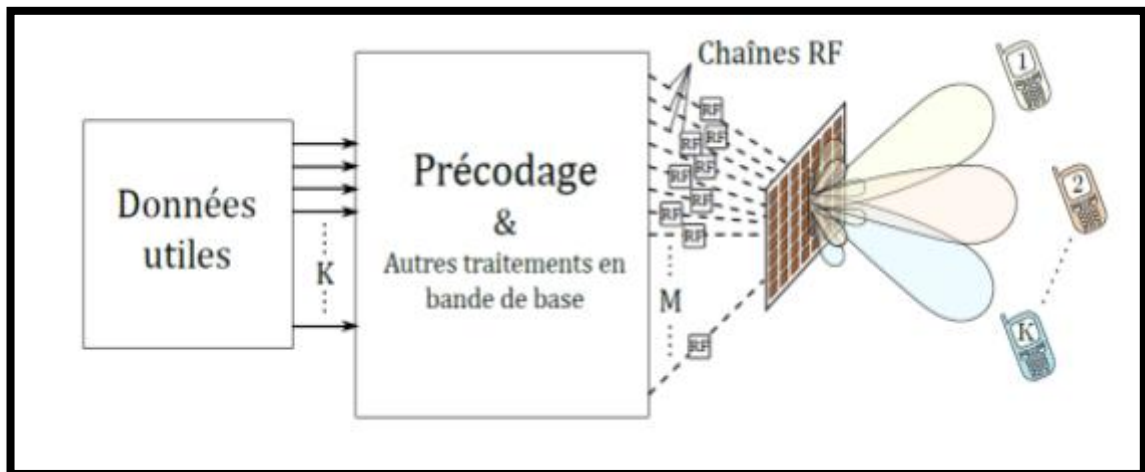


Figure I1.8. système massive MIMO en transmission multi -utilisateurs [21].

1.5.2 Mu-MIMO (Multi utilisateurs- MIMO)

Augmente encore la capacité totale par station de base en permettant la communication avec plusieurs périphériques utilisant les mêmes ressources, créant ainsi un côté périphériques permet de créer des canaux virtuels MIMO à grandes échelle. La combinaison de ces deux innovations permet d'augmenter la vitesse de transmission sans fil en augmentant le nombre d'antennes de la station de base sans consommer plus de bande passante ni augmente les valeurs de modulation [21].

II.6 Types Massive MIMO

II.6.1 Single-User MIMO

Le système MIMO mono-utilisateur (**SU-MIMO**) est constitué d'un côté, d'une BS comportant plusieurs antennes et d'un seul utilisateur de l'autre côté. Du point de vue de l'efficacité énergétique, l'utilisation d'un réseau d'antennes massif pour desservir un seul ou un petit nombre d'UT n'est pas judicieuse.

Dans le cas du système MIMO mono-utilisateur, le signal reçu par l'utilisateur est donné par l'équation suivante : [18]

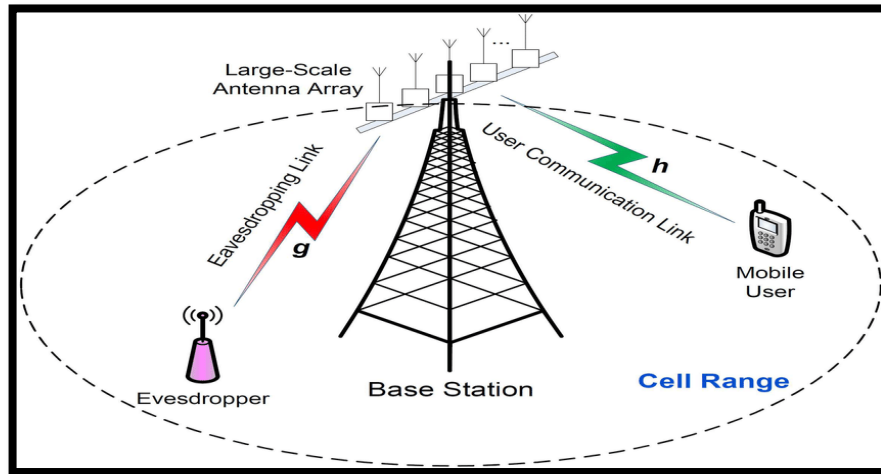


Figure II.9 Single-User Massive MIMO. [19].

$$Y = \sqrt{P_u} h s + W$$

Notons P_u le SNR de liaison montante, par h , le vecteur de réponse de canal, par s , le vecteur des symboles et par w le vecteur de bruit AWGN.

II.6.2 Multi-User Massive MIMO

Lorsque plusieurs terminaux sont autorisés à accéder à une ressource temps-fréquence identique, MU-MIMO offre une plus grande efficacité du système contrairement à SUMIMO. Dans cette section, nous prenons en considération un système MU-MIMO à cellule unique, où la BS dessert K UT avec chaque terminal équipé d'une antenne. Le signal reçu à la BS est :)

$$Y = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_u} h_k s_k + W \tag{II.8}$$

$$Y = \sqrt{P_u} h s + W \tag{II.9}$$

y est $M \times 1$ matrice de signaux reçus, $h_k \in H$, par exemple. $H = [h_1 \dots h_k \dots h_K]$ représente le vecteur de canal entre les antennes BS et le k ème UT, $s_k \in S$ par exemple.

$s^T = [s_1 \dots s_k \dots s_K]$ représente le symbole transmis par k ème UT et w représente le bruit blanc additif gaussien (AWGN)

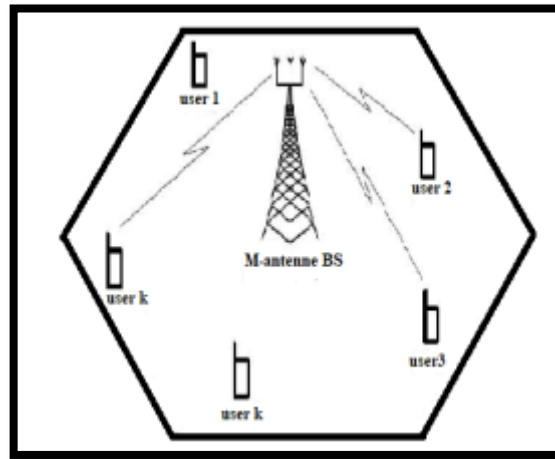


Figure II.10: Système MU-MIMO massif. M-antennes de BS dessert K simple antenne UT. [18].

Lorsque $K \geq 2$, le signal obtenu de chaque terminal interfère avec ceux des autres terminaux donc les informations mutuelles de chaque terminal pour MU-MIMO sont plus petites que celles de SU-MIMO avec la même puissance transmise à chaque terminal.

Cependant, lorsque $M \gg K$, l'orthogonalité de système annule les interférences des autres utilisateurs et rend le canal de propagation favorable du fait que les antennes aux terminaux sont presque non corrélées et découplées. C'est la raison pour laquelle le MIMO Massif est le meilleur candidat pour MU-MIMO. [18]

II.6.3 MU- Massive MIMO avec Multi-Cell scénario

Dans cette section, nous envisageons la restriction des systèmes MIMO. Multi-utilisateurs pour des cellules non coopératives alors que M grandit sans limite. Pour une seule cellule, aussi bien que pour le MIMO multi-cellule, l'augmentation sans limite de M annule le bruit et les évanouissements de Rayleigh. Toutefois, les interférences dues à une contamination pilote persisteront. L'idée de pollution pilote est nouvelle dans un contexte cellulaire MU-MIMO et est illustrée à la figure I.11.

L'estimation de canal de la station de base dans la cellule l est contaminée par le pilote de la cellule j . La station de base de la cellule l transmettra son signal partiellement aux côtés des

terminaux de la cellule adjacente. En raison de la formation de faisceau, le brouillage causé à la cellule j ne disparaît pas de manière asymptotique quand $M \rightarrow \infty$

Pour cela nous pensons au système cellulaire multiutilisateur MIMO-OFDM avec des cellules hexagonales et des sous-porteuses NFFT. Toutes les cellules disposent de M antennes au niveau de la station de base et couvrent K terminaux indépendants.

Les stations de base sont supposées non coopératives. La matrice de canaux composites $M \times K$ entre les K UT dans la cellule l et les BS dans la cellule j est notée . En se basant sur la réciprocité, la matrice de canal de la liaison descendante entre la station de base de la cellule j et les terminaux de la cellule l est présentée par , Le signal reçu à la j ème BS sera le suivant : [18]

$$Y_j = \sum_{L=1}^L \sum_{K=1}^K \sqrt{P_u} h_{JK} s_{JK+W} \quad (\text{II.11})$$

$$Y_j = \sum_{L=1}^L \sqrt{P_u} h_{jl} s_{l+W} \quad (\text{II.12})$$

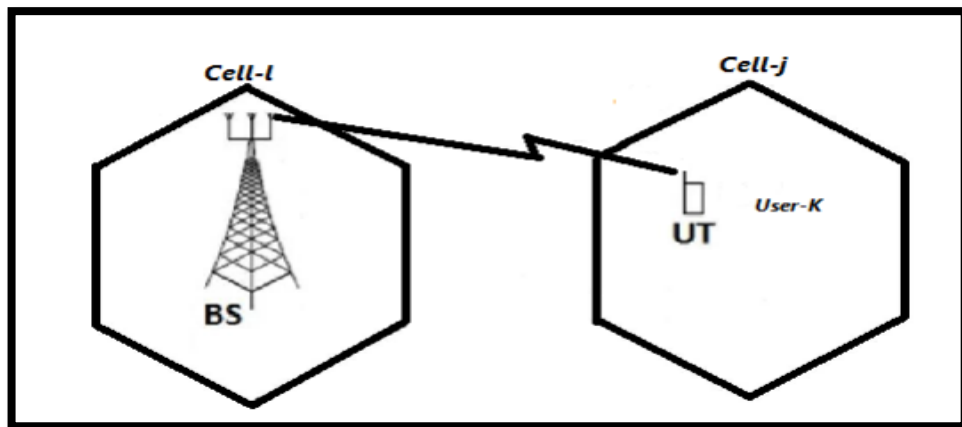


Figure II.11: La BS dans la l-ième cellule et le k-ième UT dans la j-ième cellule[18].

II.6.4 Massive MIMO distribuée

Le MIMO massif distribué peut être considéré comme une variante distincte du MU-MIMO visant à augmenter la capacité du système en utilisant des antennes réparties pour la transmission et la réception des signaux. Dans le cadre du Massive MIMO, il est possible de permettre à plusieurs stations de base (BS) de travailler de manière coordonnée, même si elles se trouvent dans des cellules distinctes, ce qui contribue à réduire les interférences entre cellules. Toutefois, lorsque de nombreuses antennes sont déployées au sein d'une seule station de base, la synchronisation devient une préoccupation majeure. Dans certains scénarios, il est également envisageable de répartir un grand nombre d'antennes sur des emplacements individuels, tels que les toits des bâtiments. Dans cette situation, la synchronisation pose un défi, et même une interface RF peu coûteuse peut entraîner d'importants problèmes. [18]

II.7 Caractéristique de Massive MIMO

Le Massive MIMO est une évolution de la structure MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) dans laquelle le nombre d'antennes de la station de base (BS) et le nombre d'utilisateurs (UT) sont considérablement élevés. Dans le cadre du Massive MIMO, des milliers d'antennes de la station de base peuvent desservir simultanément des dizaines, voire des centaines d'utilisateurs, en utilisant les mêmes ressources de fréquence. Quelques points clés à retenir concernant le Massive MIMO sont les suivants :

II.7.1 Évolutivité

La station de base acquiert des informations sur les canaux de communication grâce à un processus d'apprentissage basé sur la liaison montante, en utilisant une opération de type TDD (Time Division Duplex) [19]. Le temps requis pour l'estimation du canal demeure constant, indépendamment du nombre d'antennes de la station de base. Ainsi, la quantité d'antennes de la station de base peut être augmentée à volonté sans entraîner de surcharge supplémentaire dans le processus d'estimation de canal.

De plus, le traitement du signal au niveau de chaque utilisateur (User Terminal - UT) est essentiel et n'est pas influencé par la présence ou l'absence d'autres UT. Le traitement du signal, notamment le démultiplexage, est effectué de manière individuelle au niveau des UT. Par conséquent, l'ajout ou la suppression d'utilisateurs du service n'a plus d'impact sur les activités des autres utilisateurs terminaux.

II.7.2 Préférence du schéma TDD en Massive MIMO

En mode FDD [20], l'estimation de canal repose sur le nombre d'antennes BS M . Par contre, en mode TDD, le temps d'estimation de canal est non biaisé de M . Dans Massive MIMO, M est grande, et par conséquent, le fonctionnement TDD est préférable. Par exemple, supposons que l'intervalle de cohérence soit $T = 200$ symboles (correspondant à un temps de cohérence de 1 ms et à une largeur de bande de cohérence de 200 kHz). Ensuite, dans les systèmes FDD quantité d'antennes BS et la quantité d'UT sont limitées par $M + K < 200$ tandis que dans les systèmes TDD, la contrainte sur M et K est $2K < 200$ peut voir sur la Figure I.12 que la place FDD est beaucoup plus petite que la région TDD. Avec TDD, l'ajout d'antennes supplémentaires n'affecte plus les sources nécessaires à l'acquisition du canal.

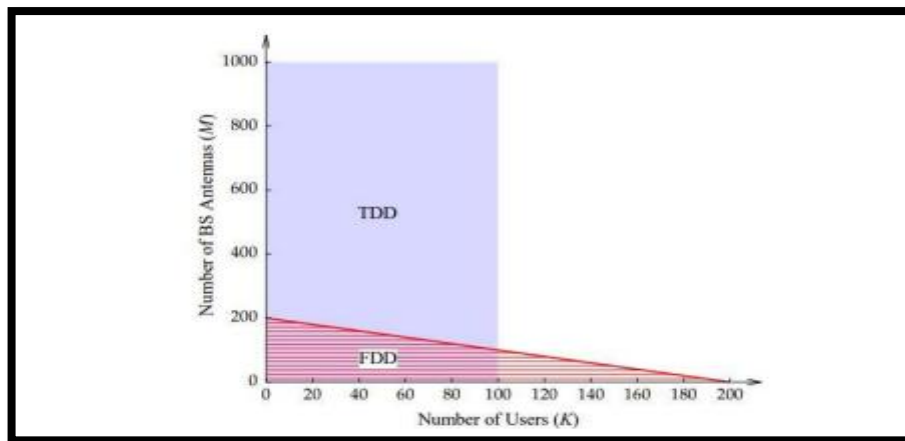


Figure II.12: Les régions de possibles (M , K) dans les systèmes TDD et FDD, pour un intervalle de cohérence de 200 symboles. [20],

II.8 Comparaison entre MIMO traditionnel et MIMO massif

Le Massive MIMO Comprend beaucoup plus d'avantages que le MIMO traditionnel, Le tableau ci-dessous résume Ces avantages :

Contenu technique MIMO	MIMO Traditionnel	MIMO Massive
Le nombre d'antennes	≤ 8	≤ 100
Incertitude de l'angle de canal	Un certain	s le champ de matrice se développe pour former une fonction déterministe
Matrice de canal faible	Faible demande	forte demande
Capacité du canal	faible	élevé
Gain de diversité	faible	élevé
Stabilité des liaisons	faible	élevé
résister au bruit	faible	élevé
Corrélation d'antenne	faible	élevé
Couplage bas haut	faible	élevé
Pollution des pilotes	non	oui
SER	faible	élevé

Tableau II 1 Comparaison entre le Massive MIMO et MIMO Traditionnel [24]

II.9 Avantages des systèmes Massive MIMO

Les principaux avantages des systèmes Massive MIMO peuvent être résumés comme suite [19] :

- Gain d'efficacité spectrale élevé.
- Gain d'efficacité énergétique élevé.
- Traitement simple.
- Augmentation du débit de données.
- Augmentation du rapport signal sur bruit de liaison de base.

II.10 Conclusion

L'évolution des systèmes de communication sans fil est essentielle pour répondre à la demande croissante en matière de transmission de données dans les services de communication mobiles. Les systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output) se présentent comme une solution prometteuse, permettant d'augmenter les taux de transfert de données sans nécessiter une augmentation considérable de la bande passante ou de la puissance du signal émis. Au cours de notre discussion, nous avons examiné diverses configurations multi-antennes, notamment SISO (Single Input Single Output), SIMO (Single Input Multiple Output) et MIMO (Multiple Input Multiple Output), en mettant en lumière leurs capacités respectives.

Il est important de noter que les systèmes MIMO présentent un potentiel considérable en termes de capacité par rapport aux systèmes traditionnels, tels que SISO, SIMO ou MISO. Cependant, il est crucial de prendre en compte la complexité accrue des systèmes MIMO, notamment au niveau de la réception du signal, où le signal reçu est une combinaison de tous les signaux émis. [25].

En fin de compte, les systèmes MIMO ouvrent la voie à des performances améliorées dans les réseaux de communication sans fil, offrant ainsi de nouvelles possibilités pour des applications plus avancées et une meilleure expérience utilisateur. Leur adoption continue dans l'industrie des télécommunications promet de libérer un potentiel considérable en termes de capacité de transmission de données, ce qui est essentiel pour répondre aux besoins futurs des services de communication mobiles.

Chapitre III

Ondes millimétriques (mm Wave) pour la 5G

III.1. Introduction :

La communication sans fil à onde millimétrique est une avancée qui remonte à une période lointaine, conçue dans le but d'améliorer considérablement les capacités de transmission de données, avec des débits pouvant atteindre plusieurs Gigabits par seconde. Cette technologie répond essentiellement à la demande croissante en bande passante et à la saturation des ressources spectrales, en faisant l'objet d'investigations approfondies visant à garantir des transmissions à la fois rapides et à faible latence. Pour ce faire, des fréquences élevées, situées entre 30 GHz et 300 GHz, sont utilisées conjointement avec des ondes millimétriques dont les longueurs varient de 1 mm à 10 mm. Cette approche s'avère primordiale pour répondre aux exigences futures des utilisateurs. Notamment, la communication à onde millimétrique se révèle être un élément central de la cinquième génération de réseaux cellulaires (5G), destinée à offrir des services de haute qualité. Dans cette optique.

ce chapitre se penche initialement sur une présentation générale de l'onde millimétrique, suivi par une exploration des caractéristiques clés et des normes de propagation associées à cette technologie innovante. [26].

III.2. Ondes millimétriques:

III.2.1. Définition Ondes millimétriques:

Les ondes millimétriques englobent les fréquences radioélectriques allant de 30 à 300 GHz. Actuellement, nos dispositifs électroniques communiquent au sein d'une plage de fréquences située en deçà de 6 GHz. Cependant, cette bande de fréquences est fortement saturée, et à mesure que le nombre d'objets connectés augmente, la qualité de ce service se dégrade également. Lorsqu'il s'agit de commandes à distance et du traitement de volumes de données plus conséquents, il devient impératif de travailler avec des fréquences plus élevées et un spectre plus large. [27].

D'un côté, les fréquences élevées permettent un transfert d'informations plus rapide par seconde. D'un autre côté, l'élargissement du spectre favorise l'accroissement du nombre de canaux de transmission disponibles. Ces deux améliorations combinées contribuent à désengorger le réseau. Toutefois, les ondes millimétriques se heurtent au défi de la pénétration, rencontrant des difficultés à traverser les obstacles. Elles ont une portée plus limitée et ont

tendance à être absorbées par des éléments tels que les arbres ou la pluie. Pour résoudre ces problèmes, nous avons besoin d'une deuxième technologie, un réseau de petites antennes. [28].

III.2.2. Utilisation des fréquences des ondes millimétriques:

D'après les plus récentes études concernant les besoins en spectre [5], il est prévu que d'ici 2020, les nécessités mondiales en termes de spectre additionnel se situeront entre 1 000 et 2 000 MHz. En parallèle, les ressources en basses fréquences auront été grandement épuisées. En comparaison avec la plage de fréquences basses actuellement utilisée, les ressources de fréquences disponibles dans le spectre des ondes millimétriques (30 à 300 GHz) sont considérablement abondantes, représentant environ 200 fois la capacité de la bande de fréquences basses. Cette situation a incité l'industrie à entreprendre des explorations visant à déterminer comment exploiter la bande de fréquences millimétriques (30 à 300 GHz) dans le domaine des communications sans fil.

La 5G fait usage de fréquences très élevées, communément appelées "mm Waves" (ondes millimétriques) ; ceci constitue l'une de ses caractéristiques les plus marquantes. Aux États-Unis, une grande majorité des systèmes de communication fonctionnent avec des fréquences inférieures à 3 gigahertz (GHz). Pour la 5G, cinq bandes de fréquences seront exploitées : quatre sans nécessité de licence et une sous licence. La bande LMDS agréée offre environ 1,5 GHz de largeur de bande, couvrant la plage de 27,5 à 31,5 GHz. De plus, une seconde bande de 7 GHz fonctionnant dans la gamme 57-64 GHz est déjà utilisée pour certains équipements Wi-Fi. Enfin, la bande dite "E-Band" se compose de trois segments de largeur de bande totalisant 12,9 GHz, également en accès libre.

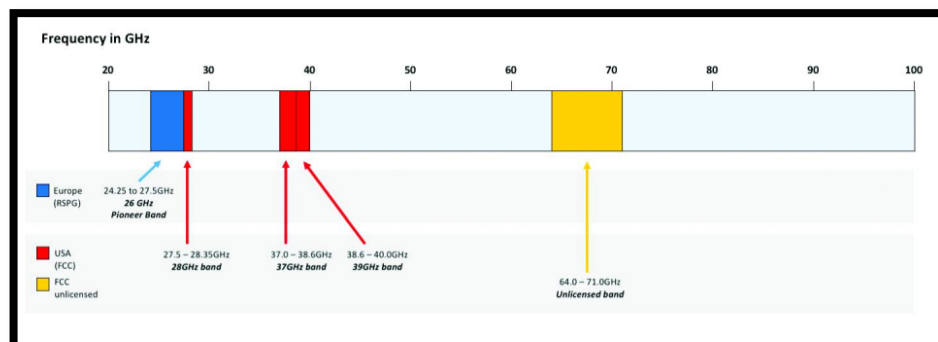


Figure III. 1: Quelques bandes millimétriques pour les applications 5G. [5].

Ce qui caractérise ces bandes à haute fréquence des autres réside dans leur vélocité remarquable. Avec une codification adéquate des signaux radio, les vitesses de la 5G pourront être mille fois plus rapides que celles des générations antérieures de téléphonie mobile. Ces bandes représentent pratiquement l'équivalent de la totalité de la bande passante du spectre radio allouée en dessous de 5 GHz. Cependant, l'exploitation de telles longueurs d'onde courtes soulève divers défis techniques. Ces défis, à leur tour, conduiront à la mise en place d'une architecture capable de soutenir leur utilisation [30].

- **Absorption d'eau et d'oxygène :**

En plus de leur limitation en termes de pénétration, les ondes millimétriques sont sujettes à la vulnérabilité ; elles sont absorbées par l'humidité atmosphérique et l'oxygène. Par conséquent, l'absorption atmosphérique devient un autre élément contribuant aux pertes de propagation. Comme l'illustre la figure (III.2), les ondes millimétriques subissent une atténuation accrue en raison de l'absorption de l'oxygène à 60 GHz et de la vapeur d'eau à 24 GHz.

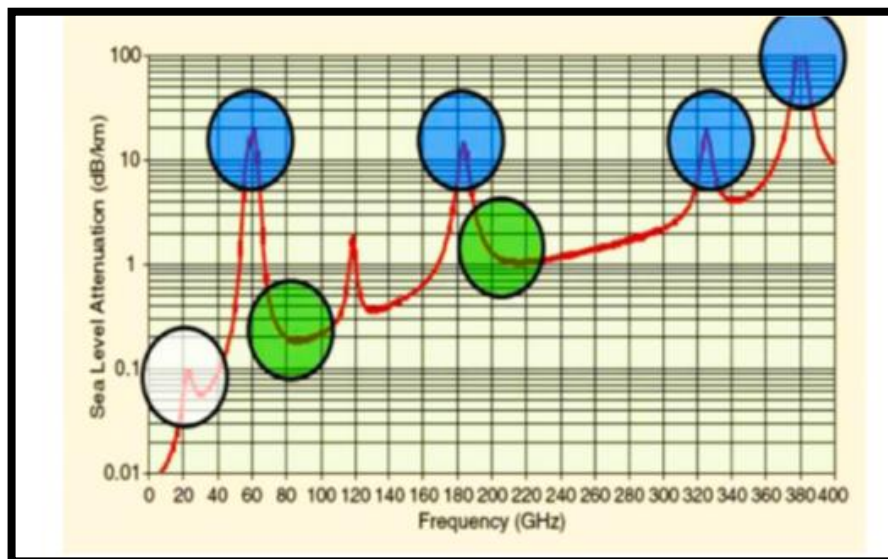


Figure III.2. Absorption atmosphérique des ondes millimétriques en dB / km [5]

• Incapacité à pénétrer :

L'un des problèmes les plus difficiles concernant l'utilisation des mmWave est les fortes pertes de pénétration à travers de nombreux matériaux courants, ces ondes ne sont pas en mesure de traverser les murs des bâtiments ou une végétation dense comme une forêt et même une simple rangée d'arbres, cela veut dire que la distance minimale à prévoir entre l'antenne émettrice et le récepteur doit être considérablement réduite. de nombreux matériaux de construction comme la brique et le béton atténuent les signaux de manière si significative qu'il y a peu de chances d'établir une communication cohérente, cest pour cette raison qu'il est peu probable que les stations de base extérieures mmWave fournissent une couverture à l'intérieur des bâtiments de la même manière que les réseaux mobiles GSM/2G/3G/4G.

Donc pour compléter un tel réseau cellulaire, la couverture intérieure peut être fournie par des femtocellules ou des solutions Wi-Fi [30].

III.2.3. Les avantages des ondes millimétriques :

L'utilisation d'une large bande passante de (30 GHz-300 GHz) par rapport aux autres ondes radio des réseaux sans fil.

- Faisceaux étroits : avec la même taille d'antenne, il est possible d'emballer plus d'éléments d'antenne aux fréquences d'ondes millimétriques.
- Elle offre au moins une bande passante continue de 5 GHz au monde dans le cas de certaines bandes, comme la bande autour de 60 GHz. [26]
- Un autre avantage majeur de la technologie des ondes millimétriques est sa petite taille de composant. Les appareils intelligents et les téléphones mobiles modernes doivent être efficace et de petite taille. Les ondes millimétriques sont complexes et permet une transmission à haute sécurité. [31]
- La sécurité et la confidentialité sont meilleures en ondes. [32]

III.2.4. Inconvénients des ondes millimétriques :

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

- Une courte portée.
- Une grande atténuation.
- Les ondes millimétriques sont absorbées facilement par le feuillage et les bâtiments, les pertes de puissances sont provoquées par les matériaux comme la brique, les vitres teintées, les murs intérieurs et les cabines. [26, 31].

III.3. Caractéristique de propagation des ondes millimétriques :

Dans la communication mmWave, ou la longueur d'onde est à l'ordre du millimètre, elle possède plusieurs caractéristiques fondamentales :

III.3.1 .Une large bande passante:

La plage des ondes millimétriques dans le spectre des fréquences s'étend de 30 GHz à 300 GHz, comme le démontre clairement la figure 1. Nous observons que la bande de 57 à 64 GHz est restreinte en raison de l'absorption d'oxygène, et que la bande de 164 à 200 GHz n'est pas propice à la propagation en raison d'une atténuation significative provoquée par la vapeur d'eau, avec des pertes maximales à 180 GHz. En conséquence, environ 252 GHz du spectre sont disponibles pour les communications mobiles à large bande [31]. Supposons que seulement 40 % du spectre des ondes millimétriques soit accessible pour les communications mobiles à large bande, cela représenterait tout de même plus de 100 % des fréquences disponibles. Il demeure plus de 100 GHz de fréquences inexploitées, soit approximativement 200 fois la capacité des bandes de fréquences de 4 GHz actuellement en utilisation à travers le monde.

III.3.2. Courte longueur d'onde :

Au sein de la gamme du spectre électromagnétique, une fréquence élevée d'onde électromagnétique implique invariablement une longueur d'onde plus réduite, ce qui sous-entend la possibilité de transmettre davantage d'informations par unité de temps. Par contraste avec les signaux hyperfréquences inférieurs à 6 GHz employés antérieurement dans les systèmes cellulaires conventionnels de plus en plus congestionnés et les réseaux locaux sans fil, les signaux des ondes millimétriques (mmWave) affichent des longueurs d'onde considérablement plus courtes, variant entre 10 mm et 1 mm. Pour illustrer, les signaux mmWave à 28 GHz, 60 GHz et 300 GHz présentent des longueurs d'onde extrêmement brèves de 10,7 mm, 5 mm et 1

mm, respectivement. De manière spécifique, les longueurs d'onde des signaux des ondes millimétriques à 28 GHz et 73 GHz se révèlent être environ 10 à 30 fois plus petites que la longueur d'onde des signaux hyperfréquences à 2,5 GHz [31].

III.3.3. Pertes en espace libre:

La dépendance en fréquence et en distance de l'affaiblissement entre deux antennes isotropes s'exprime en chiffres absolus par l'équation suivante :

$$L_{FSL} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 \quad (\text{III.1})$$

Où :

λ est la longueur d'onde de fonctionnement.

FSL est définie par la perte de puissance des signaux transmis en espace libre en dB.

R est la distance entre les antennes d'émission et de réception en km.

La FSL est donnée par:

$$\text{FSL}[\text{dB}] = 92.4 + 20 \log f[\text{GHz}] + 20 \log R[\text{km}] \quad (\text{III.2})$$

Selon l'équation (III.3), la FSL est proportionnelle aux deux valeurs distance de séparation et fréquence porteuse. Cela se traduit par une FSL élevée lorsque la fréquence porteuse entre dans la bande de fréquence d'ondes millimétriques, par rapport à la bande inférieure à 3 GHz. [31].

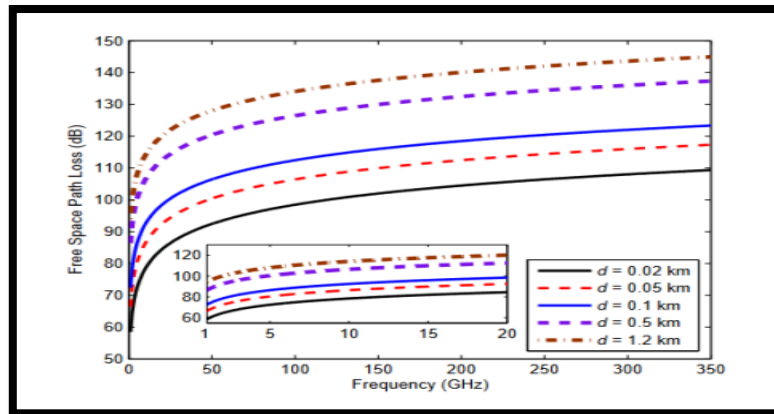


Figure III. 3: Pertes en espace libre entre antennes isotropes [31]

La figure III.3 montre la perte en espace libre, ou atténuation, subie pour plusieurs valeurs de fréquence. Pour chaque changement d'octave dans la plage, l'atténuation différentielle change de 6 dB. Par exemple, en passant d'une portée de 2 à 4 km, l'augmentation de la perte est de 6 dB. Notez que, même sur de courtes distances, la perte d'espace libre peut être assez importante. Cela donne à penser que pour les applications dans le spectre des ondes millimétriques, seules les liaisons de communication, à courte distance seront prises en charge. [31]

III.3.4 .Atténuation atmosphérique:

L'atténuation atmosphérique, également appelée atténuation gazeuse, est considérée comme un phénomène perturbant la propagation des ondes millimétriques. Ce phénomène naturel survient lorsque les ondes radio entrent en contact avec les molécules d'air, entraînant l'absorption d'une partie de leur énergie par ces molécules et générant des vibrations proportionnelles à la fréquence porteuse.

Les ondes millimétriques sont absorbées par deux gaz principaux : l'oxygène (O₂) et la vapeur d'eau (H₂O). Cependant, l'absorption de chaque gaz diffère et dépend de facteurs tels que la température, la pression, l'altitude et la fréquence porteuse. À titre d'exemple, l'absorption de l'oxygène dans la bande de fréquence de 60 GHz est de 15 dB/km. Dans des conditions générales de distances courtes, l'impact de l'atténuation atmosphérique dans la plage des ondes millimétriques est négligeable. La figure (III. 4) illustre l'atténuation spécifique de l'oxygène et de la vapeur d'eau en fonction de la fréquence.

En somme, les ondes millimétriques sont sujettes à l'absorption par les gaz oxygène et vapeur d'eau. Toutefois, cette absorption varie en fonction de divers paramètres, et bien que l'atténuation atmosphérique puisse être notable à certaines fréquences, elle est en général négligeable pour des distances courtes dans la bande millimétrique [31].

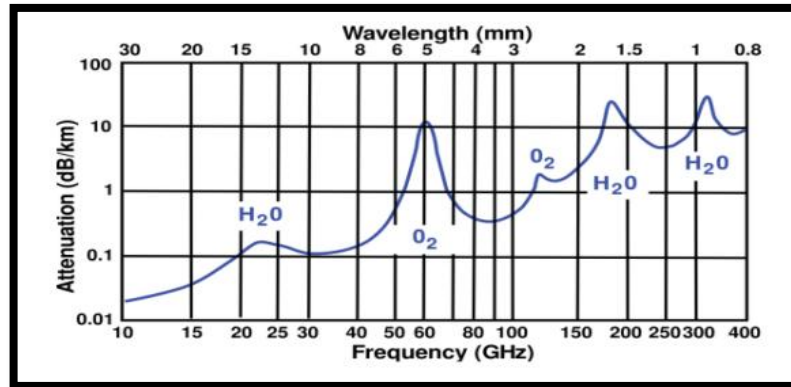


Figure III. 4: Atténuation spécifique de O₂ et H₂O en fonction de la fréquence [31]

III.4. Antennes à ondes millimétriques:

III.4.1. Définition d'une Antenne :

Une antenne constitue un dispositif visant à convertir l'énergie électrique en énergie électromagnétique lors de l'émission, et inversement lors de la réception, facilitant ainsi la transmission sans fil d'informations. Les antennes peuvent être considérées comme des intermédiaires d'adaptation d'impédance entre l'espace environnant et l'émetteur ou le récepteur, permettant une harmonisation efficace des signaux [33].

III.4.2. Paramètres et caractéristiques d'antenne:

Dans les communications sans fil, chaque application met en relief certaines caractéristiques des antennes. Les paramètres d'antenne permettent de comprendre et de caractériser les performances de l'antenne lors de la conception et de la mesure d'antennes. [34].

III.4.2.1. Diagramme de rayonnement :

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de «diagramme de rayonnement ». C'est la représentation du rayonnement en 2D ou 3D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné. Il est donné par la relation suivante :

$$r(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}) = \frac{P(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})}{P_0(\boldsymbol{\theta}_0, \boldsymbol{\varphi}_0)} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

- $P(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})$: Puissance rayonnée dans une direction quelconque.
- $P_0(\boldsymbol{\theta}_0, \boldsymbol{\varphi}_0)$ Puissance rayonnée max.

En général, le diagramme de rayonnement est relevé dans deux plans qui sont : le plan E (plan vertical) et le plan H (plan horizontal) ceux sont respectivement les plans pour lesquels les champs électriques et magnétiques atteignent leurs valeurs maximales. C'est un diagramme qui représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. En réalité, l'énergie rayonnée est répartie inégalement dans l'espace certaines directions sont privilégiées, ce sont les lobes de rayonnement. Différents types de représentation des diagrammes sont utilisées : [35].

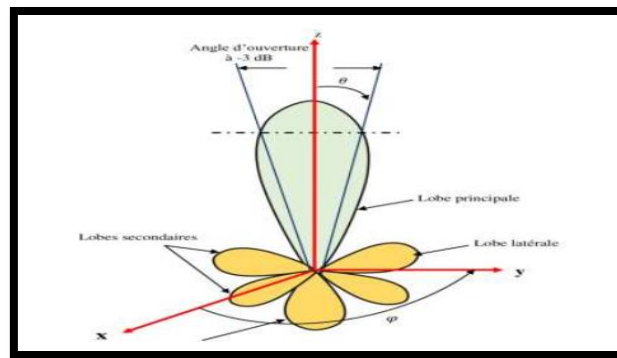


Figure III.5: Exemple de diagramme de rayonnement. [32]

Un type plus pratique est l'antenne directionnelle qui rayonne plus de puissance dans certaines directions et moins de puissance dans d'autres directions. Le diagramme de rayonnement de l'antenne directive est représenté dans la « **Figure III.5** ». En général, la puissance est concentrée dans un ou plusieurs lobes sont : [36].

- **Un lobe principal :** C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.
- **Un angle d'ouverture :** C'est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable. Plus cet angle est étroit plus l'antenne est directive.
- **Des lobes secondaires :** Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables.
- **Un lobe arrière :** C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposé à 180° du lobe principal. [35].

III.4.2.2. Directivité :

La directivité d'une antenne illustre la manière dont cette dernière focalise son rayonnement dans des directions spécifiques de l'espace. Elle est définie comme le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction donnée de l'antenne à l'intensité de puissance qu'émettrait une source isotrope. Cette notion est quantifiable à travers la formule suivante [34]:

$$D(\theta\varphi) = \frac{P(\theta\varphi)}{P(\theta\varphi)_{iso}} = \frac{P(\theta\varphi)}{\left(\frac{Pr}{4\pi}\right)} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

- $P(\theta, \varphi)$: La Puissance rayonnée par unité d'angle solide (θ, φ) .
- Pr : est la puissance totale rayonnée.

III.4.2.3. Gain:

La puissance rayonnée par une antenne varie généralement selon la direction considérée. Le gain d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport de la puissance rayonnée dans cette direction $P(\theta, \varphi)$ à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide avec la même puissance d'alimentation, il est exprimé par [34]:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\left(\frac{Pa}{4\pi}\right)} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

- $P(\theta, \varphi)$: Puissance rayonnée dans une direction.
- Pa : Puissance rayonnée par l'antenne.

III.4.2.4. L'impédance d'entrée :

L'impédance d'entrée est égale au rapport de la tension V_e sur le courant I_e présenté à l'entrée (figure III.6) [28] :

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad (\text{III.6})$$

Avec :

- Z = impédance d'entrée aux bornes a et b.
- R = résistance de l'antenne aux bornes a et b.
- X = réactance de l'antenne aux bornes a et b.

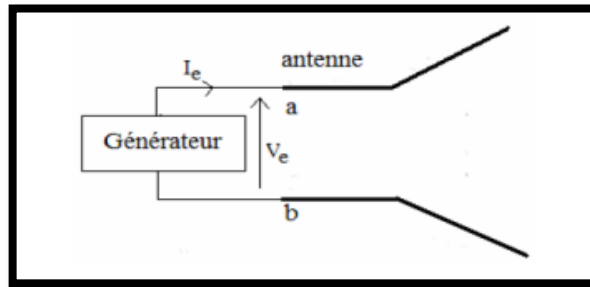


Figure II 6: Antenne en mode émetteur [28].

III.4.2.5. Polarisation :

la direction d'E reste constante dans le temps, cela indique une polarisation linéaire. C'est le cas pour la plupart des antennes avec des éléments rayonnants linéaires, comme l'antenne dipôle utilisée en VHF et UHF. Cependant, certaines antennes émettent un champ électrique dont la direction varie avec le temps. Si la trajectoire du vecteur représentant E, quand il est tracé à un point donné dans le temps, forme un cercle ou une ellipse, on parle alors de polarisation circulaire ou elliptique du champ de rayonnement. Ce phénomène est courant dans des contextes tels que les antennes radar et les communications spatiales [27].

III.5:Path loss model

la distance de référence proche de l'espace libre (CI) un modèle d'affaiblissement sur le trajet avec une distance de référence de 1 m est utilisé .La perte de trajet s'exprime comme suit[36] :

$$PL^{CL}(f, d)[dB] = FSPL, (f, 1m)[dB] + 10n\log_{10} (d) + AT[dB] + X_{\sigma}^{CL} \quad (III.7)$$

Où $d \geq 1m$

où f désigne la fréquence porteuse en GHz, d est la 3D Distance de séparation émetteur-récepteur, n représente la exposant de perte de trajet (PLE), AT est le terme d'atténuation induite par l'atmosphère, X_{σ}^{CL} est une gaussienne de moyenne nulle variable aléatoire avec un écart-type σ en dB. $FSPL(f, 1m)$ indique l'affaiblissement sur le trajet en espace libre en dB à un Distance de séparation émetteur-récepteur de 1 m à la fréquence porteuse f :

$$FSPL, (f, 1m)[dB] = 20\log_{10} \left(\frac{4\pi f \times 10^9}{c} \right) = 32.4[db] + 20\log_{10}(f) \quad (III.8)$$

Où c est la vitesse de la lumière dans le vide et f est la fréquence en GHz. Le terme AT est:

$$AT[dB] = \alpha[dB/m] \times d[m] \quad (III.9)$$

Où α est le facteur d'atténuation, en $/m$, pour le gamme de fréquences de 1 GHz à 100 GHz qui comprend le atténuation combinée de l'air sec (y compris l'oxygène), de l'eau vapeur, pluie et brume [24]. Le paramètre d est la 3D distance de séparation entre l'émetteur et le récepteur défini dans l'équation .

III.6. Conclusion :

Avec la prolifération rapide de nouveaux systèmes de communication, les bandes millimétriques (mmWAVE) ont émergé comme une solution prometteuse pour les réseaux mobiles de 5G, visant à accroître la capacité du canal. La saturation des bandes passantes conventionnelles a contraint les chercheurs à explorer de nouvelles options de fréquences plus larges. Les ondes millimétriques, avec leurs avantages considérables tels que les fréquences élevées et les larges bandes passantes, se sont érigées en une technologie du 21e siècle pour les nouvelles générations de dispositifs mobiles, facilitée par leurs courtes longueurs d'onde. Ces fréquences autorisent l'adoption de nouvelles techniques telles que le MIMO massif (Multiple-Input Multiple-Output) et la formation de faisceaux.

La 5G, en tant que nouvelle génération de communication mobile sans fil, représente une véritable révolution. Elle est marquée par des défis comparés aux générations précédentes, englobant une capacité et un débit accrus, une latence réduite, une connectivité massive des dispositifs, une optimisation des coûts et une expérience utilisateur cohérente et améliorée [26].

Ce chapitre a exposé les caractéristiques des bandes millimétriques pour les communications à gigabits, tout en offrant un aperçu général sur les antennes, leur définition, leurs caractéristiques, ainsi que le modèle de perte de trajet.

Chapitre IV

Simulation et Résultats

IV.1 Introduction

Dans le domaine des communications sans fil à large bande, en particulier dans les systèmes exploitant les ondes millimétriques, la précision de la modélisation et de la simulation des canaux joue un rôle fondamental. Ces systèmes font souvent usage de réseaux d'antennes à faisceau étroit et orientables électriquement pour exploiter pleinement la large bande passante offerte par les ondes millimétriques. L'un des outils essentiels pour cette tâche est le simulateur de canal, parmi lesquels NYUSIM se distingue.

NYUSIM, conçu spécifiquement pour les ondes millimétriques (mmWave), est remarquable grâce à sa capacité à élaborer des modèles de canaux basés sur des données de mesures réelles. Ce simulateur repose notamment sur le modèle de distance de référence en espace libre proche (CI) pour ses calculs. Toutefois, la modélisation des canaux ne consiste pas seulement à reproduire la réaction du canal à une distance donnée, elle doit également intégrer la notion de cohérence spatiale. L'importance de cette cohérence spatiale est indiscutable, car elle assure que les réponses du canal restent corrélées sur de courtes périodes de temps et de distances. Cette caractéristique revêt une importance cruciale, notamment lorsqu'on explore la capacité de former et de déployer des faisceaux massifs MIMO à entrées et sorties multiples, et dans des scénarios impliquant plusieurs utilisateurs.

L'extension de la cohérence spatiale dans les simulateurs de canaux s'avère donc impérative pour une exploration approfondie des capacités de ces systèmes, particulièrement dans le contexte des systèmes de communication mobile de nouvelle génération, tels que la 5G et les évolutions futures. Cette extension permettra à NYUSIM de générer des réponses impulsionnelles de canal (CIR) plus conformes à la réalité, reflétant de manière précise les variations temporelles et spatiales des canaux, que ce soit pour des utilisateurs mobiles en mouvement ou pour des utilisateurs multiples situés à proximité les uns des autres.

IV.2 Logiciel et model utilize

Dans notre étude du canal 73GHz, nous avons utilisé MATLAB 2016 avec le modèle CI (close-In) pour le simulateur NYUSIM nouvelle génération.

IV.3 Simulateur de canal NYUSIM 5G

IV.3.1 Réseaux d'antennes MIMO pour TX et RX

Dans NYUSIM, les réseaux d'antennes, tels que les réseaux linéaires uniformes (ULA) et les réseaux Rectangulaire Uniforme. (URA) peuvent être équipés à la fois au niveau de la BS et de l'équipement d'utilisateur. Les entrées de la matrice "H" pour les canaux MIMO sont obtenues en étendant le CIR omnidirectionnel sur le réseau d'antennes de TX / RX.

IV.3 .2 Paramètres d'entrée

Le simulateur comporte 30 paramètres d'entrée qui sont regroupés en deux principales catégories : Paramètre de canal qui contient 18 paramètres d'entrée et propriété d'antenne avec 12 paramètres d'entrée relatifs `a l`'émetteur (Tx) et récepteur (Rx), comme montre dans la figure (IV.1). [37]

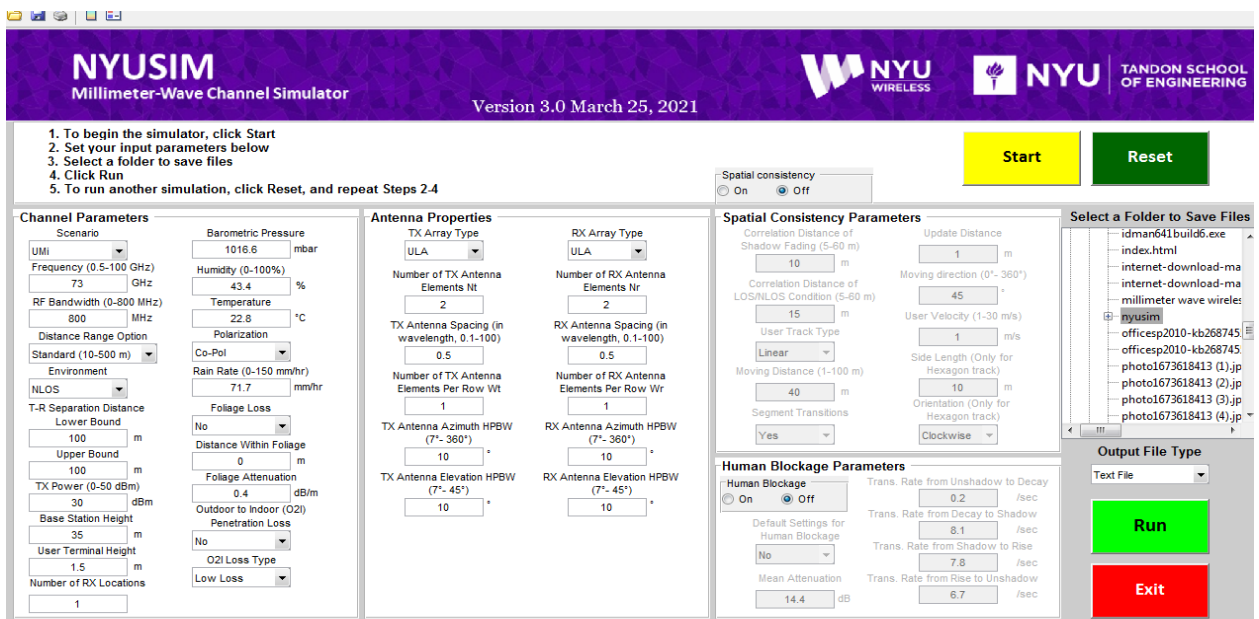


Figure IV.1 Interface utilisateur graphique de NYUSIM.

IV.3.2.1 Option de plage de distance:

Est un paramètre sélectionnable indiquant la portée de la distance. Il peut être sélectionné entre "Standard (10-500 m)", "Étendu (10-10 000 m)" et "Intérieur (5-50 m)". Le réglage par défaut est "Standard (10-500 m)"

IV.3.2.2 Fréquence (GHz) :

Fréquence (GHz) : paramètre modifiable indiquant la fréquence porteuse en GHz.

La valeur par défaut est 73 (GHz), qui peut varier de 0,5 à 100 (GHz), jusqu'à une décimale

.

IV.3.2.3 Bande passante RF (MHz) :

Paramètre modifiable indiquant la bande passante RF du signal transmis en MHz.

La valeur par défaut est 800 MHz et peut varier de 0 à 800 MHz.

Le simulateur ayant été **développé** à partir de mesures réelles obtenues en utilisant une bande passante RF de 800 MHz, il ne peut être réduit qu'à partir de 800 MHz. [37]

IV.3.2.4 Scénario :

Paramètre sélectionnable qui spécifie le scénario.

Il existe trois options : "UMi", "UMa" et "RMa". Les paramètres de canal pour le scénario UMi sont également utilisés dans les scénarios UMa et RMa de ce simulateur, sauf que le scénario RMa a ses propres paramètres pour le modèle de perte de trajet. L'option par défaut est "UMi".

IV.3.2.5 Environnement :

un paramètre sélectionnable indiquant l'environnement, soit en visibilité directe (LOS) ou non visibilité directe (NLOS) [37]

IV.3.2.6 Limite inférieure de la distance de séparation T-R (m) :

Paramètre modifiable indiquant la distance minimale entre l'émetteur (TX) et le récepteur (RX) en mètres avec une décimale.

La valeur par défaut est de 10 m. Elle varie de 10 m à 500 m mais ne doit pas dépasser la limite supérieure de la distance de séparation T-R.

IV.3.2.7 Limite supérieure de la distance de séparation T-R (m) :

Paramètre modifiable indiquant la distance maximale entre TX et RX en mètres avec une décimale.

La valeur par défaut est de 500 m.

Elle peut varier de 10 m à 500 m ,mais ne doit pas dépasser la limite inférieure de la distance de séparation T-R.

IV.3.2.8 Puissance d'émission (dBm) :

Un paramètre modifiable indiquant la puissance d'émission en dBm.

La valeur par défaut est 30 (dBm) et peut être définie sur n'importe quelle valeur allant de 0 à 30 (dBm).

IV.3.2.9 Hauteur de la station de base (m) :

Paramètre modifiable indiquant la hauteur de la station de base en mètres.

La valeur par défaut est 35 (m) et peut être réglée à toute valeur comprise entre 10 et 150 (m) . Cette hauteur de station de base n'est applicable qu'à la modélisation RMa et est ignoré pour UMi et UMa scénarios. La hauteur maximale des stations est de 3 m pour le scénario InH.

IV.3.2.10 Pression barométrique:

Paramètre modifiable utilisé pour évaluer la perte de chemin de propagation due à l'air sec, indiquant la pression atmosphérique en mbar.

La valeur par défaut et typique est 1013,25 mbar (millibars) (c'est-à-dire la valeur nominale au niveau de la mer) et peut varier de 10-5 à 1013,25 (mbar) . [38]

IV.3.2.11 Humidité:

Paramètre modifiable indiquant l'humidité relative (%) utilisée pour évaluer l'atténuation du chemin de propagation due à la vapeur.

La valeur par défaut est 50 (%) et peut être réglée arbitrairement entre 0 et 100 (%).

IV.3.2.12 Température:

Paramètre modifiable indiquant la température en degrés Celsius utilisée pour évaluer la perte du chemin de propagation due à la brume ou au brouillard.

La valeur standard par défaut est de 20 (°C) et peut varier de -100 à 50 (°C). La valeur standard par défaut est de 20 (°C) et peut varier de -100 à 50 (°C) . [37]

IV.3.2.13 Taux de pluie:

Paramètre modifiable indiquant la pluviométrie mm/h utilisée pour évaluer la perte de chemin due à la pluie. La valeur par défaut est 0 (mm/h), avec une plage typique de 0-150 (mm/h) . [37]

IV.3.2.14 Polarisation:

Paramètre sélectionnable indiquant la relation de polarisation entre les antennes TX et RX ou les réseaux d'antennes.

Le paramètre par défaut est Co-Pol (co-polarisation) et peut être modifié en X-Pol (polarisation croisée). La discrimination de polarisation croisée (XPD) peut varier de 5 dB à 27 dB, selon la fréquence et l'environnement .

Dans ce simulateur, pour Co-Pol, aucune perte supplémentaire ne sera ajoutée à la perte de chemin, tandis qu'une perte supplémentaire de 25 dB sera ajoutée à la perte de chemin pour X-Pol en raison de l'inadéquation de la polarisation.

Pour des informations plus détaillées, veuillez-vous référer à [38]

IV.3.2.15 Perte de feuillage:

Paramètre sélectionnable indiquant si la perte de feuilles doit être prise en compte dans la simulation.

Le paramètre par défaut est Non (la perte de feuilles n'est pas prise en compte) et peut être remplacé par Oui (la perte de feuilles est prise en compte).

IV.3.2.16 Distance dans le feuillage:

Il s'agit d'un paramètre modifiable qui exprime la distance parcourue par le signal à travers le végétal, en mètres.

La valeur par défaut est 0 et peut être fixée à n'importe quel nombre non négatif. Elle est fixée à une valeur supérieure à la limite inférieure de la distance de séparation T-R.

IV.3.2.17 Atténuation du feuillage:

Paramètre modifiable indiquant l'affaiblissement de propagation dû à la chute des feuilles en dB/m. Sur la base des mesures effectuées dans [37], la valeur par défaut est de 0,4 (dB/m) et peut être réglée sur une valeur comprise entre 0 et 10 (dB/m).

IV.3.2.18 Nombre d'emplacements RX:

Nombre d'emplacements RX : un paramètre modifiable indiquant le nombre des emplacements RX. Il peut s'agir de n'importe quel nombre entier positif.

Le défaut La valeur est 1 et peut être définie sur n'importe quel nombre entier compris entre 1 et 10 000.

1. Type de matrice TX/RX

Un paramètre sélectionnable indiquant le type de réseau d'antennes TX/RX.

Le paramètre par défaut est ULA (réseau linéaire uniforme) et peut être modifié en URA (réseau rectangulaire uniforme).

2. Nombre d'éléments d'antenne TX N_t

Un paramètre modifiable qui indique le nombre total d'éléments d'antenne TX dans le réseau. La valeur par défaut est 1 et peut être définie sur n'importe quel entier compris entre 1 et 128.

3. Nombre d'éléments d'antenne RX N_r

Paramètre modifiable qui indique le nombre total d'éléments d'antenne RX dans le réseau. La valeur par défaut est 1 et peut être définie sur n'importe quel entier compris entre 1 et 64.

4. Espacement des antennes TX/RX (en longueur d'onde)

Paramètre modifiable indiquant l'espacement entre les antennes TX/RX adjacentes dans le réseau en termes de longueur d'onde porteuse. La valeur par défaut est 0,5 et peut être définie sur n'importe quel nombre positif avec jusqu'à une décimale entre 0,1 et 100.

5. Nombre d'éléments d'antenne TX par ligne de poids

Lorsque la formation TX est ULA ou URA, le paramètre modifiable du nombre d'antennes TX dans une dimension doit être divisé par le nombre d'éléments d'antenne TX. Valeur La valeur par défaut est 1.

6. Nombre d'éléments d'antenne RX par ligne W_r

Lorsque le type de réseau RX est ULA ou URA, paramètre modifiable indiquant le nombre d'antennes RX unidimensionnelles, qui doit être divisé par le nombre d'éléments d'antenne RX. La valeur par défaut est 1.

7. Antenne TX Azimut HPBW (degrés)

Paramètre modifiable indiquant la largeur de faisceau à mi-puissance en azimut (HPBW) de l'antenne TX (réseau) en degrés. La valeur par défaut est de 10° et peut être réglée sur n'importe quelle valeur entre 7° et 360° (puisque l'azimut minimum HPBW de l'antenne utilisée dans les mesures du simulateur est de 7°

8. TX Antenna Elevation HPBW (degrés)

C'est un paramètre modifiable qui indique l'élévation HPBW de l'antenne TX (array) en degrés. La valeur par défaut est de 10° et peut être réglée sur toute valeur comprise entre 7° et 45° (l'élévation HPBW la plus faible des antennes utilisées dans les mesures du simulateur étant de 7°).47

9. Antenne RX Azimut HPBW (degrés)

Un paramètre modifiable indiquant l'azimut HPBW de l'antenne RX (matrice) en degrés. La valeur par défaut est 10° et peut être définie sur n'importe quelle valeur comprise entre 7° et 360°

10. Élévation de l'antenne RX 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 définie sur n'importe quelle valeur comprise entre 7° et 45°. Le diagramme d'antenne utilisé dans a la forme suivante :

$$G(\theta, \varphi) = \max \left(G_0 e^{-\alpha\theta^2 - \beta\varphi^2}, \frac{G_0}{100} \right)$$

$$\alpha = \frac{4 \ln(2)}{\theta_{3dB}^2} \quad \beta = \frac{4 \ln(2)}{\varphi_{3dB}^2} B \quad G_0 = \frac{41253 \eta}{\theta_{3dB}^2 \varphi_{3dB}^2}$$

où (θ, φ) désignent les décalages d'angle d'azimut et d'élévation à partir de la direction de l'axe de visée en degrés, G_0 est le gain directif maximal (gain de visée) en unités linéaires, $(\theta_{3dB}^2, \varphi_{3dB}^2)$ représentent l'azimut et l'élévation HPBW en degrés, (α, β) sont des paramètres qui dépendent sur les valeurs HPBW, et $\eta = 0,7$ est une efficacité d'antenne moyenne typique.

Le diagramme de rayonnement d'une antenne de site cellulaire sectorisée a été utilisé dans , où le diagramme de rayonnement azimutal est modélisé comme une cardioïde donné par

$$r(\theta) = \alpha \left[1 + \sin \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) \right]$$

où r est le gain de l'antenne à l'angle d'azimut θ à partir de son lobe maximal et est un facteur d'échelle. Le diagramme de rayonnement en élévation est une ellipse avec la station de base à un point focal

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Un modèle de diagramme d'antenne sectorisé est présenté dans [39], où un gain de directivité constant est supposé pour les lobes principaux et latéraux. [39]

IV.4 Étude de la nature du climat dans El Oued :

El Oued est une wilaya située dans l'est de l'Algérie, caractérisée par un climat désertique sec et chaud. Voici quelques informations importantes sur le climat de cette région :

- a) **Températures** : El Oued connaît un été très chaud, avec une température moyenne d'environ **34** degrés Celsius, et parfois des températures dépassant **50** degrés Celsius lors des journées les plus chaudes. En hiver, les températures sont plus douces, avec une moyenne d'environ **10** degrés Celsius.
- b) **Précipitations** : Cette région est connue pour son faible taux de précipitations. La moyenne annuelle des précipitations est d'environ **71,7** millimètres, ce qui la rend très aride.
- c) **Les vents** : La région est également caractérisée par des vents actifs tout au long de l'année, ce qui contribue au climat sec et influence les conditions météorologiques locales.
- d) **Altitude et distance par rapport à la mer** : El Oued se trouve à une altitude moyenne d'environ **80** mètres au-dessus du niveau de la mer et est située à environ **390 kilomètres** de la côte maritime.

En résumé, El Oued se caractérise par un été très chaud, un hiver relativement doux, des précipitations rares et des vents actifs. L'altitude moyenne de la région et sa distance par rapport à la mer contribuent également à son climat désertique.

L'année	Température annuelle moyenne: (C°)	Température maximale moyenne annuelle: (C°)	Température minimale moyenne annuelle: (C°)	Humidité moyenne annuelle: (C°)	Précipitations annuelles totales: (mm)	Visibilité moyenne annuelle: (Km)	Vitesse annuelle moyenne Du vent (Km/h)
2000	22.4	29.0	15.6	46.6	35.81	9.7	10.5
2001	23.4	29.8	16.6	44.3	/	9.8	12.7
2002	/	/	/		/	/	/
2003	22.7	29.0	16.3	48.6	109.47	9.4	12.1
2004	22.1	29.1	15.5	49.2	350.01	9.4	12.4
2005	/	/	/	/	/	/	/
2006	22.6	29.6	15.7	46.3	80.53	9.5	8.8
2007	22.3	29.5	15.4	42.5	56.90	9.4	10.4
2008	22.6	29.3	16.0	43.8	32.01	9.5	9.4
2009	22.3	29.2	15.6	45.7	193.55	9.8	/
2010	23.1	29.9	16.2	40.8	50.28	9.8	/
2011	22.5	29.2	15.5	44.2	30.73	9.8	8.0
2012	22.9	29.9	15.6	39.6	23.62	10	
2013	22.7	29.6	15.6	42.6	32.27	9.5	8.2
2014	23.3	30.3	16.5	43.3	26.67	9.2	0.0
2015	22.5	29.4	15.6	46.8	50.04	9.3	3.6
2016	23.3	30.1	16.4	42.7	/	9.2	9.2
2017	22.5	28.8	15.9	45.7	/	9.1	11.6
2018	23.0	29.5	16.5	44.2	/	8.7	12.4
2019	23.0	29.5	16.2	42.5	/	9.2	12.2
2020	23.1	29.4	16.2	40.4	28.95	9.2	11.4
2021	23.7	29.8	17.1	35.6	27.43	9	12.2
2022	23.5	30.1	16.9	35.9	20.08	8.9	11.5

Tableau IV 1 Statistiques climatiques sur une période de 22 ans. [40]

IV.5 Répartition de la pression barométrique pour la ville d'El-Oued

La pression atmosphérique, ou pression barométrique, désigne la force exercée par les molécules d'air au-dessus de la surface de la Terre, s'étendant jusqu'à la limite de l'espace. Cette force invisible joue un rôle significatif dans divers aspects de notre environnement, influençant notamment la concentration en oxygène de nos masses d'eau, les niveaux de ces dernières, notre bien-être général et même les conditions météorologiques.

Le rôle de la pression atmosphérique est si essentiel dans notre vie quotidienne que nous utilisons des instruments spéciaux connus sous le nom de baromètres pour surveiller les fluctuations constantes de ce paramètre. Ils nous aident à anticiper les changements de temps, à comprendre les tendances météorologiques, et même à prédire les variations de niveau d'eau dans nos cours d'eau, lacs et réservoirs.

En examinant les données recueillies sur une période de **12** mois en **2022**, il a été relevé que la pression atmosphérique moyenne enregistrée à El-Oued était de **1016,6** millibars, comme en témoigne le **tableau IV.2**. Cette mesure témoigne de l'importance de surveiller et de comprendre la pression atmosphérique pour mieux appréhender notre environnement et améliorer notre qualité de vie.

Mois	Jan.	Fév	Mars.	Avr	Mai.	Join.	Jui.	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Moyenne	1025.8 Mbar	1023.1 Mbar	1017.1 mbar	1010.7 Mbar	1015 Mbar	1012 mbar	1013.3 Mba	1010.7 Mba	1011.8 Mbar	1020.4 Mbar	1018.8 mbar	1020.2 Mbar

Tableau IV.2 Pression atmosphérique moyenne de la ville d'El-Oued 2022 [40]

IV.6 Analyse de MIMO pour l'environnement NLOS en utilisant la Microcellule Urbaine pour la ville d'EL Oued.

IV.6.1 Analyse de MIMO en utilisant différentes distances de séparation T-R

L'exploitation de la technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) revêt une importance capitale pour l'amélioration des communications sans fil à **El Oued**. Le choix méticuleux des antennes joue un rôle essentiel dans l'optimisation de la qualité du signal sur différentes distances T-R (Transmettre-Réception). Cette analyse inclut des distances de **100** mètres, **300** mètres et **600** mètres, et met en jeu à la fois des antennes omnidirectionnelles et directionnelles.

En procédant à des calculs approfondis, tels que la détermination de la perte de trajet, de la puissance reçue et de la propagation du délai RMS, en utilisant des données spécifiques à El Oued telles que les taux moyens de précipitations, la pression atmosphérique, la température, et d'autres paramètres environnementaux, cette analyse vise à évaluer l'efficacité des communications sans fil dans cette région. Son objectif est également de déterminer les configurations d'antennes optimales en vue d'optimiser la qualité du signal.

Grâce à ces résultats, il sera possible de déterminer le nombre idéal d'antennes pour maximiser la qualité des communications dans cet environnement urbain complexe. Cette analyse servira de base à la conception de systèmes de communication sans fil performants adaptés à El Oued

Dans notre étude, on a pris les paramètres suivants :

- Taux moyen des précipitations pour la ville d'EL Oued: 71.7 mm / h.
- Pression barométrique moyenne pour la ville d'EL Oued: 1016.6 mbar.
- Humidité moyenne pour la ville d'EL Oued: 43.4%.
- Température: 22.8 C°.
- Nombre d'emplacements de récepteur: 1.
- Scénario: Micro Cellule Urbaine.
- Puissance de l'émetteur: 30 dBm.
- Type de réseau: Uniform Linear Array (ULA).

MIMO utilisé	PLE	PL (dB)	Puissance reçue (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
2*2	4.0	149.3	-119.3	11.4
3*3	3.6	141.2	-111.2	19.1
4*4	3.1	131.6	-101.6	9.1
5*5	2.9	127.8	-97.8	25.7
6*6	3.2	134.6	-104.6	30.1
7*7	3.4	138.2	-108.2	26.4

Tableau IV.3 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario NLOS 73 GHz à 100 m de distance, pour l'antenne omnidirectionnelle)

MIMO utilisé	PLE	PL (dB)	Puissance reçue (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
2*2	4.3	155.0	--75.8	0.1
3*3	3.7	143.7	-64.5	3.7
4*4	3.1	132.7	-53.5	0.2
5*5	2.9	128.5	-49.3	0.7
6*6	3.5	140.0	-60.8	5.7
7*7	3.6	142.1	-62.9	1.5

Tableau IV.4 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario NLOS 73GHz à 100 m de distance, pour l'antenne directionnelle).

MIMO utilisé	PLE	PL (dB)	Puissance reçue (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
2*2	3.3	151.1	-121.1	16.6
3*3	3.8	163.1	-133.1	5.9
4*4	3.8	162.7	-132.7	47.0
5*5	3.2	149.0	-119.0	38.4
6*6	3.7	160.2	-130.2	24.0
7*7	3.3	150.6	-120.6	20.2

Tableau IV.5 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario NLOS 73 GHz à 300 m de distance, pour l'antenne omnidirectionnelle).

MIMO utilisé	PLE	PL (dB)	Puissance reçue (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
2*2	3.6	158.5	-97.3	0.4
3*3	3.9	165.6	-86.4	0.4
4*4	4.0	169.0	-89.8	14.7
5*5	3.3	151.6	-72.4	3.5
6*6	3.8	164.0	-84.8	7.8
7*7	3.4	152.8	-73.6	1.1

Tableau IV.6 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario NLOS **73GHz** à 300m de distance, pour l'antenne directionnelle)

MIMO utilisé	PLE	PL (dB)	Puissance reçue (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
2*2	4.0	180.0	-150.0	11.9
3*3	4.2	186.4	-156.4	32.3
4*4	3.7	173.7	-143.7	38.9
5*5	4.2	185.1	-155.1	53.0
6*6	3.3	160.1	-130.1	38.0
7*7	3.4	165.4	-135	16.7

Tableau IV.7 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario NLOS **73 GHz** à 600 m de distance, pour l'antenne omnidirectionnelle)

MIMO utilisé	PLE	PL (dB)	Puissance reçue (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
2*2	4.1	183.1	-103.9	0.1
3*3	4.3	188.6	-109.4	8.2
4*4	3.9	177.3	-98.1	4.0
5*5	4.2	187.5	-108.3	9.9
6*6	3.4	165.0	-85.8	2.4
7*7	3.6	170.1	-90.8	0.5

Tableau IV.8 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario NLOS **73GHz** à 600 m de distance, pour l'antenne directionnelle).

Les résultats présentés dans les tableaux mettent en évidence les avantages de la technologie MIMO 2*2. En effet, cette technologie offre une perte de trajet (PLE) modérée, ce qui signifie que le signal perd une quantité raisonnable de puissance lors de sa transmission. Cependant, la perte de trajet (PL) elle-même est significative, ce qui confirme la faiblesse du signal reçu (Pr). Néanmoins, l'étalement temporel RMS (Root-Mean-Square) est faible, ce qui indique une synchronisation temporelle précise entre les signaux. Ces résultats sont cohérents sur différentes distances de séparation entre l'émetteur et le récepteur, à savoir 100 mètres, 300 mètres et 600 mètres. En conclusion, ces résultats montrent que la technologie MIMO 2*2 peut améliorer la qualité du signal et assurer une synchronisation temporelle précise, malgré une perte de signal modérée sur le trajet, ce qui en fait un choix viable pour diverses applications de communication.

IV.6.2 Analyse de MIMO 2*2 en utilisant différentes distances de séparation T-R et température pour l'environnement NLOS

Pendant la saison estivale à El Oued, la ville connaît des températures très élevées en raison de son climat désertique. Les journées ensoleillées sont marquées par des températures qui peuvent atteindre environ **50°C**, selon les relevés historiques. En moyenne, la température est d'environ **34°C** pendant cette période de l'année. Cette chaleur intense est caractéristique du climat estival à El Oued, ce qui rend important de prendre des mesures pour faire face aux températures élevées, notamment en matière de protection contre la chaleur et de climatisation.

Par conséquent, nous calculons maintenant les données pour l'environnement NLOS à 34C° avec 0 mm / h (Taux de pluie).

- Taux moyen des précipitations pour la ville d'EL Oued: 0 mm / h.
- Pression barométrique moyenne pour la ville d'EL Oued: 1016.6 mbar.
- Humidité moyenne pour la ville d'EL Oued: 43.4%.
- Température: 34C°.
- Nombre d'emplacements de récepteur: 1.
- Scénario: Micro Cellule Urbaine.
- Puissance de l'émetteur: 30 dBm.
- Type de réseau: Uniform Linear Array (ULA)

Séparation T-R en m	PLE	PL (dB)	Pr (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
100	3.8	146.5	-116.6	11.4
300	3.4	153.9	-123.9	19.1
600	3.1	157.1	-127.1	30.1

Tableau IV.9 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario NLOS **73 GHz** à 34C°, pour l'antenne omnidirectionnelle).

Séparation T-R en m	PLE	PL (dB)	Pr (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
100	4.1	152.3	-73.1	0.1
300	3.5	156.4	-77.2	3.7
600	3.3	162.6	-83.4	5.7

Tableau IV.10 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario NLOS **73 GHz** 34C°, pour l'antenne directionnelle).

Les Tableaux **IV.9** et **IV.10** présentent les résultats des paramètres du canal pour le scénario NLOS (Non Line-Of-Sight) à 73 GHz, à une température de 34°C, en utilisant respectivement une antenne omnidirectionnelle et une antenne directionnelle. Les paramètres analysés comprennent l'exposant de perte de trajet (PLE), la perte de trajet (PL) en décibels, la puissance reçue (Pr) en décibels milliwatts (dBm), et l'étalement du retard efficace en nanosecondes (ns).

Il est important de noter que ces données ont été obtenues à différentes distances entre l'émetteur et le récepteur. À mesure que la distance augmente, l'exposant de perte de trajet augmente, ce qui entraîne une augmentation de la perte de trajet et une diminution de la puissance reçue. Cependant, le retard RMS de propagation reste modéré pour les deux types d'antennes, même à une distance de 600 mètres.

La région d'El-Oued est soumise à un climat désertique. Pendant la saison hivernale, les températures moyennes avoisinent généralement les 10°C, et les précipitations sont rares. En conséquence, nous utilisons actuellement une température de 10°C comme base pour nos calculs.

- Taux moyen des précipitations pour la ville d'EL Oued: 0 mm / h.
- Pression barométrique moyenne pour la ville d'EL Oued: 1016.6 mbar.
- Humidité moyenne pour la ville d'EL Oued: 43.4%.
- Température: 10 C°.
- Nombre d'emplacements de récepteur: 1.
- Scénario: Micro Cellule Urbaine.
- Puissance de l'émetteur: 30 dBm.
- Type de réseau: . Uniform Linear Array (ULA)

Séparation T-R en m	PLE	PL (dB)	Pr (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
100	3.3	135.5	-105.5	26.4
300	2.9	140.8	-110.8	38.4
600	3.3	161.7	-131.7	24.0

Tableau IV 11 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario NLOS **73 GHz** à 10 C°, pour l'antenne omnidirectionnelle).

Séparation T-R en m	PLE	PL (dB)	Pr (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
100	3.5	139.4	-60.2	1.5
300	3.0	143.5	-64.2	3.5
600	3.5	165.6	-86.4	7.8

Tableau IV.12 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario NLOS **73 GHz** 10 C°, pour l'antenne directionnelle)

Ce tableau présente les paramètres du canal à 73 GHz pour un scénario NLOS à une température de 10 degrés Celsius, en utilisant à la fois une antenne omnidirectionnelle et une antenne directionnelle. Les paramètres analysés comprennent l'indice de perte de trajet (PLE), la perte de trajet (PL) en décibels, la puissance reçue (Pr) en décibels-milliwatts (dBm) et la dispersion efficace du retard en nanosecondes (ns).

Avec l'augmentation de la distance entre l'émetteur et le récepteur, l'indice de perte de trajet (PLE) augmente, ce qui entraîne une augmentation de la perte de trajet (PL) et une diminution de la puissance reçue (Pr). Cependant, la dispersion efficace du retard RMS reste modérée malgré l'augmentation de la distance.

IV.7 Analyse de MIMO pour l'environnement LOS pour la ville d' EL Oued en utilisant la microcellule urbaine

IV.7.1 Analyse de MIMO en utilisant différentes distances de séparation T-R pour l'environnement LOS

La simulation en conditions Line-of-Sight (LOS) joue un rôle crucial dans la compréhension et l'optimisation des systèmes de communication sans fil, en particulier dans les fréquences millimétriques. Dans les simulations LOS, l'accent est mis sur la modélisation des scénarios de communication où il existe une ligne de visée directe entre l'émetteur (TX) et le récepteur (RX), sans obstruction significative. Les simulations LOS permettent d'évaluer les performances des systèmes de communication dans des conditions idéales, où le signal peut se propager sans être bloqué par des obstacles tels que des bâtiments ou des reliefs naturels. Cela permet de déterminer la portée maximale de la communication, d'analyser les caractéristiques de la propagation du signal et de prévoir les niveaux de puissance reçue. Ces informations sont essentielles pour concevoir des réseaux sans fil efficaces et fiables. En outre, les simulations LOS peuvent être utilisées pour comparer les performances entre les communications LOS et NLOS (Non-Line-of-Sight). Comprendre comment les signaux se comportent dans ces deux scénarios est essentiel pour la planification et l'optimisation des réseaux sans fil, en particulier dans les environnements urbains où la propagation du signal peut être complexe en raison de la présence d'obstacles.

En résumé, les simulations en conditions Line-of-Sight sont un outil précieux pour évaluer, planifier et optimiser les systèmes de communication sans fil, en mettant l'accent sur des conditions de communication idéales avec une ligne de visée directe entre l'émetteur et le récepteur.

Ainsi, nous procédons maintenant au calcul des données pour la ville d'El Oued dans un environnement LOS, en tenant compte des conditions spécifiques suivantes. Nous avons opté pour la saison estivale (été) où les précipitations sont absentes, et la température atteint en moyenne 34°C. Nous utiliserons la technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) pour effectuer ces calculs.

Taux moyen des précipitations pour la ville d'EL Oued: 0 mm / h.

- Pression barométrique moyenne pour la ville d'EL Oued: 1016.6 mbar.
- Humidité moyenne pour la ville d'EL Oued: 43.4%.
- Température: 34 C°.
- Nombre d'emplacements de récepteur: 1.
- Scénario: Micro Cellule Urbaine.
- Puissance de l'émetteur: 30 dBm.
- Type de réseau: . Uniform Linear Array (ULA)

MIMO utilisé	PLE	PL (dB)	Puissance reçue (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
2*2	1.7	103.8	-73.8	20.4
3*3	1.8	106.7	-76.7	22.6
4*4	1.9	107.1	-77.1	16.6
5*5	2.5	119.1	-89.1	17.8
6*6	1.7	102.8	-72.8	15.1
7*7	2.0	110.1	-80.1	9.6

Tableau IV.13 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario LOS **73 GHz** à 100 m de distance, pour l'antenne omnidirectionnelle).

MIMO utilisé	PLE	PL (dB)	Puissance reçue (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
2*2	1.9	107.3	-28.1	0.3
3*3	2.2	112.9	-33.7	5.4
4*4	2.1	111.5	-32.3	0.3
5*5	2.8	125.0	-45.8	12.1
6*6	1.9	107.9	-28.7	3.1
7*7	2.3	115.9	-36.6	2.6

Tableau IV .14 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario LOS **73GHz** à 100 m de distance, pour l'antenne directionnelle).

MIMO utilisé	PLE	PL (dB)	Puissance reçue (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
2*2	2.1	122.2	-92.2	18.1
3*3	2.0	119.8	-89.8	10.5
4*4	2.0	118.3	-88.3	6.2
5*5	2.1	120.5	-90.5	13.7
6*6	2.0	119.2	-89.2	15.7
7*7	2.0	119.4	-89.4	20.6

Tableau IV.15 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario LOS **73 GHz** à 300 m de distance, pour l'antenne omnidirectionnelle).

MIMO utilisé	PLE	PL (dB)	Puissance reçue (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
2*2	2.3	126.6	-47.4	0.5
3*3	2.2	123.2	-44.0	1.0
4*4	2.1	122.8	-43.6	0.3
5*5	2.1	122.8	-43.6	1.4
6*6	2.1	122.0	-42.8	0.7
7*7	2.2	124.7	-45.5	1.3

Tableau IV.16 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario LOS **73GHz** à 300m de distance, pour l'antenne directionnelle)

MIMO utilisé	PLE	PL (dB)	Puissance reçue (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
2*2	2.1	127.4	-97.4	11.4
3*3	2.1	128.5	-98.5	8.7
4*4	1.9	123.3	-93.3	11.4
5*5	1.9	121.7	-91.7	20.8
6*6	1.7	117.3	-87.3	0.0
7*7	2.3	134.1	-104.1	14.3

Tableau IV.17 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario LOS **73 GHz** à 600 m de distance, pour l'antenne omnidirectionnelle).

MIMO utilisé	PLE	PL (dB)	Puissance reçue (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
2*2	2.3	133.6	-54.4	0.5
3*3	2.2	131.4	-52.2	0.4
4*4	2.1	127.7	-48.5	1.1
5*5	2.0	126.0	-46.8	0.5
6*6	1.7	117.3	-38.1	0.0
7*7	2.4	136.8	-57.6	0.3

Tableau IV.18 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario LOS **73GHz** à 600 m de distance, pour l'antenne directionnelle).

Dans un environnement LOS, où il y a une ligne de vue directe entre l'émetteur et le récepteur, la configuration MIMO 6*6 montre des performances remarquables. Elle présente une puissance reçue élevée, une perte de trajet minimale et un retard RMS réduit par rapport aux configurations MIMO de taille inférieure ou supérieure.

Plus précisément, pour le scénario LOS à 100 mètres de distance, tant pour l'antenne omnidirectionnelle que pour l'antenne directionnelle, la configuration MIMO 6x6 affiche une puissance reçue élevée, une perte de trajet relativement faible et un retard RMS minimal par rapport aux autres configurations.

Cela signifie que dans les applications où la qualité de la communication et la capacité de transmission de données sont essentielles, la configuration MIMO 6x6 est un choix optimal. Cependant, il est important de noter que la gestion du Canal State Information (CSI) devient plus complexe avec un grand nombre d'antennes, ce qui peut nécessiter des efforts supplémentaires en termes de conception du système et de traitement des signaux pour garantir des performances optimales.

En résumé, les résultats des tableaux indiquent que la configuration MIMO 6x6 est hautement performante dans les environnements LOS, offrant une puissance reçue élevée et une qualité de communication exceptionnelle, bien que cela puisse nécessiter une gestion plus avancée du CSI.

IV.7.2 Analyse de MIMO 6*6 en utilisant différentes distances de séparation T-R et température pour l'environnement LOS

Nous procédons actuellement au calcul de données pour un environnement LOS avec une température de 10°C et un taux de pluie de 0 mm

- Taux moyen des précipitations pour la ville d'EL Oued: 0 mm / h.
- Pression barométrique moyenne pour la ville d'EL Oued: 1016.6 mbar.
- Humidité moyenne pour la ville d'EL Oued: 43.4%.
- Température: 10 C°.
- Nombre d'emplacements de récepteur: 1.
- Scénario: Micro Cellule Urbaine.
- Puissance de l'émetteur: 30 dBm.
- Type de réseau: Uniform Linear Array (ULA)

Séparation T-R en m	PLE	PL (dB)	Pr (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
100	2.4	117.1	-87.1	17.9
300	1.9	116.6	-86.6	15.8
600	2.0	124.5	-94.5	20.4

Tableau IV.19 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour lscénario LOS **73 GHz** à 10 C°, pour l'antenne omnidirectionnelle)

Séparation T-R en m	PLE	PL (dB)	Pr (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
100	2.7	123.7	-44.5	2.9
300	2.1	120.7	-41.5	0.5
600	2.1	129.2	50.0	6.1

Tableau IV.20 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario LOS **73 GHz** 10 C°, pour l'antenne directionnelle).

Dans le tableau IV.19, on observe que la distance de séparation T-R varie de 100 mètres à 600 mètres. Le coefficient de propagation libre (PLE) diminue légèrement à mesure que la distance augmente, passant de 2.4 à 2.0. Cette diminution du PLE suggère une légère perte de puissance du signal à mesure que la distance augmente. Cela est corroboré par la perte de chemin (PL) qui augmente de 117.1 dB à 124.5 dB avec l'augmentation de la distance. La puissance reçue (Pr) diminue également à mesure que la distance augmente, passant de -87.1 dBm à -94.5 dBm. Le retard de propagation moyen (RMS retard de propagation) augmente également avec la distance, passant de 17.9 ns à 20.4 ns.

Dans le tableau IV.20, les données sont similaires, mais on note des différences importantes en fonction de la distance de séparation T-R. Le PLE varie de 2.7 à 2.1, montrant une diminution significative de la propagation du signal à mesure que la distance augmente. La PL diminue également, passant de 123.7 dB à 129.2 dB, indiquant une perte de puissance moindre à mesure que la distance augmente. La puissance reçue (Pr) varie considérablement en fonction de la distance, passant de -44.5 dBm à 50.0 dBm. Le retard de propagation moyen (RMS retard de propagation) varie de 0.5 ns à 6.1 ns, ce qui suggère des variations importantes dans le délai de propagation en fonction de la distance.

En résumé, ces tableaux montrent comment différentes distances de séparation T-R affectent les performances de la communication MIMO 6*6 dans un environnement LOS à 73 GHz et 10°C. La distance joue un rôle crucial dans la perte de puissance, la puissance reçue et le retard de propagation, avec des variations significatives en fonction de la distance et du type d'antenne utilisé (omnidirectionnelle vs directionnelle).

Ainsi, nous effectuons maintenant les calculs pour l'environnement LOS avec une température de 22.8°C et un taux de pluie de 71.7 mm/h

- Taux moyen des précipitations pour la ville d'EL Oued: 71.7 mm / h.
- Pression barométrique moyenne pour la ville d'EL Oued: 1016.6 mbar.
- Humidité moyenne pour la ville d'EL Oued: 43.4%.
- Température: 22.8 C°.
- Nombre d'emplacements de récepteur: 1.
- Scénario: Micro Cellule Urbaine.
- Puissance de l'émetteur: 30 dBm.
- Type de réseau: Uniform Linear Array (ULA)

Séparation T-R en m	PLE	PL (dB)	Pr (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
100	2.6	121.9	-91.9	12.3
300	2.2	125.3	-95.3	0.0
600	2.7	145.1	-115.1	20.2

Tableau IV.21 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du délai RMS, (pour le scénario LOS 73 GHz à 22.8 C°, pour l'antenne omnidirectionnelle).

Séparation T-R en m	PLE	PL (dB)	Pr (dBm)	RMS retard de propagation (ns)
100	2.8	126.5	-47.3	1.4
300	2.2	125.3	-46.1	0.0
600	2.9	150.9	-71.7	2.4

Tableau IV.22 Perte de trajet, puissance reçue et propagation du retard RMS, (pour le scénario LOS 73 GHz 22.8 C°, pour l'antenne directionnelle).

Dans ce nouveau scénario avec une température de 22.8°C et un taux de pluie de 71.7 mm/h, les tableaux IV.21 et IV.22 fournissent des données supplémentaires concernant l'analyse de MIMO 6*6 dans un environnement LOS à 73 GHz.

Dans le tableau IV.21, on observe que le coefficient de propagation libre (PLE) a légèrement augmenté par rapport au scénario précédent, passant de 2.4 à 2.6 pour une distance de 100 mètres. Cependant, à 300 mètres, le PLE est passé de 1.9 à 2.2, montrant une augmentation plus significative. À 600 mètres, le PLE est de 2.7. Cela indique une augmentation de la propagation du signal par rapport au scénario précédent. La perte de chemin (PL) diminue à 100 mètres, passant de 117.1 dB à 121.9 dB, ce qui suggère une perte de puissance moindre. À 300 mètres, la PL est de 125.3 dB, et à 600 mètres, elle est de 145.1 dB. La puissance reçue (Pr) diminue également, passant de -87.1 dBm à -91.9 dBm à 100 mètres. À 300 mètres, la Pr est de -95.3 dBm, et à 600 mètres, elle est de -115.1 dBm. Le retard de propagation moyen (RMS retard de propagation) varie considérablement, allant de 12.3 ns à 20.2 ns.

Dans le tableau IV.22, les données montrent des variations similaires en fonction de la distance. Le PLE augmente légèrement avec la distance, passant de 2.8 à 2.9. La PL diminue à mesure que la distance augmente, passant de 126.5 dB à 150.9 dB. La Pr diminue également,

passant de -47.3 dBm à -71.7 dBm. Le retard de propagation moyen (RMS retard de propagation) varie de 0.0 ns à 2.4 ns.

En résumé, ces tableaux montrent comment les performances de la communication MIMO 6*6 évoluent dans un environnement LOS à 73 GHz et 22.8°C, avec un taux de pluie plus élevé. La température et les conditions météorologiques peuvent avoir un impact significatif sur la propagation du signal, la perte de puissance et le retard de propagation en fonction de la distance et du type d'antenne utilisé (omnidirectionnelle vs directionnelle).

IV.8 AoA , AoD et PDP pour MIMO 2 * 2 et 6*6 en utilisant différentes conditions

Dans cette section, nous avons effectué une simulation en utilisant le modèle CI avec diverses configurations de paramètres. La modélisation statistique des canaux s'est concentrée sur la création de modèles à partir du spectre de puissance mesuré en azimut et en élévation en utilisant des prédictions basées sur le traçage des rayons 3D. Nous avons également généré des données lorsque les mesures directes n'étaient pas disponibles. Les paramètres du canal ont été ajustés pour correspondre aux conditions météorologiques moyennes de la ville d'El Oued, notamment la pression atmosphérique, la température et l'humidité.

Pour la simulation, nous avons utilisé des fréquences de 73 GHz avec une bande passante RF de 800 MHz. Nous avons examiné différentes distances entre les émetteurs et les récepteurs, à savoir 100 m, 300 m et 600 m, en utilisant un angle de réception en co-polarisation. Les paramètres de l'antenne sont restés constants pour assurer la cohérence des simulations.

En résumé, cette simulation nous a permis de mieux comprendre comment le modèle CI se comporte dans des conditions similaires à celles d'El Oued. Elle nous a aidés à évaluer les performances potentielles du modèle dans cet environnement spécifique.

IV.8.1 Spectre de puissance des lobes AOA et AOD pour l'environnement NLOS

Le spectre de puissance des lobes AOA (Angle of Arrival - Angle d'Arrivée) et AOD (Angle of Departure - Angle de Départ) dans un environnement NLOS (Non-Line of Sight - Hors de Ligne de Vue) est essentiel pour comprendre la propagation des ondes millimétriques (mmWave) dans des conditions où il n'y a pas de ligne directe entre l'émetteur et le récepteur. Dans ce contexte, les lobes AOA et AOD se réfèrent aux angles auxquels les signaux radio arrivent à l'antenne réceptrice et sont émis par l'antenne émettrice.

Lorsque nous examinons le spectre de puissance de ces lobes, nous observons la distribution des signaux radio entrants et sortants en fonction de l'angle d'arrivée et de l'angle de

départ. Cette distribution peut varier en fonction de la configuration de l'antenne, de la géométrie de l'environnement, de la présence d'obstacles, et d'autres facteurs qui influencent la propagation des ondes.

En général, dans un environnement NLOS, les lobes AOA et AOD peuvent montrer une plus grande dispersion et une plus grande variabilité par rapport à un environnement LOS (Line of Sight - Ligne de Vue). Cela est dû aux réflexions multiples, aux diffractions, et à la diffusion des ondes radio sur des surfaces et des obstacles, ce qui entraîne une propagation non directe des signaux.

L'analyse du spectre de puissance des lobes AOA et AOD dans un environnement NLOS est cruciale pour la conception de systèmes de communication mmWave efficaces. Elle permet de mieux comprendre la distribution spatiale des signaux et de prendre des décisions sur l'orientation des antennes, la gestion des interférences, et d'autres paramètres pour optimiser la qualité de la communication.

En résumé, le spectre de puissance des lobes AOA et AOD dans un environnement NLOS est un élément clé de l'analyse de la propagation des signaux mmWave, offrant des informations précieuses pour la planification et l'optimisation des réseaux de communication sans fil.

a) Dans une température de $22.8C^{\circ}$ avec un taux de pluie de 71.7 mm / h dans une distance de séparation T-R de 100 m

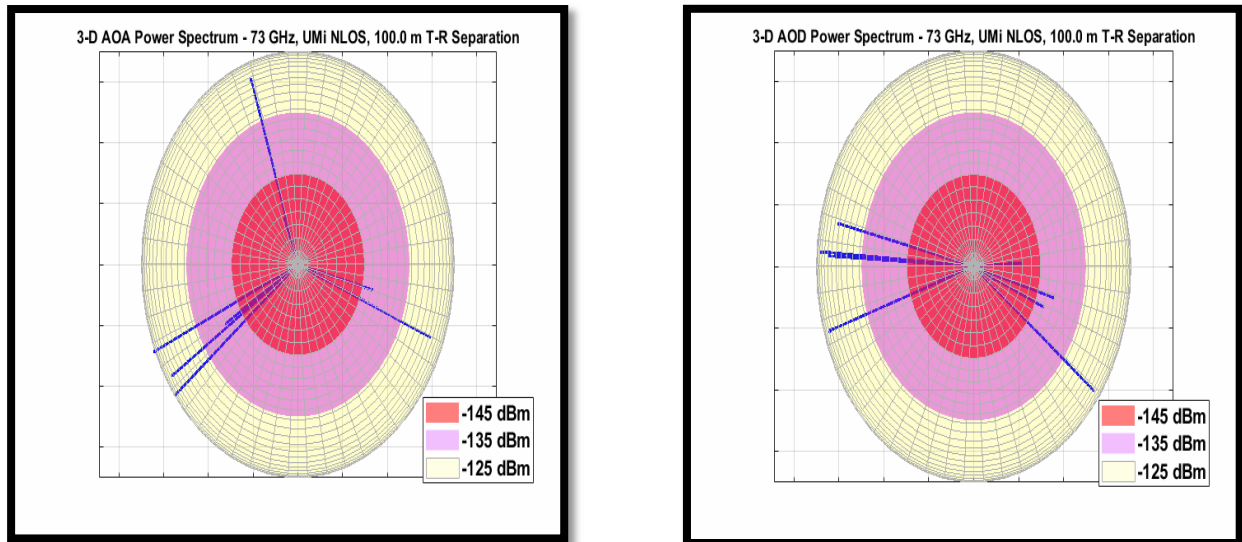


Figure IV.2 Spectre de puissance AoD et AoA pour 73 GHz à $22.8C^{\circ}$

b) Dans une température de 10C° sans taux de pluie dans une distance de séparation T-R de 300 m

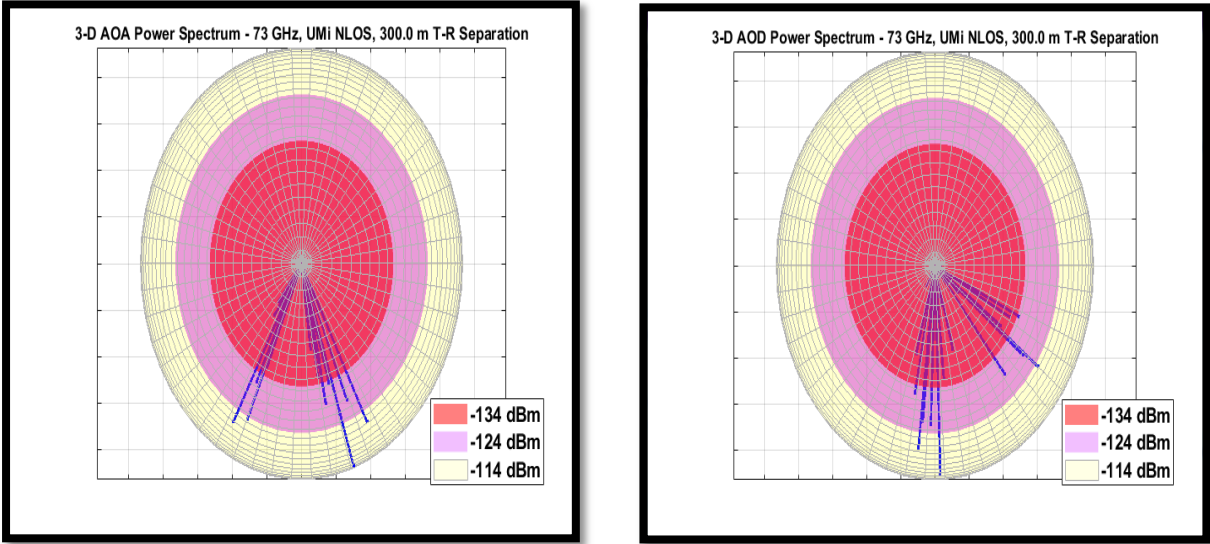


Figure IV.3 Spectre de puissance AoD et AoA pour 73GHz à 10C

c) Dans une température de $34C^{\circ}$ sans taux de pluie dans une distance de séparation T-R de 600 m

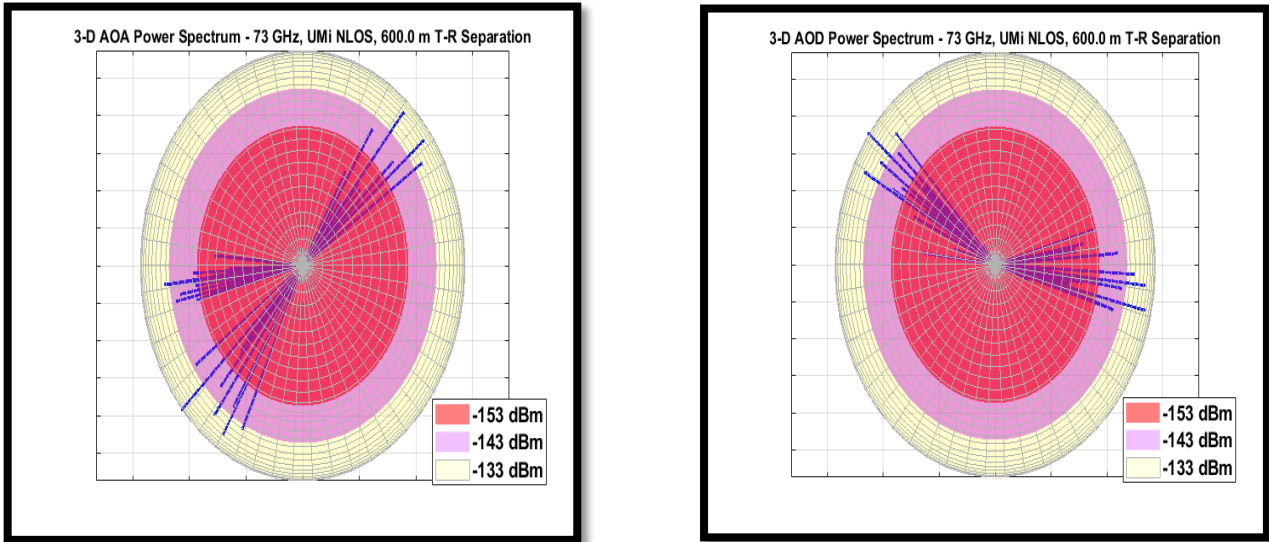


Figure IV.4 Spectre de puissance AoD et AoA pour 73 GHz à $34C^{\circ}$.

IV.8 .2 Spectre de puissance des lobes AOA et AOD pour l'environnement LOS

a) Dans une température de $34C^{\circ}$ sans taux de pluie dans une distance de séparation T-R de 600 m

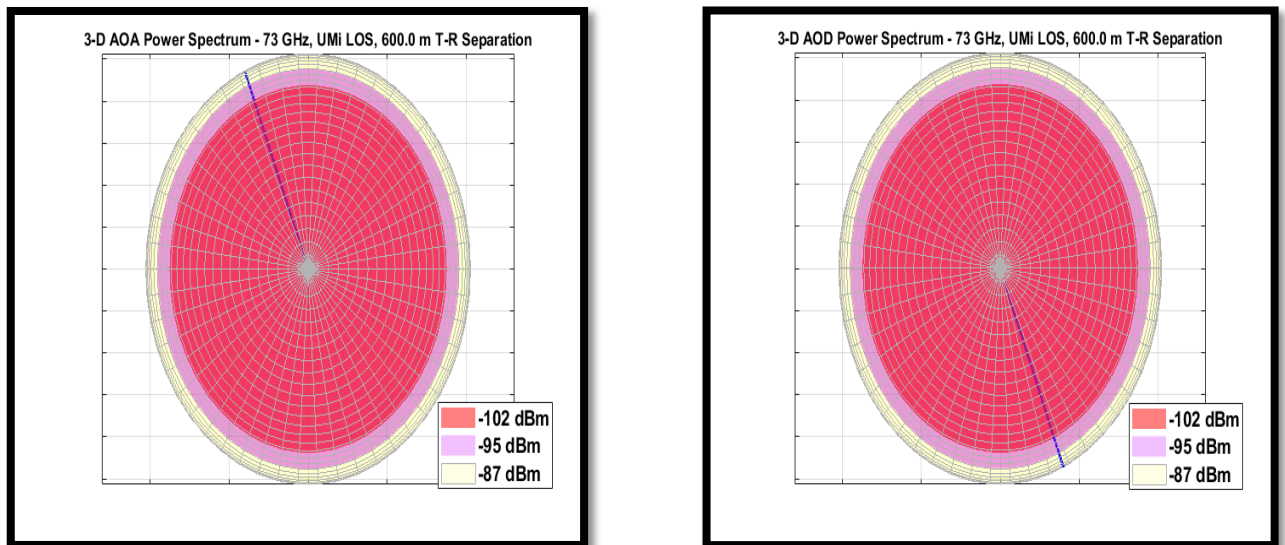


Figure IV.5 Spectre de puissance AoD et AoA pour 73 GHz $34C^{\circ}$

b) Dans une température de $10C^{\circ}$ sans taux de pluie dans une distance de séparation T-R de 100

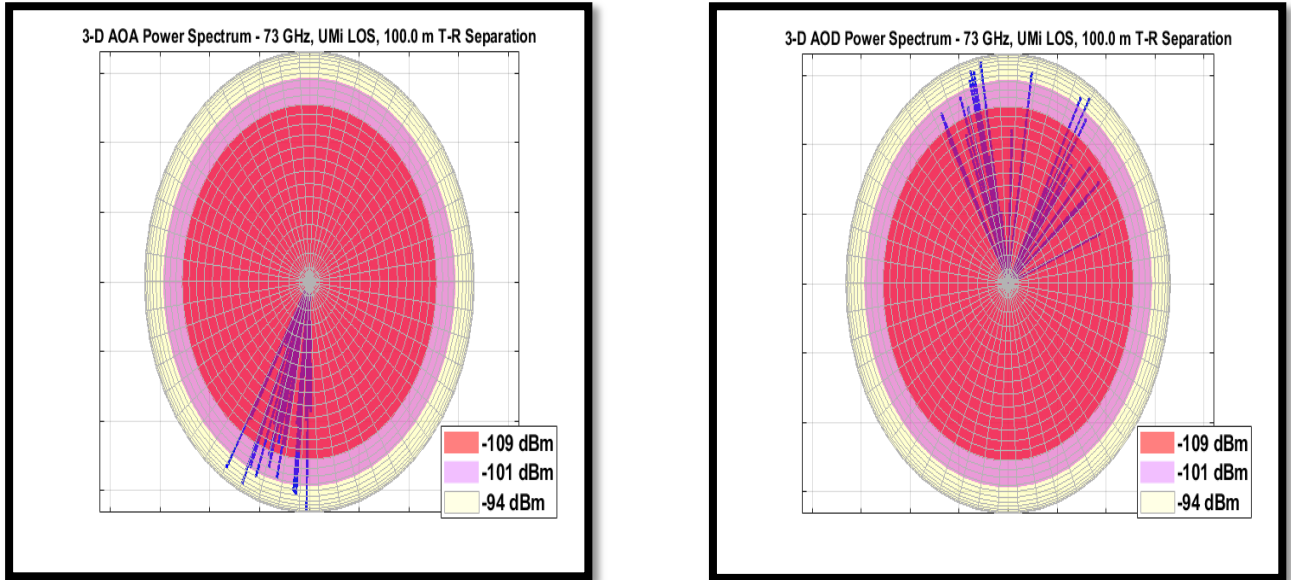


Figure IV.6 Spectre de puissance AoD et AoA pour 73 GHz $10 C^{\circ}$.

c) Dans une température de $22.8 C^{\circ}$ avec $71.7mm / h$ taux de pluie dans une distance de séparation T-R de 100 m

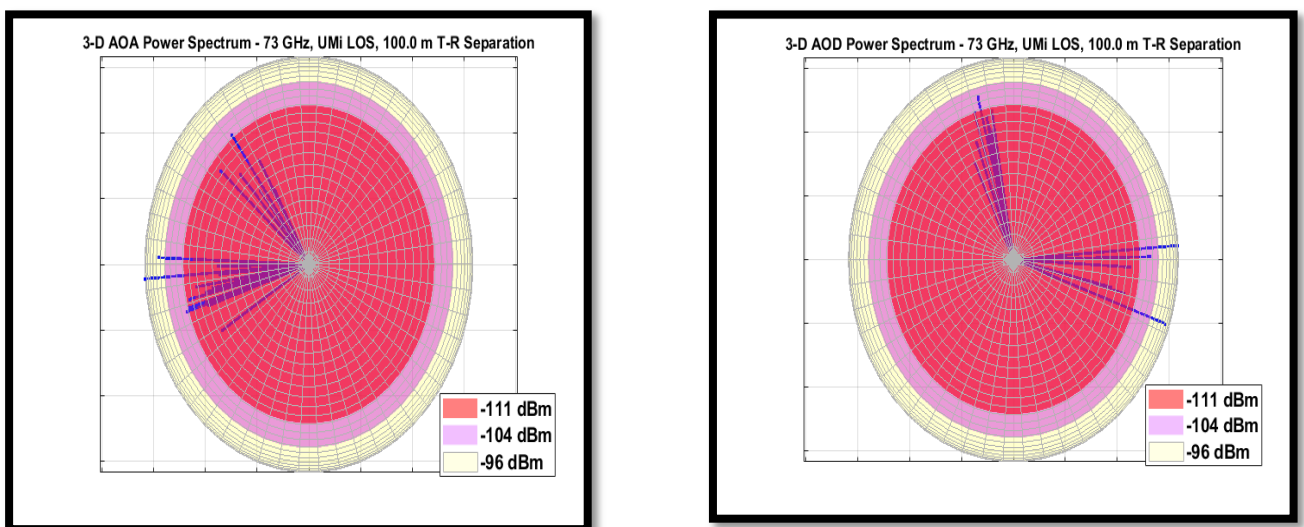


Figure IV.7 Spectre de puissance AoD et AoA pour 73 GHz $34C^{\circ}$.

Les angles de pointage moyens pondérés par la puissance (AOA et AOD) sont utilisables dans les deux contextes, que ce soit en LOS (Ligne de Vue) ou en NLOS (Non Ligne de Vue). Ils sont employés pour déterminer la direction d'arrivée ou de départ de l'énergie dans chaque lobe. Lorsque l'on mesure ou simule la moyenne des angles AOA/AOD pour un ensemble de lobes, on devrait obtenir une distribution uniforme couvrant une plage de 0° à 360° . Comme le montrent les Figure IV.5 et IV.6, les spectres de puissance des lobes AOA/AOD semblent similaires et étroitement corrélés. Ces similarités peuvent être attribuées à la puissance émise, maintenue constante à 30 dBm dans toutes les situations, indépendamment de la fréquence d'émission.

IV.8.3 Profil de retard de puissance omnidirectionnel et omnidirectionnel pour les systèmes NLOS et LOS à 73 GHz à une température de 22.8 C°

Pour avoir une vision complète des caractéristiques du canal de communication, il est impératif d'examiner attentivement son mécanisme de propagation. Cette propagation est souvent décrite comme une combinaison d'ondes en progression, où chaque onde qui atteint le récepteur est décrite en termes de son amplitude (tension), de son délai temporel, ainsi que des angles d'incidence et de départ. En utilisant ces éléments, il devient possible de déterminer la réponse impulsionnelle du canal, également appelée CIR (channel impulse response). Cette réponse impulsionnelle revêt une importance cruciale car elle révèle comment les signaux se propagent à travers le canal, ce qui est essentiel dans la conception et l'amélioration des systèmes de communication.

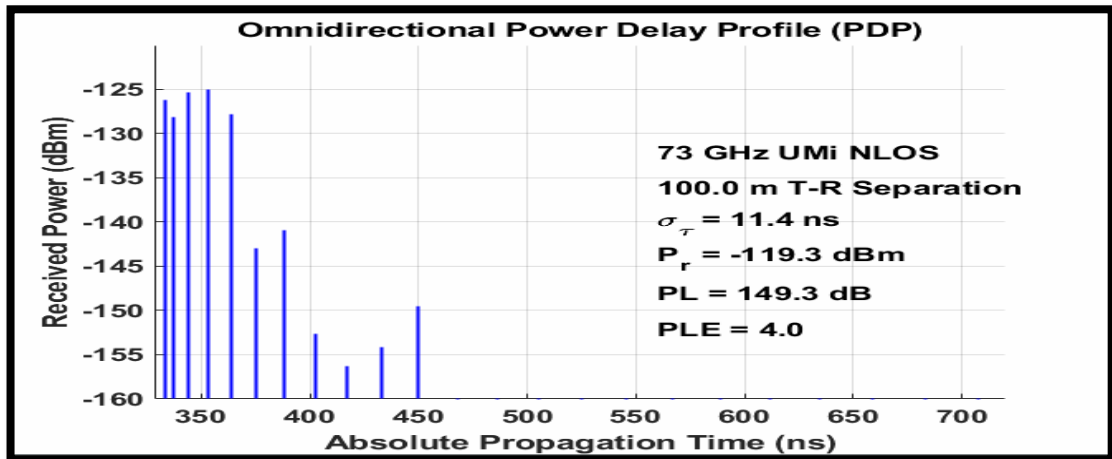


Figure IV.8 PDP omnidirectionnel pour environnement NLOS 73 GHz.

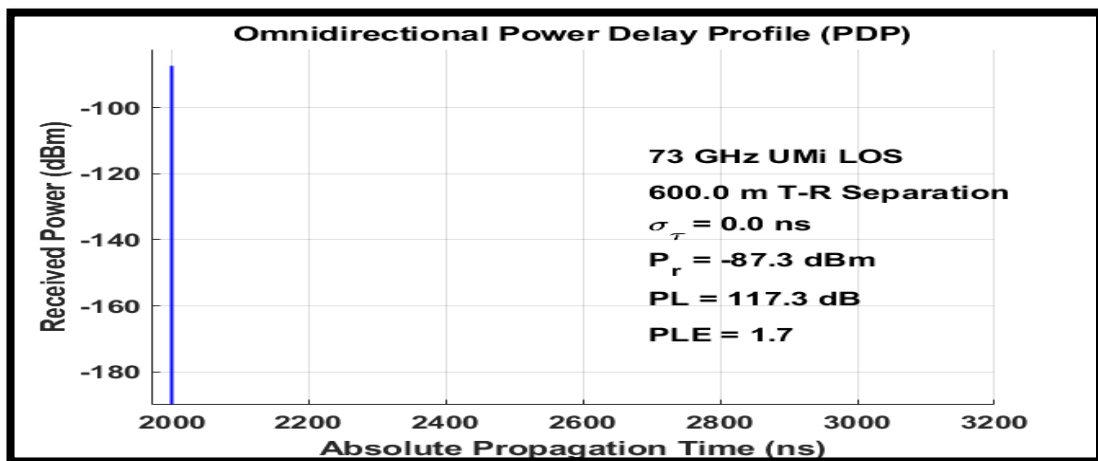


Figure IV.9 PDP omnidirectionnel pour environnement LOS 73 GHz.

Les données affichées par les diagrammes PDP (Power Delay Profile) omnidirectionnels pour les environnements LOS (Ligne de Vue) et NLOS (Non Ligne de Vue) à une fréquence de 73 GHz montrent des variations significatives en fonction des distances entre l'émetteur et le récepteur. À mesure que ces distances diminuent dans la simulation, le temps de propagation absolu de la signalisation augmente.

De plus, il est à noter de légères différences dans le niveau d'atténuation entre les environnements LOS et NLOS, même lorsque les distances entre les dispositifs se rapprochent.

Ces différences peuvent être attribuées aux variations des conditions environnementales et des caractéristiques du trajet. Elles mettent en évidence comment l'environnement peut influencer la propagation et l'atténuation du signal dans des environnements différents.

IV.8.4 Profil de retard de puissance directionnel et directionnel pour NLOS et LOS 73 GHz à 22.8 C°

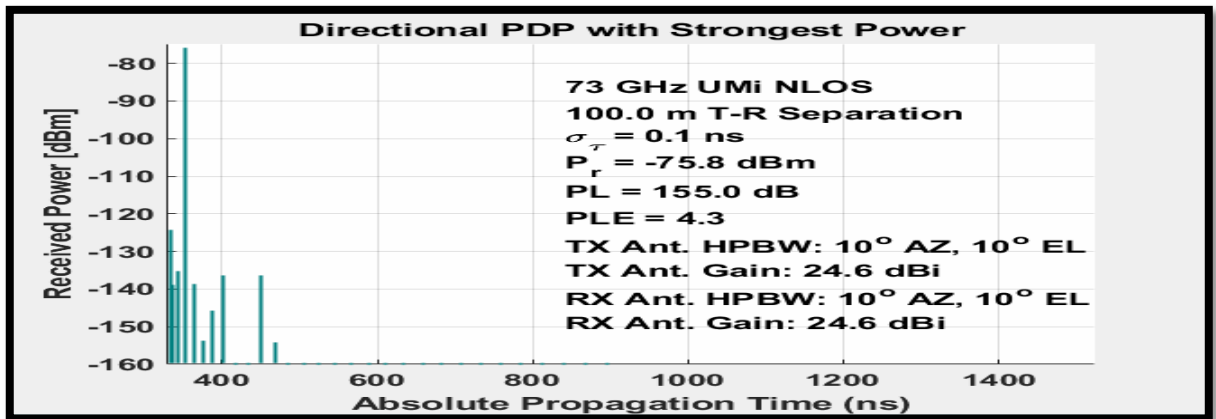


Figure IV.10 PDP directionnel pour environnement NLOS 73 GHz

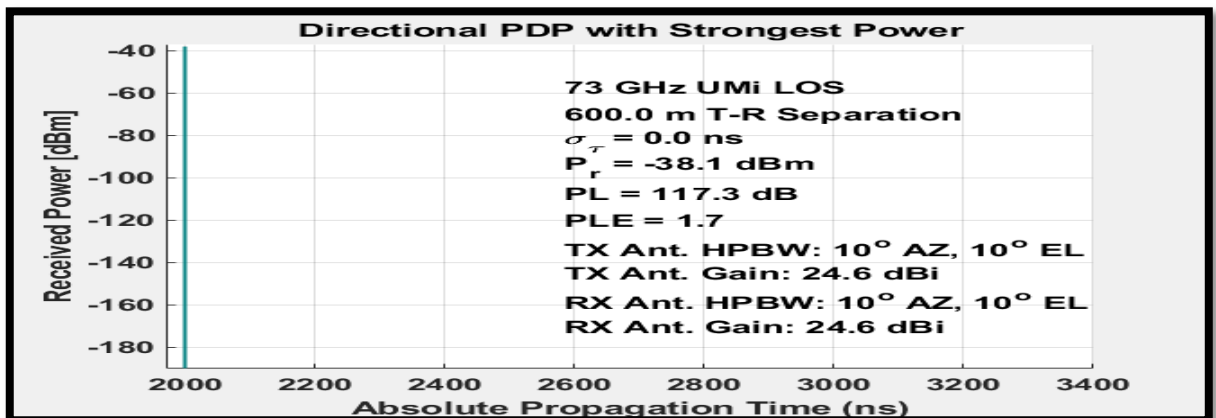


Figure IV.11 PDP directionnel pour environnement LOS 73 GHz.

L'analyse des profils de puissance directionnelle (PDP) à la fréquence de 73 GHz révèle des aspects importants dans les environnements LOS (Ligne de Vue) et NLOS (Non Ligne de Vue), comme illustré dans les graphiques IV.10 et IV.11. En LOS, on observe que la puissance reçue du PDP commence à décroître après environ 2000 ns, ce qui suggère une perte de signal progressive. En revanche, dans un environnement NLOS, cette diminution commence après environ 450 ns, indiquant une atténuation plus rapide du signal.

Cette différence de comportement entre LOS et NLOS à 73 GHz peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment la dispersion des ondes à haute fréquence, une plus grande sensibilité aux obstacles et une augmentation des pertes de propagation. Comprendre ces variations est essentiel pour concevoir des systèmes de communication efficaces dans ces conditions de fréquence élevée.

IV.8.5 Perte de trajets

dans le contexte des systèmes de communication sans fil, est un phénomène inévitable qui résulte de diverses interactions entre les ondes électromagnétiques et l'environnement de propagation. Cette perte peut être causée par plusieurs mécanismes, tels que la dissipation d'énergie lors de la propagation en espace libre, la réflexion des ondes contre des obstacles, la diffraction à travers des obstacles, les variations aléatoires de l'intensité du signal (fading), ainsi que l'occultation partielle du signal due à des obstacles ou à des conditions météorologiques défavorables.

Comprendre la perte de trajets est essentiel pour concevoir des systèmes de communication fiables, car elle impacte la qualité de la réception du signal. Les ingénieurs et les chercheurs s'efforcent de modéliser et d'estimer ces pertes de trajets dans divers environnements et scénarios de communication, en utilisant des modèles théoriques et des mesures expérimentales. Cette connaissance est cruciale pour l'optimisation des systèmes sans fil et la mise en place de mécanismes de correction d'erreurs afin d'assurer une communication stable et efficace, en dépit des pertes de signal inévitables.

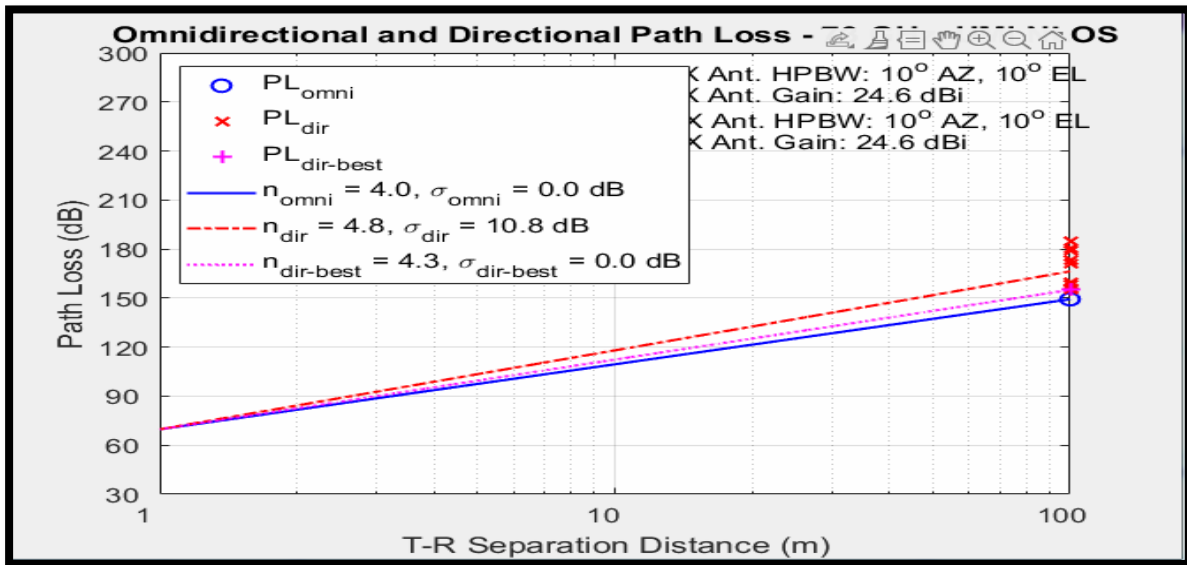


Figure IV.12 Perte de trajet omnidirectionnelle et directionnelle pour NLOS 73 GHz.

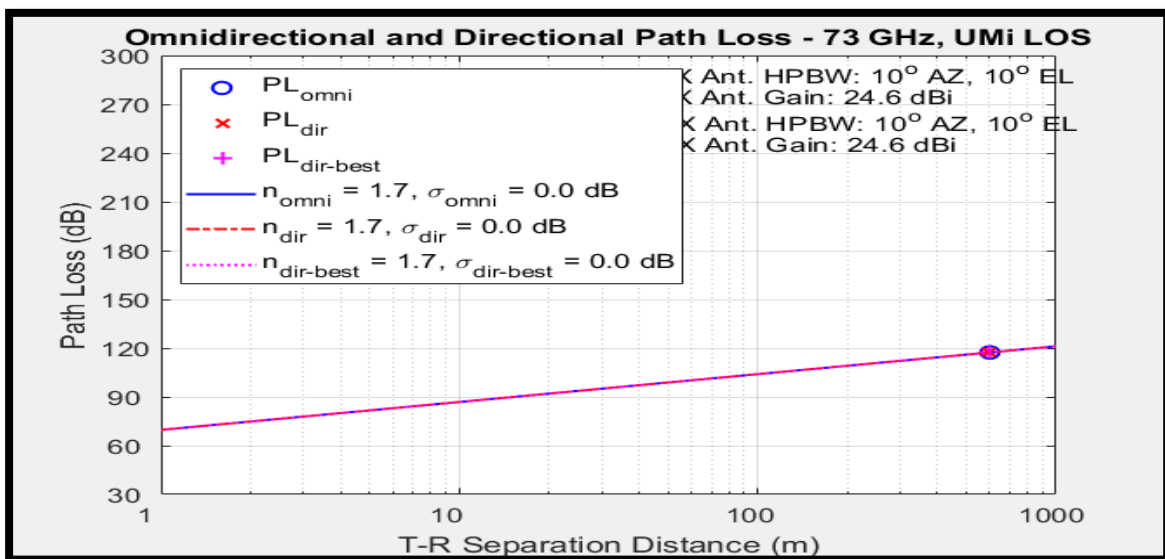


Figure IV.13 Perte de trajet omnidirectionnelle et directionnelle pour LOS 73 GHz.

Le diagramme de dispersion révèle les valeurs d'atténuation, qu'elle soit omnidirectionnelle ou directionnelle, générées dans les scénarios UMi LOS (Ligne de Vue) et NLOS (Non Ligne de Vue) à une fréquence de 73 GHz. La distance entre l'émetteur et le récepteur (T-R) est d'environ 100 mètres pour NLOS et d'environ 600 mètres pour LOS. L'atténuation sur le trajet diffusé varie entre 120 et 180 décibels (dB) pour les deux configurations, illustrant ainsi les fluctuations significatives de la puissance du signal le long du parcours.

En outre, ce graphique met en évidence deux paramètres clés : l'exposant d'atténuation sur le trajet et l'écart-type d'atténuation de l'ombre, indiquant la direction privilégiée à partir de laquelle un signal fort est reçu. Il est important de noter que l'atténuation directionnelle du chemin et l'exposant d'atténuation directionnelle du chemin sont plus élevés. Cette augmentation découle du fait que le canal directionnel subit davantage de pertes par rapport au canal omnidirectionnel. Cette distinction résulte de la capacité de l'antenne directionnelle à filtrer les trajets multipath (MPC) et à recevoir un nombre limité de MPC en provenance d'une direction spécifique. De plus, les demi-puissances en largeur de faisceau (HPBW) en élévation et en azimut de l'antenne sont réglées à 10 degrés au niveau de l'émetteur et du récepteur, influençant ainsi la manière dont les signaux sont reçus dans différentes directions.

IV.9.Conclusion

À la fin de ce chapitre, nous avons plongé au cœur de la simulation du modèle de canal pour la technologie de communication cellulaire 5G mmWave. Nous avons exploré les conditions LOS (Line of Sight) et NLOS (Non-Line of Sight) à une fréquence de fonctionnement de 73 GHz, en considérant diverses configurations d'antennes tant du côté émetteur que récepteur. Cette simulation a été rendue possible grâce à l'utilisation du logiciel NYUSIM. Nos investigations nous ont permis de recueillir de précieux paramètres de canal, notamment les spectres de puissance des angles d'arrivée (AoA) et de départ (AoD), ainsi que les profils de retard de puissance, qu'ils soient directionnels ou omnidirectionnels, pour différentes configurations d'antennes. Nous avons également élaboré des graphiques de dispersion pour évaluer la perte de chemin en fonction de la distance, accompagnés d'indicateurs statistiques essentiels tels que l'exposant de perte de chemin et l'écart type.

Au sein de ce chapitre, nous avons également abordé la question cruciale du choix approprié des éléments d'antenne pour la technologie MIMO (Multiple Input, Multiple Output) dans le contexte de la communication cellulaire 5G à 73 GHz. Nous avons examiné les communications dans des environnements NLOS et LOS, en tenant compte de la perte de chemin et de la dispersion temporelle estimées pour les canaux 5G à 73 GHz dans ces conditions.

Nous avons également analysé divers aspects des environnements, explorant les variations selon différentes variables. Une analyse comparative des performances entre LOS et NLOS dans la bande de fréquence de 73 GHz pour les réseaux sans fil à ondes millimétriques a été effectuée, couvrant des paramètres tels que le retard temporel, la puissance reçue, les angles AoD et AoA, le chemin perdu et le RMS du retard, dans les contextes LOS et NLOS. Il convient de noter que le retard temporel se caractérise par une forte variabilité dans les environnements LOS, tandis qu'il est plus stable dans les environnements NLOS.

Pour conclure, cette étude approfondie nous a permis de mieux appréhender les performances des canaux dans les environnements LOS et NLOS à une fréquence de 73 GHz. Ces découvertes sont d'une importance capitale dans le domaine des communications sans fil et de la technologie 5G, ouvrant la voie à de nouvelles perspectives et développements prometteurs.

Conclusion Générale

Conclusion Générale:

En guise de conclusion globale et plus détaillée pour ce projet de recherche, il convient de noter l'importance stratégique de la fréquence de 73 GHz dans le contexte de la technologie 5G et des ondes millimétriques. Cette fréquence représente l'une des ressources les plus prometteuses pour les futurs systèmes de communication sans fil, en raison de sa large bande passante et de sa capacité à fournir des débits de données extrêmement élevés. Cependant, notre étude a révélé que l'exploitation de cette fréquence n'est pas dépourvue de défis significatifs.

L'une des principales contributions de cette recherche a été la simulation et l'analyse détaillée des caractéristiques de propagation des ondes millimétriques à 73 GHz. Nous avons examiné ces caractéristiques dans des scénarios de ligne de visée (LOS) et de non-ligne de visée (NLOS), en utilisant le modèle de canal NYUSIM. Les résultats ont montré que la performance du canal à cette fréquence est sensible à divers facteurs, notamment la distance entre l'émetteur et le récepteur, les conditions météorologiques et les obstacles environnementaux.

De plus, nous avons examiné en détail les spectres de puissance AoA (Angle of Arrival) et AoD (Angle of Departure), ainsi que d'autres paramètres influents, et nous avons identifié des tendances et des comportements significatifs.

En conclusion, ce projet de recherche a jeté les bases d'une meilleure compréhension de la propagation des ondes millimétriques à 73 GHz dans le contexte de la 5G. Les connaissances acquises sont essentielles pour le développement futur des réseaux de communication sans fil à haute fréquence. Pour surmonter les défis inhérents à cette technologie, l'utilisation de techniques avancées telles que la formation de faisceaux (beamforming) et la technologie MIMO est vivement recommandée. Ces avancées sont essentielles pour exploiter pleinement le potentiel de la fréquence de 73 GHz et pour offrir des communications sans fil plus rapides, plus fiables et plus performantes pour les générations à venir.

Bibliographie

Bibliographie

[1] Edward M. Roche, Benjamin H. Dickens-Jr., et Walker Townes, « La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation) », Article.

[2] M. H. Abu Saada, "Design Of Efficient Millimeter Wave Planar Antennas For 5G Communication Systems," Mémoire de Master, Université Islamique de Gaza, 2017.

[3] Bouaka Asma, Temmar Louiza, "Simulation d'un réseau d'antennes pour les mobiles 5G avec CST Microwave Studio," Université KASDI MERBAH de OUARGLA, 2018.

[4] A. Gohil, H. Modi, S. K. Patel, "5g Technology Of Mobile Communication: A Survey," Conférence Internationale Sur Les Systèmes Intelligents Et Le Traitement Du Signal, 2013.

[5] Fei Hu, "Opportunities in 5g Networks: A Research and Development Perspective," Livre, 5 avril 2016.

[6] Dehemchi Marwa et Bouhafer Asma, "Etude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G," Mémoire de master, Université de Guelma.

[7] Ouleha Ouassim et Didouna Salahdine, "Etude des performances de modulation UFMC Pour le réseaux 5G," Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunication, Université 8 Mai 1945 – Guelma.

[8] Bentouati Aya Khadidja et Boublenza Rokia Nassima, "Etude et conception d'antennes MIMO pour les systèmes de communication 5G," Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2022.

[9] Belakhdar Faiza, "Etude et conception des antennes imprimées pour le nouveau standard de la téléphonie mobile 5G," Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2021.

[10] Youcefi Abdessamad, Mazouni Ibrahim, "Les différentes formes d'ondes candidates dans les applications 5G," 2019.

Bibliographie

- [11] Mokhefi Akila et Metahri Imene, "Etude et simulation de méthode de Beamforming pour des systèmes de Modulation multi-porteuse pour la 5G," Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, juin 2018. Mémoire fin d'études.
- [12] Atmani Harz et Baba Ahmed Yasmine, "La technologie NOMA dans les réseaux de communications mobiles 5G," Université A. MIRA-BEJAIA, 2020.
- [13] Nicola Michailow, Ivan Gaspar, Stefan Krone, Michael Lentmaier, and Gerhard Fettweis, "Generalized frequency division multiplexing: Analysis of an alternative multi-carrier technique for next-generation cellular systems," 2012.
- [14] Background Paper. Preparing for WRC-19 Understanding the issues at stake and the impact of decisions to be made.
- [15] Mishra, Ajay R., "Fundamentals of Network Planning and Optimization 2G/3G/4G: Evolution to 5G," John Wiley & Sons, 2018.
- [16] Bouanane Nor el Houda Amal et Ghermaoui Sanaa, "Optimisation du précodeur et du combineur dans les systèmes de formation des faisceaux hybrides," Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2022.
- [17] Allel Moncef, Amraoui Zakaria, "Conception de nouveau système d'antennes MIMO pour le standard 5G," Université 8 Mai 1945 de Guelma, 2021.
- [18] Mme Trari Tani Amel, Melle Tahri Asma, "L'estimation de canal pour les systèmes MIMO massifs," Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2020.
- [19] Daci Kaoutar, Dou Warda, "Étude de massive MIMO pour 5G," Université Echahid Hamma Lakhdar de El-Oued, 2019.
- [20] Bouhafis Abderrezzaq et Ichou Abdelkader, "Étude et conception d'un réseau d'antennes pour des applications 5G", Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2019-2020.

Bibliographie

- [21] Adila Manel et Kafi Kaoutar, "Performances des algorithmes d'estimation du canal pour un système MIMO massif," Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2020.
- [22] Dehemchi Marwa et Bouhafer Asma, "Étude et Analyse de Méthodes de Beamforming pour des Systèmes Multi-utilisateurs Pour la 5G", Université 8 Mai 1945 – Guelma, juillet 2019.
- [23] Ladraa Bouchra et Zaoui Lmane, "Formation de faisceaux dans un système de communication MIMO massif," université Saad Dahlab de Blida, 2020.
- [24] Fares Zerradi et Salah Mohammed Tighezza, "Étude et simulation d'un système MIMO-Massif pour 5G," Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2020.
- [25] Melle Benosman Radia et Melle Sidhoum Amel, "Études et simulation des performances des systèmes MIMO en configurations STBC et V-BLAST," Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2013.
- [26] Melle Messaouda Zara, Melle Doha Afer, "Caractérisation et modélisation d'un canal radio en bande millimétrique dans un milieu industriel," Université Mohammed Seddik Ben Yahia de Jijel, 2020.
- [27] Salhi Anes, Senouci Mohammed Yacine, "Groupement d'antennes pour réseaux 5G à ondes millimétriques," Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2021.
- [28] Belakhdar Faiza, "Etude et conception des antennes imprimées pour le nouveau standard de la téléphonie mobile 5G," Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2021.
- [29] Belarbi Abderrahmane, "Etude comparative des formes d'ondes candidates à la 5G : OFDM, FBMC et UFMC," Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2019.
- [30] Yasser Aboubaker Hachemi, "Etude et simulation d'un système Beamforming hybride à ondes millimétriques pour les réseaux 5G," Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2020.
- [31] Boudouala Cherifa, "Génération d'ondes millimétriques dans les systèmes photoniques Radio sur Fibre," Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2022.

Bibliographie

[32] Messaoudi Mostefa, "Etude et conception d'une antenne à Ondes millimétriques pour des réseaux 5G," Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2021.

[33] Bouaka Asma, Temmar Louiza, "Simulation d'un réseau d'antennes pour les mobiles 5G avec CST Microwave Studio," Université kasdi merbah de Ouargla, 2018.

[34] Serir Fatima Zohra, "Conception d'antennes pour les mobiles 5G," Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen 2021.

[35] Bouhafs Abderrezzq, "Etude et conception d'un réseau d'antenne pour des applications 5G," Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2020.

[36] Al-Omary, Alauddin, "Performance Evaluation of 28 and 73 GHz Ultra High Frequency Bands for Outdoor MIMO."

[37] Sun, S. (2017). Nyusim user manual.

[38] T. S. Rappaport and S. Deng, "73 GHz wideband millimeter-wave foliage and ground reflection measurements and models," in 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), pp. 1238–1243.

[39] Sun, S., MacCartney, G. R., Samimi, M. K., & Rappaport, T. S. (2015, December). "Synthesizing omnidirectional antenna patterns, received power and path loss from directional antennas for 5G millimeter-wave communications". In 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) (pp. 1-7). IEEE.

[40] "<https://www.tutiempo.net/clima/2018/ws-605590.html>." Consulté le 4 juillet 2020.