

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE DE

L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA - BEJAIA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT GÉNIE ÉLECTRIQUE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

EN VUE D'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER

OPTIONS RÉSEAUX ET TÉLÉCOMMUNICATIONS

---

# Etude des performances des réseaux TéraHertz de nouvelle génération

---

*Réalisé par :*

Mlle.HADJOUT IMENE

SALOUDJA

Mlle.ZIBANI MELISSA

*Encadré par :*

M.BELLAHSENE Hocine

M.LATRECHE SOFIANE

Devant le jury composé de :

M.KHIEREDINE Abdelkrim

Mme.HAMZAOUI Dahbia

Promotion 2021 - 2022

# RESUMÉ

---

Les réseaux 5G représentent une avancée dans la conception des réseaux de communication, pour leur capacité à fournir une plateforme unique permettant une variété de services différents, allant des communications mobiles hauts débits améliorées à la réalité virtuelle, la conduite automatisée, l'Internet des objets, etc. Néanmoins, en regardant les demandes croissantes de nouveaux services et en prévoyant le développement de nouvelles technologies d'ici une décennie, il est déjà possible d'envisager la nécessité d'aller au-delà de la 5G et de concevoir une nouvelle architecture intégrant de nouvelles technologies pour satisfaire les nouveaux besoins au niveau individuel et sociétal. L'objectif de ce travail est d'étudier l'une des techniques de communications par spectre de la future génération, qu'est la communication térahertz. En partant d'une analyse des lacunes de la 5G et en prévoyant une nouvelle synthèse des services du futur proche, comme les communications holographiques, la fabrication de haute précision, l'introduction de l'intelligence artificielle et l'incorporation des nouvelles technologies, comme les techniques de communications THz et à lumière visible (VLC). De telles applications nécessiteront des débits de données de plusieurs centaines de gigabits par seconde à plusieurs térabits par seconde avec une faible latence et une fiabilité élevée, qui devraient être les objectifs de conception des systèmes de communication de prochaine génération. Compte tenu du potentiel des systèmes de communication térahertz (THz) pour fournir de tels débits de données sur de courtes distances, ils sont largement considérés comme la prochaine frontière pour la recherche sur les communications sans fil.

# ABSTRACT

---

5G networks represent a breakthrough in the design of communication networks, thanks to ability to provide a single platform enabling a variety of different services, ranging from enhanced high-speed mobile communications to virtual reality, automated driving, the Internet of Things, etc. Nevertheless, looking at the increasing demands for new services and predicting the development of new technologies within a decade, it is already possible to consider the need to go beyond 5G and design a new architecture integrating new technologies to satisfy new needs at the individual and societal level. The objective of this work is to study one of the future generation spectrum communication techniques, which is terahertz communication. Starting from an analysis of the gaps in 5G and foreseeing a new synthesis of services in the near future, such as holographic communications, high precision manufacturing, the introduction of artificial intelligence and the incorporation of new technologies, such as THz and visible light communication techniques (VLC). Such applications will require data rates of several hundred gigabytes per second to several terabytes per second with low latency and high reliability, which are expected to be the design goals for next-generation communication systems. Given the potential of terahertz (THz) communication systems to deliver such data rates over short distances, they are widely considerate as the next frontier for wireless communications research.

# REMERCIEMENTS

---

En préambule à ce mémoire, nous remercions ALLAH qui nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous adressons notre sincère remerciements à notre encadrant Monsieur H.BELLAHSENE, ainsi que notre co-encadrant Monsieur S.LATRECHE, à qui nous exprimons toutes nos reconnaissances. Merci pour leur bonne volonté, leur patience et leurs précieux conseils ainsi que pour la pertinence de leurs remarques.

Les mots nous manquent pour exprimer notre profonde gratitude à nos familles aimantes, leur amour, leur patience, leur sacrifice et surtout leur encouragement. Tout s'est gravé à chaque page de ce document.

Nous exprimons aussi nos vifs remerciements aux membres du jury, professeurs Mme M, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs remarques.

Enfin, nous tenons à exprimer notre plus sincère gratitude à tous les amis et à toute personne qui nous ont soutenus et encouragés lors de la préparation de ce mémoire.

---

# TABLE DES MATIÈRES

Resumé	I
Abstract	II
Table des matières	VIII
Liste des figures	X
Listes des abréviations	XII
Introduction générale	1
<b>1 Généralité sur les réseaux 5G</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Évolution des réseaux mobile . . . . .	3
1.3 Présentation de la cinquième génération 5G . . . . .	5
1.4 L'objectif de la 5G . . . . .	6
1.5 Architecture de la 5G . . . . .	6
1.6 Allocation des fréquences . . . . .	9
1.7 Structure de la trame radio . . . . .	10
1.8 Technologies émergentes pour réseaux 5G . . . . .	12
1.8.1 Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs) . . . . .	12

1.8.2	Bandes millimétriques . . . . .	13
1.8.3	Beamforming . . . . .	14
1.8.4	Les réseaux hétérogènes . . . . .	15
1.8.5	Multiplexage NOMA (Non Orthogonal Multiple Access) . . . . .	15
1.9	Affectation des application aux différentes exigences . . . . .	16
1.9.1	Large bande mobile améliorée (emBB : Enhanced Mobile Broadband)	17
1.9.2	Communications massives de type machine (mMTC : Massive Machine-Type Communications) . . . . .	17
1.9.3	Communication ultra-faible à faible latence (uRLLC : Ultra-Reliable and Low Latency Communications) . . . . .	17
1.10	Conclusion . . . . .	18
<b>2</b>	<b>La nouvelle génération des réseaux mobiles</b>	<b>19</b>
2.1	Introduction . . . . .	19
2.2	Présentation de la nouvelle génération . . . . .	19
2.3	Vision et Exigences . . . . .	20
2.3.1	Haut débit mobile encore amélioré (FEMBB) . . . . .	21
2.3.2	Communication de type machine ultra-massive (UmMTC) . . . . .	21
2.3.3	Communication à faible latence extrêmement fiable (eUURLLC) . . . . .	21
2.3.4	Communication à très faible puissance . . . . .	21
2.3.5	Communication longue distance et haut mobilité (LDHMC) . . . . .	22
2.3.6	Haute efficacité du spectre . . . . .	22
2.3.7	Capacité de trafic en zone élevée . . . . .	22
2.3.8	Communication massives de type machine à faible latence (MLLMT)	22
2.4	Les applications de la nouvelle génération . . . . .	23
2.4.1	Réalité étendue (XR) . . . . .	23
2.4.2	La robotique connectée et les systèmes autonomes (CRAS) . . . . .	24
2.4.3	Internet Of Everything (IOE) . . . . .	24
2.4.4	Téléprésence holographique . . . . .	25
2.4.5	Interactions Cerveau-ordinateur sans fil (BCI) . . . . .	25
2.4.6	Industrie 5.0 . . . . .	26

2.4.7	Soins de santé intelligents . . . . .	26
2.4.8	Mobilité par UAV . . . . .	26
2.5	Architecture de réseau future . . . . .	27
2.5.1	De la couverture terrestre à la couverture omniprésente . . . . .	28
2.5.1.1	Niveau de réseau spatial : . . . . .	28
2.5.1.2	Niveau du réseau aérien : . . . . .	29
2.5.1.3	Réseau terrestre : . . . . .	29
2.5.1.4	Réseau sous-marin : . . . . .	29
2.5.2	Vers un réseau intelligent . . . . .	30
2.5.2.1	IA distribuée (Distributed Artificial Intelligence) . . . . .	30
2.5.2.2	Bord intelligent en temps réel (Real-time Intelligent Edge) . . . . .	30
2.5.2.3	Radio intelligente (Intelligent Radio) . . . . .	30
2.5.3	Nouvelle architecture de pile de protocoles réseau . . . . .	31
2.5.4	Blockchain pour une sécurité décentralisée . . . . .	31
2.6	Conclusion . . . . .	32
<b>3</b>	<b>les Techniques de transmission étudiées</b>	<b>33</b>
3.1	Introduction . . . . .	33
3.2	Communication moléculaire . . . . .	34
3.3	Communication quantique . . . . .	34
3.4	Transmission par lumière visible . . . . .	35
3.4.1	La lumière visible et la notion de large bande . . . . .	36
3.4.1.1	Utilisation de la large bande par la lumière visible . . . . .	36
3.4.1.2	Utilisation du spectre . . . . .	36
3.4.2	Catégories des transmissions VLC . . . . .	36
3.5	Transmission par ondes THZ . . . . .	37
3.5.1	Architecture du système de transmission THZ . . . . .	38
3.5.1.1	Émetteurs-récepteurs térahertz . . . . .	38
3.5.1.2	Modèle de canal térahertz . . . . .	38
3.5.2	Parametre de transmission des système térahertz . . . . .	39
3.5.3	Domaine d'application des transmissions THz . . . . .	39

3.5.3.1	Les drones . . . . .	39
3.5.3.2	Les centres de données . . . . .	40
3.5.3.3	Les réseaux mobiles . . . . .	41
3.5.4	Avantages de la communication THz . . . . .	42
3.5.5	Inconvénients de la communication THz . . . . .	42
3.6	Comparaison entre les communications sans fils . . . . .	43
3.7	Conclusion . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Simulation des performance des réseaux terahertz</b>	<b>45</b>
4.1	Introduction . . . . .	45
4.2	Définition de SNR (RSB) . . . . .	45
4.3	Facteur de bruit . . . . .	46
4.4	Simulation et résultat . . . . .	46
4.4.1	Présentation du logiciel utilisé . . . . .	46
4.4.2	Effet de bruit sur une transmission Mmwave et THz . . . . .	47
4.4.2.1	Le SNR en fonction des fréquences Mmwave et THz pour F=10dB . . . . .	47
4.4.2.2	Le SNR en fonction des fréquences Mmwave et THz pour F=50 dB . . . . .	47
4.4.2.3	Le SNR en fonction des fréquences Mmwave et THz pour F=100 dB . . . . .	48
4.4.3	Calcul de SNR en fonction des fréquences Mmwave pour les différentes distances . . . . .	49
4.4.3.1	Calcul de SNR pour une distance de 5 m . . . . .	49
4.4.3.2	Calcul de SNR pour une distance de 50 m . . . . .	50
4.4.3.3	Calcul de SNR pour une distance de 500 m . . . . .	51
4.4.4	Calcul de SNR en fonction des fréquences THz pour les différentes distances . . . . .	52
4.4.4.1	Calcul de SNR pour une distance de 5 m . . . . .	52
4.4.4.2	Calcul de SNR pour une distance de 50 m . . . . .	53
4.4.4.3	Calcul de SNR pour la distance de 500 m . . . . .	54

4.4.5	Comparaison entre les ondes millimétriques et térahertz pour différentes distances . . . . .	55
4.4.6	La probabilité d’avoir un SNR supérieur à 0 dB pour différentes configurations de déploiement . . . . .	56
4.4.6.1	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f= 30\text{GHz}$ . . . . .	56
4.4.6.2	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f= 0.43\text{ THz}$ avec $16*4$ . . . . .	57
4.4.6.3	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f= 0.43\text{ THz}$ avec $256*256$ . . . . .	58
4.4.6.4	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f= 0.43\text{ THz}$ avec $512*256$ . . . . .	59
4.4.6.5	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f= 0.43\text{ THz}$ avec $1024 * 256$ antennes. . . . .	59
4.4.6.6	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f= 1.5\text{THz}$ avec $16*4$ . . . . .	60
4.4.6.7	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f= 1.5\text{THz}$ avec $256*256$ . . . . .	61
4.4.6.8	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f= 1.5\text{THz}$ avec $512*256$ . . . . .	62
4.4.6.9	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f= 1.5\text{ THz}$ avec $1024 * 256$ antennes. . . . .	63
4.5	Conclusion . . . . .	64
	<b>Conclusion générale</b>	<b>65</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>66</b>

---

# LISTE DES FIGURES

1.1	l'évolution des réseaux mobiles[1]. . . . .	5
1.2	L'architecture du réseau 5G [5]. . . . .	7
1.3	Architecture 5G NG-RAN [6]. . . . .	7
1.4	L'architecture du cœur de la 5G (5GC Core) [7]. . . . .	8
1.5	Allocation des fréquences [4]. . . . .	10
1.6	Physical resource block [10] . . . . .	11
1.7	La trame temporelle 5G-NR [9]. . . . .	12
1.8	MIMO massive [12]. . . . .	13
1.9	bandes de fréquence [13] . . . . .	14
1.10	Beamforming [14]. . . . .	14
1.11	Concept de technologie d'accès multiple non orthogonal (NOMA)[11] . . . . .	16
1.12	Slices standardisées de la 5G, caractéristiques et cas d'usage de la 5G[20]. . . . .	16
2.1	Certaines Applications envisagées pour la nouvelle génération[31]. . . . .	23
2.2	Application pour soins de santé en nouvelle génération [42]. . . . .	27
3.1	Bande de fréquence de THz dans le spectre électromagnétique [74]. . . . .	38
4.1	le SNR en fonction des fréquences Mmwave et THz pour 5 m et F=10dB. . . . .	47
4.2	le SNR en fonction des fréquences Mmwave et THz pour 5 m et F=50dB. . . . .	48
4.3	le SNR en fonction des fréquences Mmwave et THz pour 5 m et F=100dB. . . . .	48

4.4	Le SNR en fonction de fréquence Mmwave pour une distance de 5m. . . . .	50
4.5	Le SNR en fonction de fréquence Mmwave pour une distance de 50m. . . . .	51
4.6	Le SNR en fonction de fréquence Mmwave pour une distance de 500m. . . . .	51
4.7	Le SNR en fonction des fréquences THz pour une distance de 5 m. . . . .	53
4.8	Le SNR en fonction des fréquences THz pour une distance de 50 m. . . . .	53
4.9	Le SNR en fonction des fréquences THz pour une distance de 500 m. . . . .	54
4.10	Le SNR pour les distances [ 5 ,50]m, pour des liaisons en onde millimétrique et térahertz. . . . .	55
4.11	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 30GHz	57
4.12	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 0.43THz. . . . .	57
4.13	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 0.43THz 256*256. . . . .	58
4.14	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 0.43THz. . . . .	59
4.15	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 0.43THz avec 1024 * 256 antennes. . . . .	60
4.16	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 1.5THz. . . . .	61
4.17	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 1.5THz. . . . .	62
4.18	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 1.5THz. . . . .	62
4.19	Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 1.5THz avec 1024*256 antennes. . . . .	63

---

# LISTE DES TABLEAUX

1.1	La structure de la trame temporelle [9]. . . . .	11
2.1	Comparaison des indicateurs clés de performance de la 5G et de la nouvelle génération [32]. . . . .	20
3.1	Comparaison entre les technologie de communication sans fil. . . . .	43

---

# LISTES DES ABRÉVIATIONS

**1G** : **F**irst **G**eneration

**2G** : **S**econd **G**eneration

**3G** : **T**hird **G**eneration

**3GPP** : **3**rd **G**eneration **P**artnership **P**roject

**4G** : **F**ourth **G**eneration

**5G** : **F**ifth **G**eneration

**5G-NR** : **F**ifth **G**eneration **N**ew **R**adio

**AI** : **A**rtificial **I**ntelligence

**AMF** : **A**ccess and **M**obility **M**anagement **F**unction

**AR** : **A**ugmented **R**eality

**AUCF** : **A**uthentication **S**erver **F**unction

**BCI** : **B**egin **C**hahn **I**ndicator

**CDMA** : **C**ode **D**ivision **M**ultiple**A**ccess

**D2D** : **D**evice **2**to **D**evice

**Edge** : **E**nhanced data rates for **g**sm evolution

**eMBB** : enhanced **M**OBILE **B**roadBand

**eURLLC** : enhanced **U**ltra **R**eliable **L**ow **L**atency **C**ommunication**S**

**FEMBB** : **F**URTHER **E**NHANCED **M**OBILE **B**roadBand

**GEO** : **G**eostationary **E**quatorial **O**rbite

**GSO** : **G**eostationary **S**atellite **O**rbite

**HAP** : High Altitude Platform

**HetNets** : Heterogeneous Networks

**HT** : Holographic Telepresence

**IMT- 2020** : International Mobile Telecommunication

**IoE** : Internet of Everything

**IP** : Internet Protocol

**ISC** : Image Sensor Communication

**ITE** : International Telecommunication Union

**LAP** : Low Altitude Platform

**LDHMC** : Long Distance and High Mobility Communication

**LED** : Light Emitting Diode

**LEO** : Low Earth Orbit

**LoS** : Line of Sight

**LPN** : Low Power Nodes

**LTE** : Long Term Evolution

**Matlab** : MATrix LABoratory

**MC** : Molecular Communications

**MEO** : Medium Earth Orbit

**MIMO** : Multiple Inputs Multiple Outputs

**ML** : Machine Learning

**MLLMT** : Massive Low Latency Machine Type

**mMTC** : massive Machine Type Communication

**MR** : Mixed Reality

**MTC** : Machine Type Communications

**NG- RAN** : Next Generation Radio Access Network

**NGSO** : Non Geostationary Satellite Orbit

**NOMA** : Non Orthogonal Multiple Access

**OFDM** : Orthogonal Frequency Division Multiplex

**OWC** : Optical Wireless Communications

**PCF** : Policy Control Function  
**PRB** : Physical Resource Bloc  
**QoS** : Quality of Service  
**QUIC** : Quick UDP Interne Connections  
**RAN** : Radio Access Network  
**RB** : Resource Bloc  
**RF** : Radio Ffrequency  
**SDN** : Software Defined Networking  
**SCMA** : SparseCode Multiple Access  
**SCS** : Sub Carrier Spacing  
**SMF** : Session Managment Function  
**SNR** : Signal to Noise Ratio  
**TCP** : Transmission Control Protocol  
**THz** : Terahertz  
**UAV** : Unmanned Aerial Vehicle  
**UDM** : User Data Management  
**UDP** : User Datagram Protocol  
**UE** : User Equipment  
**UmMTC** : Ultra Massive Machine Type Communication  
**UPF** : User Plan Function  
**URLLC** : Ultra Reliable Low Latency CommunicationS  
**VLC** : Visible Ligh Converter  
**VR** : Virtual Reality  
**XR** : Extended Reality

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Aujourd'hui, l'utilisation des technologies de communication mobile est devenue très large, les réseaux de télécommunications sont confrontés à une grande hétérogénéité. Jusqu'à maintenant, chacune des générations (1G, 2G, 3G, 4G) de réseaux mobiles a été implémentée pour offrir l'utilisation des applications spécifiques. En effet, pour la 5G, ils apparaissent de nouveau type d'objets communicants à côté des utilisateurs cellulaires classiques, où ce qu'on appelle maintenant l'Internet des objets (IOT Internet Of Things). La cinquième génération à une multitude de fonctionnalités très avancées pour pouvoir résoudre plusieurs problèmes de notre vie quotidienne moderne. La 5G ne s'intéresse pas seulement aux besoins des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, mais elle ouvre aussi de nouvelles perspectives. Elle permet la coexistence d'applications et d'utilisations très diverses, dans une même technologie pour faciliter à une société complètement connectée. Cela permettra à tout le monde d'avoir un accès illimité aux informations et aux conversations virtuelles à tout moment, et en tout lieu pour tout le monde. Et il ne s'agit pas seulement d'appeler les gens, mais cela inclut également la possibilité de se connecter à tous les appareils et la disponibilité n'importe où, n'importe quand.

Alors que la 5G commence à se déployer sur plusieurs continents, les recherches sur les futures générations sont déjà menées dans les laboratoires et dans les entreprises concernées. L'objectif est d'atteindre 1 000 Gbit/s dans la gamme de fréquences du térahertz. Elle est élaborée avec de nouvelles technologies et des capacités de répondre aux futurs besoins de communication et aux exigences de performance et de fiabilité dans les services et applications à venir. Les futures générations vont apporter une révolution remarquable dans les technologies de communication, car elles permettront l'Internet de tout, et fourniront une qualité de service élevée et sophistiquée, par exemple la réalité virtuelle et la communication holographique, elle ne devrait y avoir aucune limitation de couverture au niveau du sol. Au lieu de cela, ils doivent fournir une couverture sous-marine et spatiale. Ils doivent permettre des caractéristiques d'intelligence artificielle (IA) plus élevée. Plusieurs techniques de communications sont présentées pour les futures générations telles que les techniques de communications par spectre (THz et VLC) et de nouveaux paradigmes de communication,

tels que la communication moléculaire et quantique. Ces techniques sont susceptibles d'améliorer considérablement les débits de données. Dans ce contexte, la communication térahertz qui utilise la bande de fréquence (0,1-10 THz) a commencé à faire l'objet d'une attention considérable dans le milieu de la recherche. La bande de fréquence THz promet une large bande passante, qui atteint théoriquement plusieurs GHz, ce qui se traduit par une capacité potentielle de l'ordre de plusieurs térabits par seconde.

Notre travail est constitué de quatre chapitres. Le premier chapitre donne un aperçu introductif sur la technologie 5G mobile, et son architecture ainsi les techniques utilisées dans cette génération. Ce réseau travaille sur l'augmentation du débit et gère un grand nombre de cas et des exigences d'utilisations, une connectivité 1000 fois supérieur à celle de 4G, une faible consommation d'énergie, une latence réduite. Pour atteindre ces exigences, la 5G utilise les ondes millimétriques (supérieure à 24 GHz) car, elles sont capables de fournir des bandes plus larges. Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous avons mis en évidence certains des nouveaux services et leurs catalyseurs technologiques qui devraient représenter le cœur des réseaux de prochaines générations, nous avons donc cité quelques techniques et technologies candidates pour les futures générations. Dans le troisième chapitre, nous avons étudié les techniques futures de communications, en particulier les techniques de communications par spectre (VLC et THZ), Le dernier chapitre traite la simulation des ondes Mmwave et des ondes térahertz pour des différentes distances, en calculant le SNR en fonction des différentes valeurs de fréquences.

---

---

# CHAPITRE 1

---

## GÉNÉRALITÉ SUR LES RÉSEAUX 5G

### 1.1 Introduction

Les réseaux mobiles ont connu une évolution très rapide, depuis leur apparition dans les années 1980. Nous sommes passés d'une génération à une autre avec une rapidité hallucinante. Un service initialement dédié exclusivement à la téléphonie, jusqu'à la mise en place de réseaux tout IP, favorisant des services et applications qui étaient considérés impossible il y a à peine vingt ans. La 5G est la technologie de communication mobile de la génération actuelle conçue pour fournir une plus grande capacité et des vitesses de données plus élevées que la génération précédente Long Term Evolution (LTE). Dans ce contexte, le premier chapitre est consacré à la présentation de la 5G, son objectif face aux précédentes générations des réseaux mobiles. Dans cette même partie, nous allons présenter l'architecture de la 5G et ses fréquences,ensuit nous allons détailler les technologies émigrantes pour le réseau 5G. Enfin, on s'intéressera à l'étude des différentes catégories d'usage de ce système de communications.

### 1.2 Évolution des réseaux mobile

La télécommunication mobile a connu une grande avancée dans les décennies passées, et cela, suite au besoin imminente de l'homme pour communiquer à travers les différentes

zones géographiques. Le parcours de cette évolution a débuté avec les systèmes analogiques puis s'est dirigé vers le numérique. Les réseaux mobiles sont bâtis selon une architecture de cellules qui permet d'utiliser les mêmes fréquences plusieurs fois sur un territoire. Depuis cinquante ans, plusieurs générations technologiques se sont succédé permettant de passer d'un service de communication téléphonique de voix et de transmission de message texte, à des services de données, d'internet mobile de très haut débit et des objets connectés[1].

- La première génération (1G) : les téléphones étaient analogiques et ont été les premiers téléphones mobiles ou cellulaires à être utilisés, ils offrent de très faibles niveaux d'efficacité et de sécurité.
- La deuxième génération (2G) : elle reposait sur la technologie numérique et offrait une bien meilleure efficacité à être utilisés ainsi qu'une meilleure sécurité et de nouvelles fonctionnalités telles que les messages texte et les communications à bas débit « 1G et 2G sont les technologies de téléphonie mobile, donnant finalement l'accès à la téléphonie mobile à tout le monde ».
- La troisième génération (3G) : le but de cette technologie était de fournir des données à haute vitesse, la technologie originale a été améliorée pour permettre des données allant jusqu'à 14 Mbps et plus.
- La quatrième génération (4G) : il s'agit d'une technologie entièrement IP capable de fournir des débits de données allant jusqu'à 1 Gbps .
- La cinquième génération (5G) de la téléphonie mobile sans fil est l'une des technologies les plus récentes dans le domaine des communications sans fil . Alors que la 5G entre dans la phase de déploiement commercial, les institutions de recherche dans le monde entier ont commencé à prêter attention au-delà de la 5G.

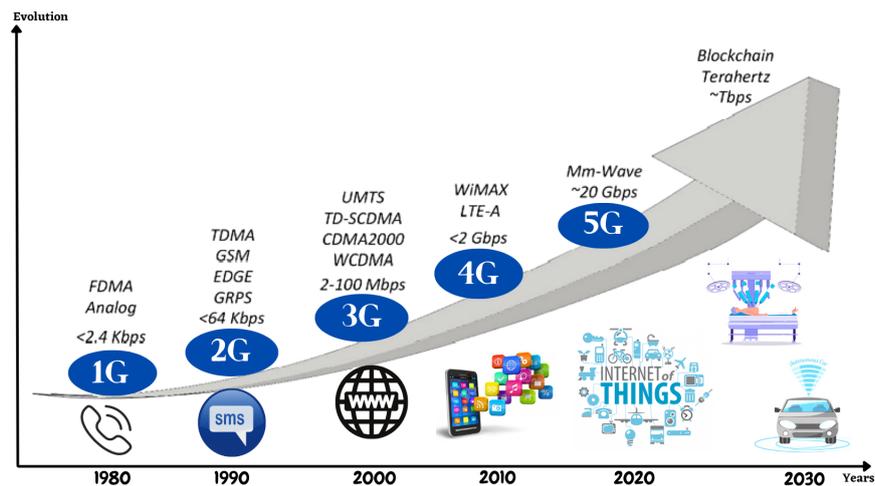


FIGURE 1.1 – l'évolution des réseaux mobiles[1].

### 1.3 Présentation de la cinquième génération 5G

La cinquième génération (5G) de la téléphonie mobile sans fil est l'une des technologies les plus récentes dans le domaine des communications sans fil. Cette technologie, qui a été réalisée en 2020, permet une latence ultra faible et une fiabilité ultra élevée, permettant ainsi des services innovants dans différents secteurs industriels. Plusieurs services d'application 5G ont été identifiés selon les normes de l'Union internationale des télécommunication (ITU : International Telecommunication Union) et le 3GPP (3rd Génération Partner hip Project). Ses services comprennent le haut débit mobile amélioré (eMBB : Enhanced Mobile Broadband), la communication massive de type machine (mMTC : Massive Machine- Type Communications), la communication à faible latence ultra-fiable (URLLC : Ultra-Reliable and Low Latency Communications)[2].

La 5G ne s'intéresse plus uniquement au monde des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, mais ouvre de nouvelles perspectives et permet la cohabitation d'applications et usages extrêmement diversifiés. Elle sera un élément clé de notre société hyper connectée. Afin de permettre la connectivité pour cette très large gamme d'applications, elle devra répondre à la croissance élevée du trafic et à la demande toujours plus importante de débit, ainsi qu'aux besoins de communications de haute fiabilité pour les applications critiques spécifiques comme pour les voitures autonomes. Elle devra également

supporter un nombre considérable de périphériques connectés avec une très faible latence.

## 1.4 L'objectif de la 5G

La 5G a cinq objectifs principaux, parmi lesquels l'augmentation de la vitesse et de la capacité des réseaux, mais aussi la préparation de l'événement majeur qu'est l'Internet des Objets, qui va nous permettre de construire un monde complètement connecté. Parmi les principaux objectifs [3] :

- De plus gros forfaits data : le volume de données devra être 1000 fois plus élevé.
- Un débit de 20Gbps : dix fois plus de débit alloué à chaque utilisateur et 20 fois plus de débit maximal.
- Un temps de latence plus court donne l'impression que le réseau est très réactif.
- plus d'antennes : le nombre de terminaux pouvant être connectés par antenne devra être 100 fois supérieur, mais le nombre d'antennes dépend surtout des fréquences utilisées.
- Plus de batterie, moins de consommation.

## 1.5 Architecture de la 5G

Les normes 3GPP qui sous-tendent l'architecture du réseau 5G ont été introduites par le projet de partenariat de troisième génération, l'organisation qui élabore des normes internationales pour toutes les communications mobiles. L'Union internationale des télécommunications et ses partenaires définissent les exigences et le calendrier des systèmes de communication mobile, en définissant une nouvelle génération environ tous les dix ans. Le 3GPP développe des spécifications pour ces exigences dans une série de versions. L'architecture de réseau de la technologie mobile 5G est bien meilleure que les architectures précédentes. Les réseaux à forte densité de cellules permettent de faire des bonds massifs en termes de performances. En outre, l'architecture des réseaux 5G offre une meilleure sécurité que les réseaux 4G LTE. Le réseau 5G (5G System) se compose d'un accès Radio (NG- RAN : Next Generation RAN) et d'un cœur réseau (5G Core)[4].

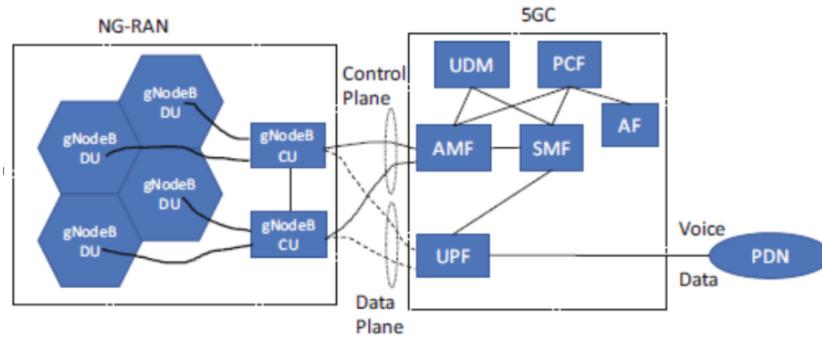


FIGURE 1.2 – L’architecture du réseau 5G [5].

Le NG-RAN représente le réseau d’accès radio nouvellement défini pour la 5G. Il fournit à la fois un accès radio NR et LTE. Un nœud NG-RAN (c’est-à-dire une station de base) est soit :

- Une gNB (c’est-à-dire une station de base 5G), fournissant des services de plan utilisateur et de plan de contrôle NR.
- Une gNB peut être constituée d’une gNB-CU (unité centrale) et d’une ou plusieurs gNB-DU (unité de distribution).
- Une gNB-CU et les unités gNB-DU sont connectées avec l’interface logique F1.
- Une gNB-DU est connectée à une seule gNB-CU.

NG, Xn et F1 sont des interfaces logiques [4].

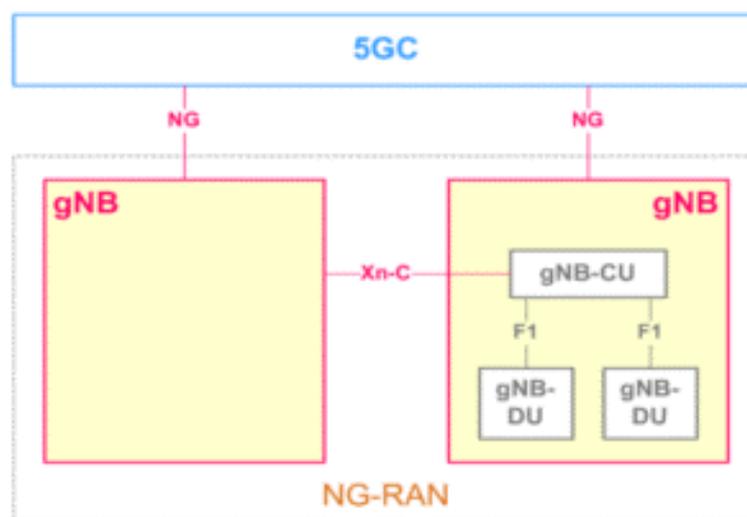


FIGURE 1.3 – Architecture 5G NG-RAN [6].

L'architecture réseau 5GC (5G Core) offre de nombreuses fonctions, notamment le découpage du réseau pour répondre aux différentes exigences des clients. Il fournit un cloud distribué, SDN (Software Defined Networking) et NFV (Virtualisation des fonctions réseau).

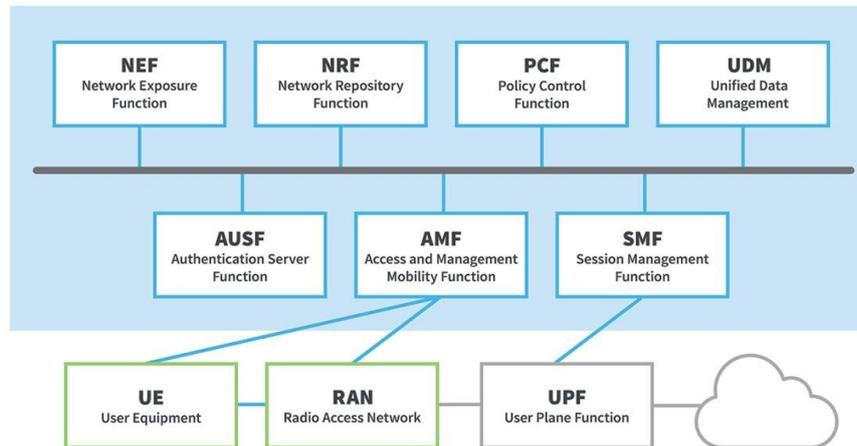


FIGURE 1.4 – L'architecture du cœur de la 5G (5GC Core) [7].

Les éléments de la 5GC et leurs fonctions :

- La fonction de gestion de l'accès et de la mobilité (AMF) (Access and Mobility Management Function) fait office de point d'entrée unique pour la connexion de l'UE.
- L'entité SMF (Session Management Function) permet de contrôler les sessions PDN, elle est responsable de la gestion du plan de contrôle.
- La fonction de plan d'utilisateur (UPF : User Plane Function) transporte le trafic de données IP entre l'équipement utilisateur (UE : User Equipment) et les réseaux externes.
- La fonction de serveur d'authentification (AUSF : Authentication Server Function) permet à l'AMF d'authentifier l'UE et d'accéder aux services du noyau 5G.
- D'autres fonctions telles que la fonction de contrôle de politique (PCF : Policy Control Function), la fonction d'application (AF) et la fonction de gestion unifiée des données (UDM : User Data Management) fournissent le cadre de contrôle de politique, en appliquant les décisions de politique et en accédant aux informations d'abonnement, pour régir le comportement du réseau [4].

## 1.6 Allocation des fréquences

La 5G est conçue pour fonctionner sur des fréquences radio allant de moins de 1 GHz à des fréquences extrêmement élevées, appelées "ondes millimétriques" (ou mmWave). Plus la fréquence est basse, plus le signal peut voyager loin. Plus la fréquence est élevée, plus le signal peut transporter plus de données.

Trois bandes de fréquences sont au cœur des réseaux 5G :

- La 5G à large bande (mmWave) offre les fréquences les plus élevées de la 5G. Celles-ci vont de 24 GHz à environ 100 GHz. Comme les hautes fréquences ne peuvent pas se déplacer facilement à travers les obstacles, la 5G à haute bande est de courte portée par nature. En outre, la couverture mmWave est limitée et nécessite davantage d'infrastructures cellulaires.
- La bande intermédiaire 5G fonctionne dans la gamme 2-6 GHz et fournit une couche de capacité pour les zones urbaines et suburbaines. Cette bande de fréquences présente des débits de pointe de plusieurs centaines de Mbps.
- La bande basse 5G fonctionne en dessous de 2 GHz et offre une large couverture. Cette bande utilise le spectre qui est disponible et utilisé aujourd'hui pour la 4G LTE, fournissant essentiellement une architecture LTE 5G pour les appareils 5G qui sont prêts maintenant. Les performances de la 5G à bande basse sont donc similaires à celles de la 4G LTE, et supportent l'utilisation pour les appareils 5G sur le marché aujourd'hui[8].



FIGURE 1.5 – Allocation des fréquences [4].

## 1.7 Structure de la trame radio

Dans le domaine temporel, les transmissions de la couche physique sont organisées en trames radio. Une trame radio à une durée de 10 ms. chaque trame radio est divisée en 10 sous- trames d’une durée de 1 ms. Chaque sous-trame est composé des slots. Le nombre de slot par sous-trame dépend de l’espacement entre sous-porteuses. L’interface radioélectrique 5G-NR utilise la modulation OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiollex) La modulation OFDM est une modulation qui exploite le domaine fréquentiel (nombre de sous- porteuses) et le domaine temporel (durée d’un symbole).

Pour la 5G, on définit [9] :

- Dans le domaine fréquentiel, un bloc de ressource RB (Resource Bloc) est constitué de 12 Resource Elements (REs).
- REs, c’est la plus petite unité de la grille de ressources composée d’une sous-porteuse dans le domaine fréquentiel.
- Dans le domaine temporel, un slot correspond à 14 symboles consécutifs(voir la figure 1.7).

L’espacement entre sous-porteuses SCS (SubCarrier Spacing) est défini par la formulation suivante :  $SCS=2\mu*15$  kHz, avec  $\mu$  la numérologie.

Numérologie	SCS	Nombre de symbole par slot	Nombre de slot par sous-trame	Nombre de symbole par sous-trame	la durée d'un slot
0	15KHz	14	1	14	1ms
1	30KHz	14	2	28	0.5ms
2	60KHz	14	4	56	0.25ms
3	120KHz	14	8	112	0.125ms
4	240KHz	14	16	224	0.0625ms

TABLE 1.1 – La structure de la trame temporelle [9].

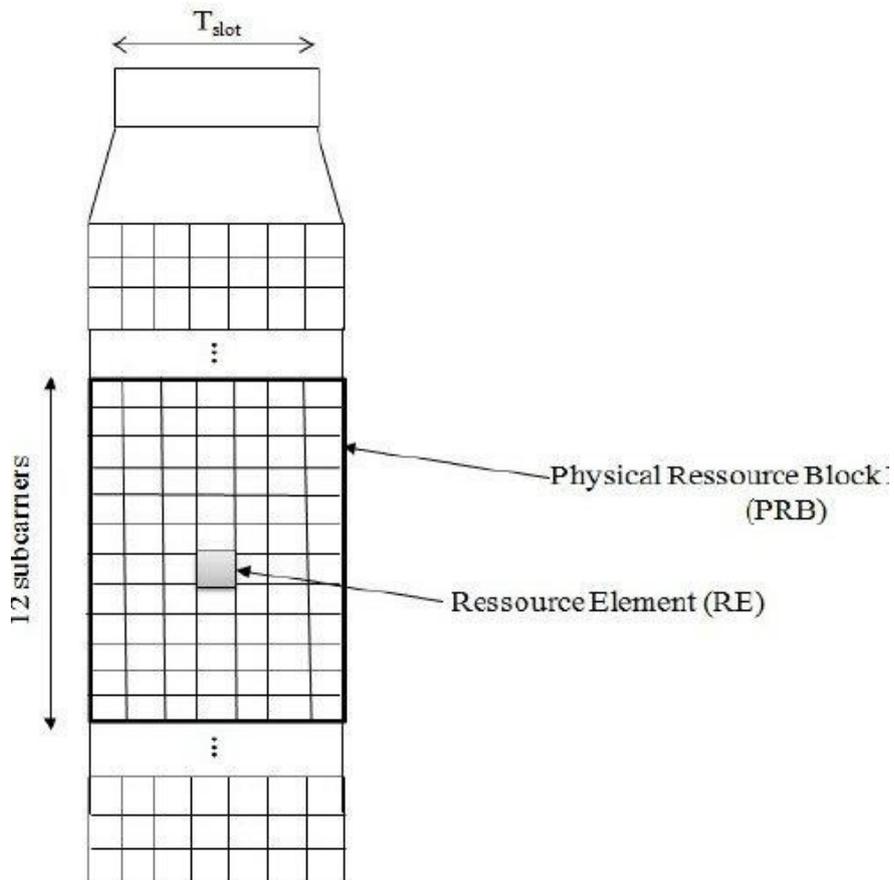


FIGURE 1.6 – Physical resource block [10]

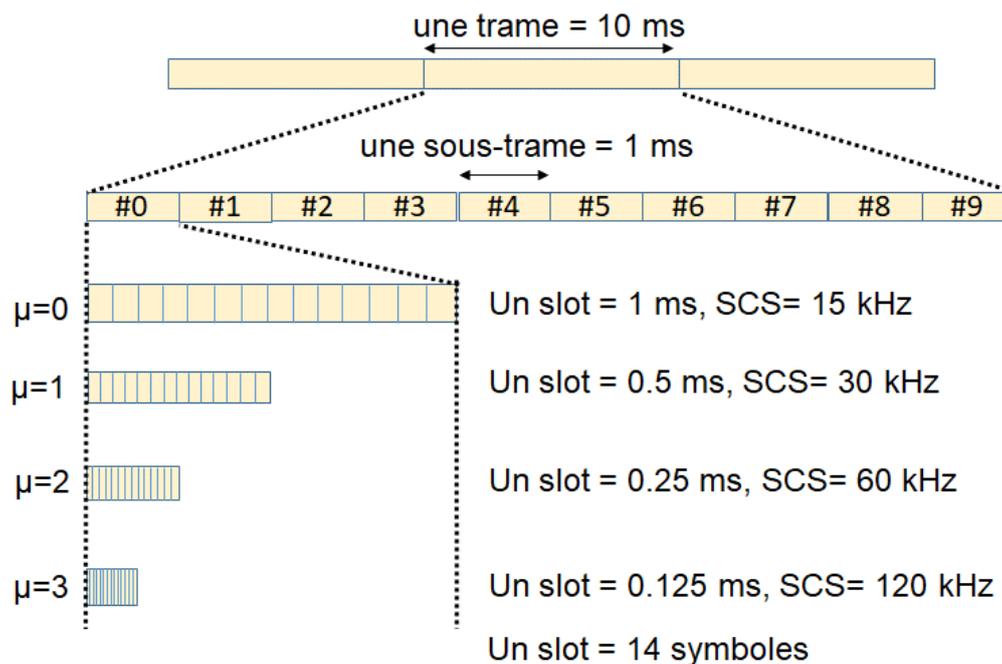


FIGURE 1.7 – La trame temporelle 5G-NR [9].

## 1.8 Technologies émergentes pour réseaux 5G

### 1.8.1 Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs)

Cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « intelligentes », situées sur le même panneau (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquences supérieures à 6 GHz). L'attrait de l'utilisation du massive MIMO est double [11] : d'une part, cette technologie permet d'augmenter les débits, grâce au multiplexage spatio-temporel ; d'autre part, elle permet de focaliser l'énergie sur un terminal, pour améliorer son bilan de liaison, grâce à la formation de faisceau, ou beamforming.

La technologie MIMO est déjà présente dans la 3G et 4G. Dans la 5G, cette technologie a évolué (technologie massive MIMO) et consiste à déployer de nouveaux types d'antennes composées de centaines d'émetteurs-récepteurs miniaturisés qui permettent d'atteindre de hauts débits et une grande capacité de transmission en créant des faisceaux directifs d'onde radio (beamforming), en les orientant et en les contrôlant. Les différents canaux ou connexions utilisant conjointement plusieurs bandes de fréquences permettent d'envoyer et recevoir plus

de données simultanément, ce qui optimise la transmission radio entre les différents émetteurs de l'antenne et leurs cibles (le terminal, smartphone, etc.) respectives et limite les interférences.

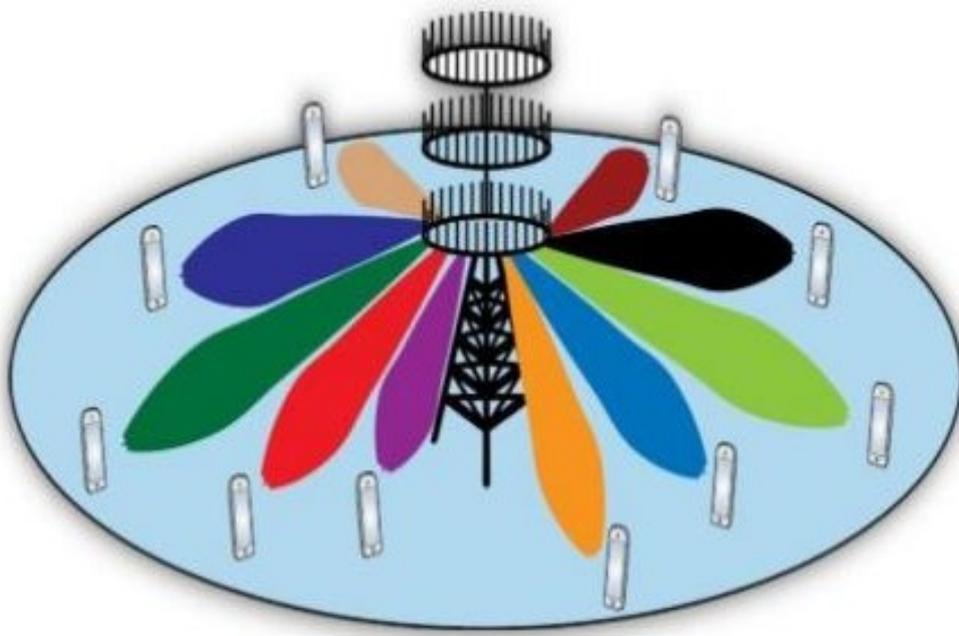


FIGURE 1.8 – MIMO massive [12].

### 1.8.2 Bandes millimétriques

On parle des fréquences supérieures à 6 GHz qui n'ont encore jamais été pris pour l'implémentation des réseaux mobiles pour des raisons technologique et de qualité de propagation. Pour répondre à l'augmentation des débits de transmission et des volumes de données à transmettre, il faut offrir de telles réserves de spectre, et leur utilisation nécessite le développement de toutes les technologies nécessaires comme la miniaturisation à faible coût et avec une faible consommation d'énergie pour être compatible avec les terminaux portables (amplificateur, codeur, traitement de signal, antenne...). En particulier, la communication par onde millimétrique peut être utilisée pour une couverture extérieure pour des réseaux à haute densité telle que la portée allant jusqu'à 200 à 300 mètres (micro cellules). Chacune des cellules aura une couverture réduite, ce qui nécessitera l'implémentation de la technique de " beamforming " [11]. .

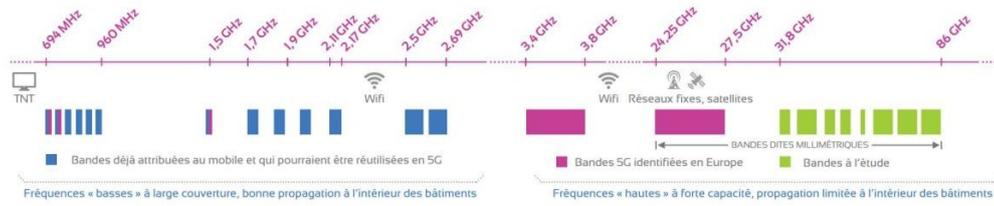


FIGURE 1.9 – bandes de fréquence [13]

### 1.8.3 Beamforming

Le beamforming permet de constituer des faisceaux très directifs vers les terminaux ce qui assure une utilisation plus efficace de l'énergie. Plus précisément, lors de la transmission, la focalisation du faisceau offre la capacité de concentrer l'énergie émise par le canal radio vers un récepteur spécifique. En ajustant la phase et l'amplitude des signaux transmis, il est possible d'obtenir une addition constructive des signaux correspondants au niveau du récepteur du smartphone ou terminal, ce qui augmente la puissance du signal reçu et donc le débit de l'utilisateur final. De même, lors de la réception, le beamforming assure la capacité de collecter l'énergie du signal d'un émetteur spécifique [8].

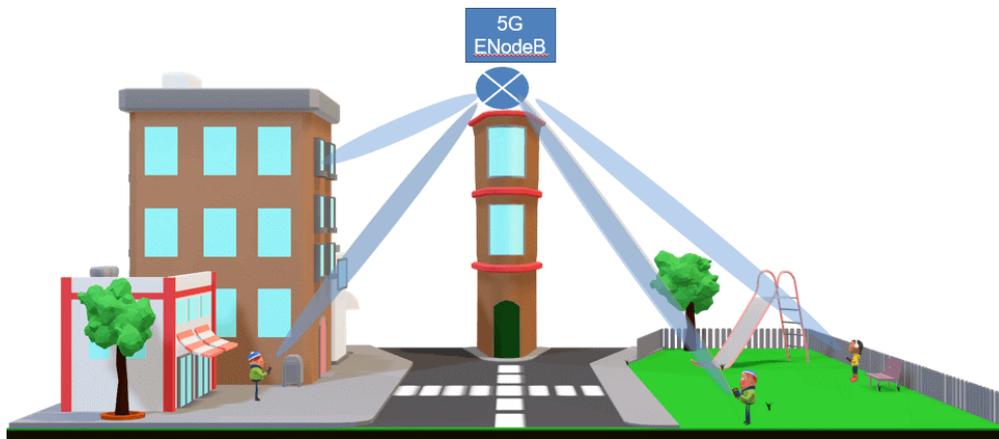


FIGURE 1.10 – Beamforming [14].

### 1.8.4 Les réseaux hétérogènes

Dans les systèmes de télécommunications, un réseau homogène renvoie à l'utilisation d'un réseau RAN (Radio Acces Network) standard composé uniquement de stations de base de type macrocellule . Cependant, si le RAN est constitué de différents types de stations de base (BSs), tels que des macrocellules et différents types de petites cellules, on parle dans ce cas de réseau hétérogène. De récents travaux sur le déploiement des Small cells considèrent les réseaux hétérogènes comme un moyen crucial face à la demande croissante de trafic de données [15]. Le concept de cette technologie repose sur un mélange des cellules de tailles différentes (macro, micro, pico et/ou femto) dans le but d'accroître la proximité entre les cellules et les terminaux mobiles. Considérée comme une solution attrayante pour les réseaux 5G le réseau hétérogène a été largement détaillé dans le Release 12 de la normalisation 3GPP [16]. La mise en œuvre nécessitera une combinaison d'une variété de petites cellules relais avec des niveaux de puissance différents sous la couverture d'une macrocellule. Dans le but de produire un meilleur service de qualité et d'efficacité énergétique, la gestion du changement de cellule va entraîner des contraintes en temps réel, ce qui n'est pas tolérable avec l'arrivée des voitures autonomes. Les opérateurs seront donc obligés de trouver de nouvelles méthodes de prédiction de la mobilité afin de résoudre ce problème de Hanover.

### 1.8.5 Multiplexage NOMA (Non Orthogonal Multiple Access)

LTE utilise un multiplexage dit orthogonal, chaque terminal utilisant, de manière unique, une partie des fréquences à un instant donné (ressource blocks). Pour améliorer l'efficacité spectrale de la 5G, par rapport à la 4G, des méthodes de multiplexage non orthogonales, c'est-à-dire que plusieurs utilisateurs peuvent recourir aux mêmes fréquences au même moment, sont envisagées. La discrimination entre plusieurs utilisateurs peut se faire en attribuant des codes différents à chaque utilisateur (SCMA, sparse code multiple Access, combinaison du CDMA, code division multiple Access, de la 3G et de l'OFDMA, orthogonal fréquence division multiple Access, de la 4G) ou en jouant sur la différence des niveaux du rapport signal sur bruit des différents utilisateurs (power Domain NOMA , illustré ci-dessous). Ce sont les deux modes privilégiés pour NR.

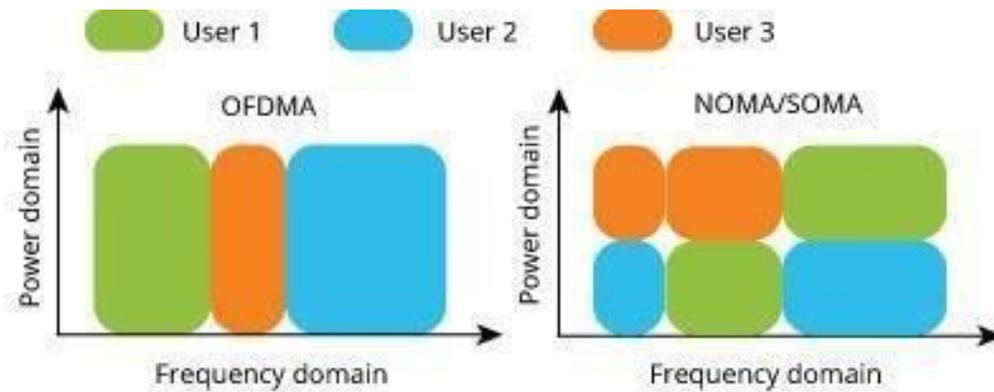


FIGURE 1.11 – Concept de technologie d'accès multiple non orthogonal (NOMA)[11]

## 1.9 Affectation des application aux différentes exigences

Trois grandes catégories d'usages (définies par l'UIT, sous le terme IMT- 2020), avec leurs exigences respectives et potentiellement incompatibles entre elles, sont en train d'émerger et permettraient de répondre aux besoins métier [17][18][19] :

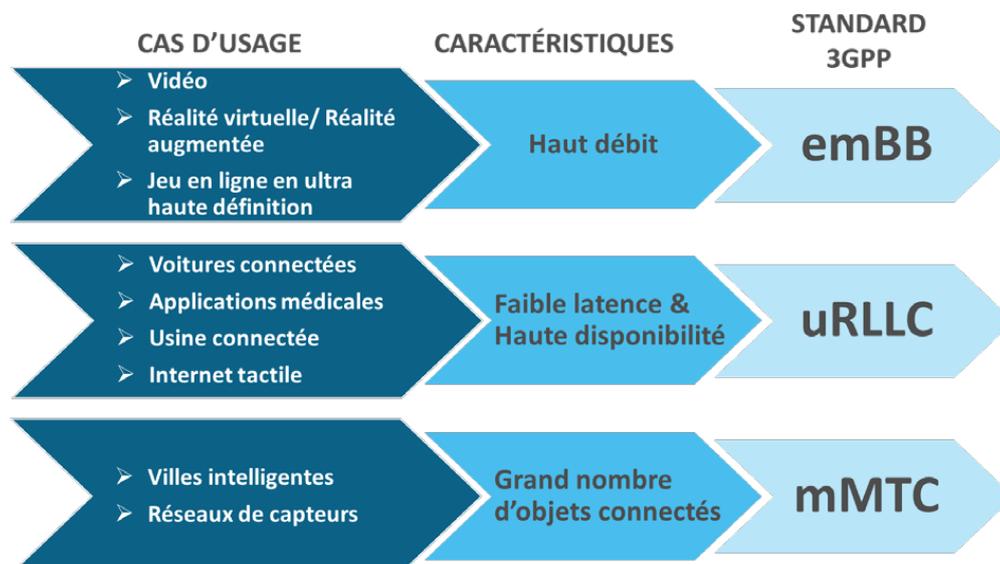


FIGURE 1.12 – Slices standardisées de la 5G, caractéristiques et cas d'usage de la 5G[20].

### **1.9.1 Large bande mobile améliorée (emBB : Enhanced Mobile Broadband)**

L'eMBB : c'est à-dire des communications mobiles ultra haut débit. Cet usage se trouve dans la continuité des précédentes générations de téléphonie mobile et permet de répondre à l'augmentation exponentielle de l'utilisation des données mobiles. Les applications de cette catégorie sont typiquement des flux vidéo de qualité de plus en plus grande et aussi des applications de réalité virtuelle et augmentée. L'objectif est donc de pouvoir répondre à une demande toujours plus grande en termes de quantité de données et de vitesse de transfert.

### **1.9.2 Communications massives de type machine (mMTC : Massive Machine- Type Communications)**

Le mMTC : les communications entre objets. L'internet des objets rentre dans cette catégorie. Il s'agit dans cette catégorie de pouvoir gérer un nombre très important de connexions (jusqu'à un million par kilomètre carré). La quantité de données à transmettre par communication est en général limitée et la rapidité de transfert peu contraignant. Un domaine d'application typique pour la ville intelligente avec des réseaux de capteurs pour gérer différents services.

### **1.9.3 Communication ultra-faible à faible latence (uRLLC : Ultra-Reliable and Low Latency Communications)**

L'URLLC : c'est-à-dire les communications dites critiques, pour lesquelles la fiabilité et le temps de réponse sont primordiaux. L'application phare de cette catégorie est le véhicule autonome, mais les communications des services de sécurité et d'urgence sont également concernées. Il ne doit pas y avoir d'échec ou de coupure de communication et la transmission doit être le plus rapide possible.

## 1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur la technologie 5G, après avoir rappelé les objectifs du standard 5G, ainsi que son architecture et ses catégories d'usages, nous avons également présenté les différentes technologies. Chacune d'elles présente d'énormes avantages, mais aussi des limites.

---

---

## CHAPITRE 2

---

# LA NOUVELLE GÉNÉRATION DES RÉSEAUX MOBILES

### 2.1 Introduction

Alors que la 5G est en cours de déploiement au niveau mondial, les laboratoires, les entreprises télécoms ont commencé à regarder au-delà de la 5G. La future génération devrait être plus performante, intelligente, fiable, évolutive et économe en énergie pour répondre à toutes les attentes qui ne peuvent pas être réalisées avec la 5G, elle est également tenue de répondre à toute nouvelle exigence.

Ce chapitre décrit plusieurs défis techniques et les opportunités qui existent pour les applications de communication et de détection sans fil, et aussi présenté les visions et exigences pour la nouvelle génération, ensuite, on a passé aux applications de cette dernière, puis nous allons présenter l'architecture proposé par le groupe FG NET-2030 pour les réseaux futurs.

### 2.2 Présentation de la nouvelle génération

Bien que la nouvelle génération de réseau sans fil soit en cours d'analyse, elle est déjà considérée comme le successeur de la technologie 5G et devrait la dépasser sur tous les

plans, avec une transmission de données plus élevée et une latence de 0.1 ms, ce qui assurera un meilleur contrôle des réseaux, permettant des vitesses de transmission de données plus élevées, atteignant la gamme des Tbps, qui seront nécessaires pour certaines applications telles que la vidéo tridimensionnelle (3D) de haute qualité, la réalité virtuelle (VR) , où les bandes de fréquences térahertz (THz) et optiques peuvent être les bandes candidates, face aux grands ensembles de données générés par l'utilisation de réseaux extrêmement hétérogènes. le tableau suivant présente de nombreux avantages qui sont attendus par rapport au réseau 5G.

<b>KPI(indicateur clé de performance)</b>	<b>5G</b>	<b>La nouvelle génération</b>
capacité de trafic de la zone	10Mbps/m <sup>2</sup>	1-10Gbps/m <sup>3</sup>
Débit maximale de données	20 Gbps	1 Tbps
Bande passante maximale	1Ghz	100Ghz
Densité de connexion	10 <sup>6</sup> appareils/km <sup>2</sup>	10 <sup>7</sup> appareils/km <sup>2</sup>
Latence	1 ms	0.1 ms
Fiabilité (taux d'erreur de trame)	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-9</sup>
Energie/bit	NS	1pJ/bit
Mobilité	500 km/h	1000km/h
Précision de la localisation	10cm sur 2D	1cm sur 3D

TABLE 2.1 – Comparaison des indicateurs clés de performance de la 5G et de la nouvelle génération [32].

## 2.3 Vision et Exigences

Cette section englobe les différentes exigences, qui sont adoptées à partir de diverses études. Elle explique également comment les exigences de nouvelle génération peuvent être améliorées par rapport aux réseaux existants. Chaque exigence est ensuite suivie de plusieurs applications.

### 2.3.1 Haut débit mobile encore amélioré (FEMBB)

FEMBB (Further Enhanced Mobile Broadband) est une évolution continue du haut débit mobile amélioré (eMBB), qui peut améliorer considérablement le haut débit, la capacité du réseau et le taux de transmission, dans les zones densément peuplées, y compris les transports publics (tels que les trains à grande vitesse et les villes intelligentes). FeMBB prendra en charge de nombreuses applications multimédias ultra-haute définitions telles que les jeux vidéo 4D et la télévision mobile [20].

### 2.3.2 Communication de type machine ultra-massive (UmMTC)

UmMTC (Ultra-massive Machine-Type Communication) est l'évolution continue de communication massive de type machine (mMTC). Cependant, au-delà des réseaux 5G, une architecture UmMTC peut potentiellement prendre en charge une connectivité fiable à une échelle massive de réseaux [21]. L'UmMTC permettra plusieurs applications clé, notamment l'Internet des objets (IoT), les bâtiments intelligents, la logistique et la gestion de flotte [22].

### 2.3.3 Communication à faible latence extrêmement fiable (eURLLC)

eURLLC (enhanced Ultra Reliable Low-Latency Communication) est l'évolution continue des communications ultra-fiables à faible latence (URLLC) Cependant, d'ici 2030, les innovations auront besoin d'une ultra-fiabilité extrêmement élevée, non seulement dans le MTC, mais également dans plusieurs autres communications, telles que la communication appareil à appareil, le Wifi, l'appareil à cloud, etc. La communication (eURLLC) permettra plusieurs applications telles que la télémédecine, XR, la révolution de l'Internet des soins de santé. Toutes ces applications exigent une communication ultra-fiable et une faible latence [23].

### 2.3.4 Communication à très faible puissance

Plusieurs applications nécessiteront des communications à très faible puissance, cependant, les applications prometteuses sont actuellement les maisons intelligentes, les voitures intelligentes, les drones, ... [24].

### 2.3.5 Communication longue distance et haut mobilité (LDHMC)

Dans les grands réseaux, la communication longue distance et haute mobilité (LDHMC) sont indispensables [25]. elle est basés sur la 5G peuvent ne pas être suffisants pour les applications futures, car ils peuvent nécessiter des communications à longue portée sur des milliers de kilomètres et peuvent nécessiter une mobilité transparente. De nombreuses applications passionnantes sont les voyages dans l'espace, le tourisme en haute mer, le transport à grande vitesse [26].

### 2.3.6 Haute efficacité du spectre

Un grand nombre d'appareils ou d'objets intelligents devraient connaître une croissance exponentielle dans les réseaux de nouvelle génération [27], surtout dans le domaine des milliers d'appareils intelligents, y compris les machines, les équipements, les capteurs. Cela conduira au déploiement de nouvelles technologies dans le domaine de la nouvelle génération, telles que les bandes THz, qui peuvent répondre aux exigences des applications basées sur le réseau avec une efficacité spectrale élevée [28].

### 2.3.7 Capacité de trafic en zone élevée

La capacité de trafic de zone correspond au débit total de trafic desservi par zone géographique (bit/s/m<sup>2</sup>) [29], il est largement prévu que la 5G puisse permettre une capacité de trafic de 10 Mbps par mètre carré dans les zones de hotspots dédiées. Cependant, les applications telles que le multimédia nécessiterait une capacité de trafic élevée et cela pourrait ne pas être pris en charge par les communications 5G actuelles. Par conséquent, la future génération doit fournir dix fois la capacité de trafic de zone de la 5G [30].

### 2.3.8 Communication massives de type machine à faible latence (MLLMT)

La communication massive ultra-fiable à faible latence ou MLLMT combine les caractéristiques de mMTC et URLLC, ce qui facilitera le déploiement des capteurs et d'actionneurs massifs dans les industries verticales. MLLMT permettra plusieurs applications telles que

l'automatisation des maisons et des bâtiments, l'intégration des ressources énergétiques distribuées avec les centrales énergétiques, les systèmes de véhicules sans pilote, les infrastructures de santé compatibles avec IoT [31].

## 2.4 Les applications de la nouvelle génération

Les applications compatibles avec la 5G seront en effet au cœur de la future génération, même à plus grande échelle (supportant d'énormes réseaux de grande taille tels que les villes sécurisées). Les applications suivantes seront décrites dans ce qui suit.

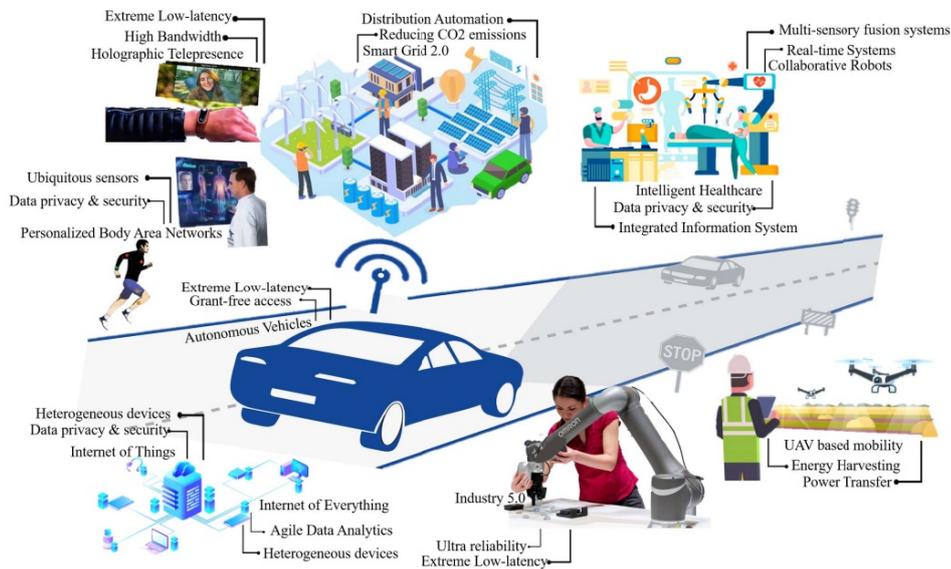


FIGURE 2.1 – Certaines Applications envisagées pour la nouvelle génération[31].

### 2.4.1 Réalité étendue (XR)

La nouvelle génération offrira la réalité augmentée (AR), la réalité virtuelle (VR) et la réalité mixte (MR) dans les systèmes de communication[32]. La XR est une technologie immersive émergente qui fusionne les mondes physiques et virtuels. Ces fonctionnalités combineront l'intelligence artificielle et les objets 3D pour fournir des exigences perceptives pour la cognition, l'informatique, le stockage, la physiologie et les sens humains. Les technologies généreront des sensations réalistes et reproduiront des environnements réels pour créer des visualisations et des atmosphères permettant d'interagir en temps réel [33],[34]. AR, VR,

MR, XR utilisent différents capteurs pour collecter des données concernant l'emplacement, l'orientation et l'accélération. Cela nécessite une connectivité forte, des débits de données extrêmes, une haute résolution et une latence extrêmement faible, ce qui devrait être facilité par la nouvelle génération.

### 2.4.2 La robotique connectée et les systèmes autonomes (CRAS)

La nouvelle technologie sans fil déploiera des robots connectés et des systèmes autonomes pour changer les modes de vie quotidienne. Le déploiement de l'application CRAS a été le principal facteur à l'origine du mouvement de future génération [32]. Les CRAS intègrent les systèmes de livraison de véhicules volants, les voitures autonomes, les essaims de drones, les pelotons de véhicules et la robotique autonome [35]. Ces applications ne sont pas un autre service IoT à liaison montante, comme de nombreuses applications introduites dans la 5G. Cependant, elles requièrent des exigences strictes en matière de la latence et un débit extrêmement élevé.

### 2.4.3 Internet Of Everything (IOE)

L'IOE est une version étendue de l'IoT qui inclut, les choses, les données, les personnes et les processus [37]. Le concept principal de l'IOE est d'intégrer divers dispositifs de détection qui peuvent être liés à "tout" pour identifier, surveiller l'état et prendre des décisions de manière intelligente afin de créer de nouvelles perspectives. Les capteurs de l'IOE sont capables d'acquérir de nombreux paramètres tels que la vitesse, la position, la lumière, les signaux biologiques, la pression et la température. Ces capteurs sont utilisés dans des applications allant des systèmes de santé, des villes sécurisées, au divers domaines industriels. On s'attend à ce que la nouvelle génération devienne un élément clé de l'IOE, car elle nécessite la capacité de connecter  $N$  dispositifs intelligents, où  $N$  est évolutif et peut atteindre des milliards. De plus, l'IOE aura besoin de débits de données élevés pour prendre en charge facilement  $N$  dispositifs avec une faible latence.

#### 2.4.4 Téléprésence holographique

HT peut projeter des images tridimensionnelles (3D) réalistes, en plein mouvement et en temps réel de personnes et d'objets distants avec un niveau élevé de réalisme rivalisant avec la présence physique [37]. Il peut être utilisé pour la visioconférence 3D en mouvement complet et la diffusion d'actualités ou des applications de type TED Talk[38],[39]. HT capture des images de personnes et d'objets environnants, qui sont compressés et transmis sur un réseau à large bande, en l'étape initiale. Plus tard, les informations transmises sont décompressées côté récepteur et projetées à l'aide de faisceaux laser [37]. HT aide à minimiser les coûts des déplacements professionnels et permet aux gens d'apparaître dans de nombreux endroits simultanément, tandis que le contenu tactile et interactif est un facteur clé pour engager le public. D'un autre côté, il existe des obstacles à l'adoption de la technologie HT. Une latence ultra faible (1 ms) et un débit de données élevé de 10 Gbps sont quelques-uns des principaux défis partiellement couverts par la 5G. Pour une expérience immersive complète sans interruption, la nouvelle génération avec une latence de 0,1 ms et des débits de données de plusieurs Gbit/s est requise [38]. RTC nécessite également une latence ultra-faible pour une véritable immersion et une synchronisation de haute précision sur des faisceaux massifs de flux interdépendants pour la reconstruction des hologrammes.

#### 2.4.5 Interactions Cerveau-ordinateur sans fil (BCI)

Il s'agit d'un processus d'une voie de communication directe entre le cerveau et les appareils externes par la transmission des signaux du cerveau à un appareil numérique qui analysera et interprétera les signaux en actions. Les futures générations contribueront au développement de ces systèmes BCI pour améliorer la vie intelligente. Ces applications requièrent des exigences strictes (telles que des débits de données élevés, une latence ultra-faible et une grande fiabilité) comme XR. Cependant, les applications BCI sont beaucoup plus sensibles que le XR, et la QoPE doit être assurée.

### 2.4.6 Industrie 5.0

L'industrie 5.0 fait référence aux personnes qui travaillent aux côtés des robots et des machines intelligentes afin d'ajouter une touche humaine aux piliers de l'industrie 4.0 que sont l'automatisation et l'efficacité [40]. Les moteurs de l'avenir seront basés sur l'IoE, car un nombre considérable d'objets dans ce type d'industrie seront connectés par câbles ou sans fil. Le cloud computing/edge computing, le big data, l'IA, l'IoE devraient être les principales technologies habilitantes de l'industrie 5.0 [41]. En particulier, un grand nombre de choses dans l'industrie 5.0 sont connectées à l'aide de technologies filaires ou sans fil pour fournir diverses applications et services qui sont activés par une intégration complète du cloud/edge computing, du big data et de l'AI.

### 2.4.7 Soins de santé intelligents

La nouvelle génération jouera un rôle essentiel dans les systèmes de santé médicaux pour construire de meilleurs soins de santé. Des innovations telles que l'holographie, l'IA et l'informatique périphérique mobile seront intégrées dans les systèmes de santé pour aider même dans la chirurgie à distance et le transport de vastes volumes d'informations médicales pour améliorer la qualité des soins. Grâce aux progrès récents des capteurs et dispositifs informatiques portables, il est possible de surveiller et de mesurer les données de santé en temps réel. Les données de détection collectées à partir des dispositifs portables peuvent être préparées par le nœud de périphérie le plus proche, puis envoyées aux médecins pour un diagnostic à distance. De plus, avec la réalisation des communications holographiques, de l'Internet tactile et des robots intelligents en réseau futur, le médecin peut effectuer l'opération à distance. Une telle téléchirurgie supprimerait la nécessité d'opérations sur place et éviterait les risques causés par la propagation des virus, surtout en présence d'épidémies, telles que Corona virus-19 et autres maladies transmissibles (voir fig 2.2).

### 2.4.8 Mobilité par UAV

UAV Peuvent fournir des solutions efficaces et efficaces pour le développement des villes intelligentes. Ils ont été largement utilisés dans des applications défense et attaques militaires,

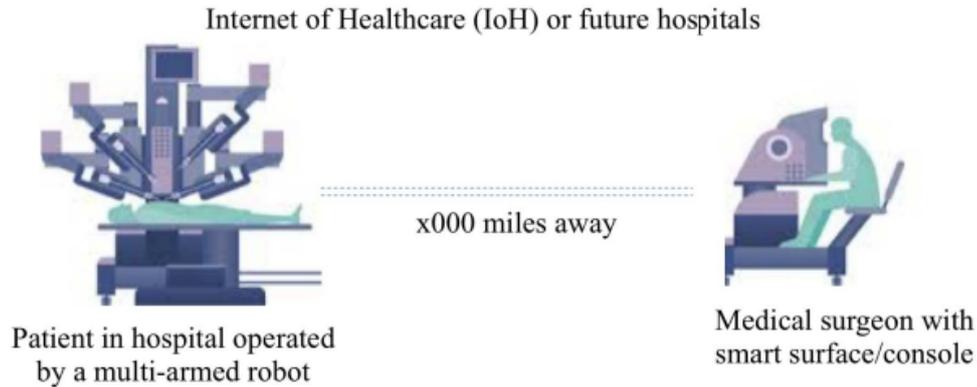


FIGURE 2.2 – Application pour soins de santé en nouvelle génération [42].

tels que les avions télécommandés, les drones autonomes, et autres [43]. Les défis de la communication réseau et de la sécurité dans les réseaux UAV sont explorés par des organismes de recherche du monde entier, mais de nombreux défis restent encore non résolus, comme les applications sensibles et liées à l'utilisateur final. Au fil des années, les applications des drones ont été étendues dans le domaine militaire et civil. Par exemple, les drones ont été proposés pour les secours en cas de catastrophe, la protection des plantations agricoles, la surveillance du trafic et la détection environnementale [44]. On s'attend également à ce que les drones soient un module essentiel pour les futures technologies sans fil, qui prend en charge la transmission de données à haut débit pour les communautés vivant à distance, faisant face à des situations de catastrophe telles que des tremblements de terre, attaques terroristes, et en l'absence d'infrastructure cellulaire typique. Les principales caractéristiques associées aux drones par rapport à l'infrastructure fixe sont les suivantes : facilité de déploiement, connectivité en ligne de visée (LoS) et surtout, une mobilité contrôlée[45][46]. Le développement rapide des technologies UAV va permettre de développer des nouveaux domaines tels que la logistique automatisée et les opérations militaires.

## 2.5 Architecture de réseau future

Les réseaux futurs promettent une connectivité sans fil économe en énergie et socialement transparente à l'échelle mondiale, tandis que les architectures de réseau existant ne sont pas capables de prendre en charge les exigences des futures applications telles qu'un débit ultra-

élevé, latence et fiabilité ultra-faible. C'est la raison pour laquelle des études prospectives sur des futurs réseaux sont nécessaires. FG NET-2030 crée un sous-groupe pour développer l'architecture de réseau future 2030. Mais il n'est pas réaliste de dire précisément ce que sera l'architecture future du réseau. Ce dernier trouve un compromis : interpréter l'architecture depuis différentes dimensions, plutôt que de définir un cadre unifié. Dans cette section, nous introduisons les modifications architecturales liées à la nouvelle génération à partir de trois dimensions.

### 2.5.1 De la couverture terrestre à la couverture omniprésente

L'un des objectifs de l'architecture de réseau de la prochaine génération est d'élargir l'étendue et la profondeur de la couverture des communications. L'architecture de réseau actuelle basée sur l'infrastructure cellulaire terrestre existante présente les deux inconvénients suivants : incapacité à répondre aux scénarios de communication à haute altitude et en haute mer, ce qui est une exigence inévitable pour les services futurs ; un coût d'approvisionnement prohibitif pour les réseaux cellulaires denses afin de fournir une connectivité à l'échelle mondiale. Afin de couvrir les inconvénients ci-dessus, la nouvelle génération intégrera des réseaux non-terrestres pour fournir une couverture sans fil complète [48]. Une première vision de l'intégration de la communication Espace-Air-Sol-Mer. Il existe 4 niveaux dans la couverture omniprésente des réseaux de la nouvelle génération, comme suit :

#### 2.5.1.1 Niveau de réseau spatial :

Le niveau de réseau spatial prendra en charge les services Internet spatiaux sans fil utilisant des satellites en orbite terrestre basse (LEO), en orbite terrestre moyenne (MEO), et en orbite terrestre géostationnaire (GEO) à déploiement dense. Les satellites géostationnaires sont à une altitude de 35 786 km, ce qui entraîne un retard de transmission du signal car les nœuds sont à d'énormes distances les uns des autres. Cela soulève un besoin d'orbites de satellites non-géostationnaires (non GSO) qui devraient fournir des débits binaires élevés et une connectivité Internet à faible latence dans le monde entier [49]. Étant donné que le déploiement des satellites NGSO prendra encore beaucoup de temps, les satellites LEO peuvent être choisis comme une solution possible. Le réseau satellite LEO avec fréquence

radio et mécanisme de co-routage laser fournira des communications à latence plus faible, là où les distances de communication sont supérieures à 3 000 km [47],[50].

### 2.5.1.2 Niveau du réseau aérien :

Le réseau aérien peut être divisé en deux catégories : la plate-forme à basse altitude (LAP) et la plate-forme à haute altitude (HAP). Le LAP opère à une altitude de quelques kilomètres et le HAP opère généralement dans la stratosphère. Le HAP a une endurance plus longue et des capacités de couverture plus larges, mais le HAP chevauche les réseaux à satellite LEO [50],[51]. D'autre part, LAP utilise des bandes basses fréquence à ondes millimétriques (mmWave) et des micro-ondes pour fournir une connectivité flexible et fiable grâce à l'utilisation dense de stations de base volantes (BS) et de drones. Les drones peuvent servir de nœuds relais pour les communications longues distance, et ainsi favoriser l'intégration des réseaux spatiaux et terrestres, mais la caractéristique la plus intéressante et la plus utile des drones est qu'ils peuvent faciliter les communications mobiles dans les zones où les infrastructures adéquates sont absentes [52]. Les UAV ont une mobilité à grande vitesse et, par conséquent, des protocoles de réseau mobile plus avancés sont nécessaires pour les UAV. La communication hybride adaptative a du potentiel et surpasse les protocoles existants [53]. On peut s'attendre à ce qu'un réseau futur entièrement intégré ait des architectures multi-couches comprenant des LAP basés sur des UAV, des satellites LEO, des satellites GEO et des réseaux terrestres hétérogènes.

### 2.5.1.3 Réseau terrestre :

Les réseaux terrestres seront un réseau hétérogène très dense nécessitant le déploiement de grande capacité, car un grand nombre de petites BS doivent être déployées pour éviter la perte de trajet. Les réseaux terrestres prendront en charge les bandes micro-ondes, mmWave, basse fréquence et térahertz [48].

### 2.5.1.4 Réseau sous-marin :

Le réseau sous-marin vise à fournir des installations internet sous les mers et les océans, mais cela reste un sujet très controversé de savoir si cela ferait ou non partie des réseaux futurs.

Ce système de réseau implique une communication optique et acoustique, et une fréquence radio, mais la difficulté réside dans l'imprévisibilité de l'environnement sous-marin, les défis à relever et les facteurs de risque, car l'eau présente des propriétés de propagation différentes de celles des terrains aériens ou terrestres. Par conséquent, de nombreux problèmes restent à résoudre pour les réseaux sous-marins [48],[50].

## 2.5.2 Vers un réseau intelligent

### 2.5.2.1 IA distribuée (Distributed Artificial Intelligence)

Les réseaux futurs prendront en charge l'Internet of Everything (IoE). Cela fera suffisamment progresser le réseau pour prendre des décisions intelligentes[47]. De plus, l'IoE doit répondre à diverses exigences.

- L'appareil périphérique doit calculer et stocker des données.
- Il devrait avoir la capacité de nettoyer et d'abstraire les données [54].

Cette approche peut améliorer la confidentialité et la sécurité du réseau. Les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent être intégrés dans le réseau pour assurer la sécurité [55] et l'intégrité des données.

### 2.5.2.2 Bord intelligent en temps réel (Real-time Intelligent Edge)

Il n'est pas entièrement possible de mettre en œuvre des réseaux de véhicules aériens sans pilote (UAV) avec les technologies existantes, car il faut une intelligence en temps réel et une latence extrêmement faible pour contrôler le réseau. Ainsi, une nouvelle technologie est nécessaire pour surmonter ces problèmes. Il sera possible grâce à la nouvelle technologie d'activer des services alimentés par l'IA. Ce dernier sera intégré dans les réseaux de véhicules, elle prendra en charge plusieurs mécanismes de sécurité. Cependant, cela entraînera de nouveaux problèmes de confidentialité et de sécurité [56].

### 2.5.2.3 Radio intelligente (Intelligent Radio)

Les dispositifs émetteurs-récepteurs peuvent être séparés alors qu'ils étaient conçus ensemble dans les générations précédentes. Par conséquent, il a la capacité de se mettre à jour. Certains systèmes d'exploitation sont développés sur la base d'informations matérielles et

de la technologie de l'IA. Les futures générations permettront une transmission de données intelligente et sécurisée.

### 2.5.3 Nouvelle architecture de pile de protocoles réseau

L'architecture actuelle du protocole internet généralement TCP/IP, n'est pas applicable pour la nouvelle génération en raison de ses limites en termes de latence et de débit. Récemment, certains nouveaux protocoles comme Quick UDP Internet Connections (QUIC) ont été élaborés et ont permis de résoudre ces problèmes dans une certaine mesure. Mais, malheureusement, ces protocoles rendent l'internet plus compliqué et ne peuvent pas servir de remède complet.

L'un des principaux objectifs de la nouvelle génération est de fournir un débit binaire agrégé en Tbps et il est inévitable de fonctionner à des fréquences plus élevées pour le spectre et la bande passante disponibles. On situe les méthodes de communication suivante.

- Communications THZ.
- Communications par lumière visible.
- Communication moléculaire.
- Communication quantique.

### 2.5.4 Blockchain pour une sécurité décentralisée

Une autre technologie importante dans le réseau de la nouvelle génération est la blockchain. Il a plusieurs utilisations telles que le partage du spectre, la technologie du grand livre distribué et la décentralisation du réseau [57]. Ont utilisé la décentralisation du réseau pour améliorer les performances du réseau[58]. Les chaînes de blocs sont des bases de données distribuées basées sur des registres où les transactions peuvent être enregistrées et mises à jour en toute sécurité sans intermédiaires centraux [59]. La blockchain est considérée comme la prochaine révolution pour les futures technologies de communication mobile. Il garantit des fonctionnalités de sécurité renforcées tout au long de la communication, car il permet à diverses entités du réseau d'accéder en toute sécurité aux données critiques. Un mécanisme de contrôle décentralisé basé sur la blockchain permet d'établir des liens de communication directs entre les entités du réseau, ce qui réduit les coûts administratifs [60]. Au lieu d'une

base de données centralisée, l'intégration de la blockchain dans le système de partage du spectre peut augmenter l'efficacité spectrale. En outre, la blockchain facilite l'intégration de systèmes individuels développés par différents opérateurs en fournissant un mécanisme d'authentification et d'autorisation unifié et un système de facturation, et permet l'itinérance entre les opérateurs et les réseaux[61].

## 2.6 Conclusion

Les réseaux sans fil de la nouvelle génération promettent une augmentation significative de la qualité de service et un avenir durable. Dans ce chapitre, un aperçu de la nouvelle génération a été fourni, ainsi qu'avec ses cas d'utilisation potentiels et quelles exigences qui devraient représenter le cœur des réseaux de prochaines générations. Nous avons aussi vu l'architecture et ses composants principaux, ainsi les techniques de communication.

---

---

## CHAPITRE 3

---

# LES TECHNIQUES DE TRANSMISSION ÉTUDIÉES

### 3.1 Introduction

Malgré le déploiement réussi de la 5G à l'aide de technologies habilitant telles que le spectre de fréquences mmWave, la demande d'amélioration des débits de données se poursuit. En ce sens, des fréquences plus élevées au-dessus de la bande mmWave seront fondamentales dans le réseau de futures générations. La bande de fréquence térahertz se situe entre les bandes mmWave et optique, et elle va de 100 GHz à 10 THz. Cette bande est promise à fournir des débits de données sur des centaines de Gbp/s, des transmissions sécurisées, une connectivité étendue, un réseau très dense et à améliorer l'efficacité spectrale, augmentant ainsi la bande passante pour répondre aux exigences des futures applications avec des débits de données ultra massifs et une latence ultra-faible. Ce chapitre fournit une vue sur les techniques de communications par spectre de future génération.

## 3.2 Communication moléculaire

Il existe de nombreux environnements où la communication sans fil conventionnelle basée sur les ondes électromagnétiques (EM) peut ne pas être réalisable ou efficace. Un nouveau paradigme de communication inspiré par la nature est considéré comme une solution possible qui utilise des signaux biochimiques pour transférer des informations, appelées communications moléculaires (MC) [62]. MC utilise des molécules et des signaux biochimiques pour la transmission d'informations d'une manière similaire à la façon dont les cellules vivantes communiquent [63]. En utilisant la nanotechnologie avancée, des nano-dispositifs peuvent être fabriqués pour être utilisés en biomédecine et à l'échelle nanométrique [64], [65]. Les nano-dispositifs peuvent également être connectés à internet et former un réseau pour permettre une transmission efficace des informations et des communications. Ces nano-dispositifs peuvent ensuite être utilisés pour administrer des médicaments dans les vaisseaux sanguins et surveiller les organes vitaux du corps. Les systèmes MC devraient s'interfacer avec internet et les réseaux mobiles et les deux défis majeurs sont les interfaces entre le domaine électrique et chimique, et les méthodes d'assurance de la sécurité [63].

## 3.3 Communication quantique

Une autre technologie prometteuse dans le réseau de la nouvelle génération est la communication quantique (CQ). La différence fondamentale entre la communication quantique et la communication binaire classique est de savoir si l'écoute clandestine peut être détectée sur place. Les informations sont codées à l'état quantique à l'aide de photons ou de particules quantiques. La communication quantique augmente considérablement la fiabilité et la sécurité de la transmission des données. L'état quantique est affecté par toute écoute indésirable. Elle offre une sécurité avec des percées essentielles. Elle peut fournir des solutions et élever la communication qu'il n'est pas possible d'atteindre grâce aux techniques de communication traditionnelles [66]. De plus, CQ peut améliorer les débits de données en raison de la nature de superposition des qubits. Après des décennies d'exploration, il existe de nombreuses branches du CQ : distribution de clé quantique, téléportation quantique,

partage de secret quantique et communication directe sécurisée quantique [67]. Une autre caractéristique attrayante de CQ est son énorme potentiel dans la communication longue distance.

### 3.4 Transmission par lumière visible

L'une des technologies complémentaires des communications mobiles basées sur Radio Fréquence (RF) et l'OWC (Optical Wireless Communications). VLC (communications par lumière visible) utilise des LED afin de remplir le double objectif de transmission de données à haut débit et d'éclairage. L'utilisation de VLC dans des liaisons à courte portée offre de nombreux avantages par rapport aux communications radios traditionnelles, certains d'entre eux sont [68] :

- Le spectre de la lumière visible fournit une bande passante extrêmement élevée (de l'ordre du THz). En conséquence, le spectre est sans licence et gratuit.
- Le support de transmission utilisé par VLC pour envoyer et recevoir des informations, est incapables de traverser des surfaces opaques. Ainsi, les réseaux de transmission d'informations sont limités à des bâtiments individuels et les signaux ne peuvent pas être captés par des récepteurs à l'extérieur des bâtiments. Cela garantit la sécurité lors de la transmission des données, tout en évitant les interférences intercellulaires.
- VLC utilise des sources d'éclairage comme stations de base, aucune construction coûteuse de stations de base ou de maintenance coûteuse n'est nécessaire.
- VLC n'utilise pas d'ondes électromagnétiques, il est immunisé contre les interférences électromagnétiques extérieures. Alors que les lampes LED deviennent de plus en plus efficaces avec une durée de vie croissante et que d'autres technologies connexes progressent.
- VLC est envisagé de fournir des débits de données de l'ordre de centaines de gigabits par seconde ou même d'atteindre une vitesse de térabits par seconde.

VLC est une technologie prometteuse pour répondre aux besoins croissants de connectivité sans fil [69]. VLC a été déployé dans des réseaux Ad Hoc véhiculaires et dans des systèmes de positionnement intérieurs [70]. Ils ont présenté un système de positionnement intérieur basé sur VLC. On remarque que VLC limite les interférences électromagnétiques.

Certaines études de recherche ont démontré une transmission de données à grande vitesse à l'aide de LED. En particulier, la technologie VLC prend principalement en charge le scénario intérieur, car elle est fortement affectée par la lumière naturelle. Les problèmes de sécurité de la technologie VLC incluent les problèmes de communication et les activités malveillantes. Un protocole SecVLC est développé pour la transmission sécurisée des données dans un réseau véhiculaire [71].

### 3.4.1 La lumière visible et la notion de large bande

#### 3.4.1.1 Utilisation de la large bande par la lumière visible

Il est possible d'obtenir des débits binaires d'accès hertzien en liaison optique par lumière visible allant de quelques bits par seconde à plus de 10 Gbits/s pour des niveaux d'éclairage type en intérieur. Les communications VLC offrent la possibilité de réduire l'encombrement des bandes de fréquences inférieures (RF), dans la mesure où le spectre de la lumière peut être utilisé comme ressource spectrale additionnelle pour les communications à large bande.

#### 3.4.1.2 Utilisation du spectre

Les communications VLC utilisent le spectre visible (longueurs d'onde comprises entre 390 et 750 nm) et peuvent fournir des communications hertziennes au moyen d'éléments d'éclairage et d'affichage. Les communications optiques sans fil (OWC) permettent de réduire l'encombrement dans les bandes de fréquences inférieures (RF), étant donné que la lumière peut être utilisée comme ressource spectrale additionnelle pour les communications à large bande.

### 3.4.2 Catégories des transmissions VLC

Les communications pouvant être assurées par lumière visible peuvent être classées dans trois catégories :

- Communications par capteur d'image (ISC).
- Communications par récepteur à photodiode à bas débit.
- Communications par récepteur à photodiode à haut débit.

En ce qui concerne la définition d'un débit faible et d'un haut débit, le seuil du débit de données est de 1 Mbit/s mesuré au niveau de la sortie de la couche physique du récepteur. Un débit inférieur à 1 Mbit/s est considéré comme un faible débit, tandis qu'un débit supérieur à 1 Mbit/s est considéré comme un haut débit.

### 3.5 Transmission par ondes THZ

La bande RF existante ne peut pas être utilisée pour les futures technologies de la nouvelle génération. Cela a stimulé la demande pour la technologie THz. Les communications térahertz sont envisagées comme une technologie clé, elles apparaissent comme une technologie complémentaire intéressante et attrayante comparée aux connexions par fibre optique qui sont moins flexibles et plus coûteuses, qui nécessite des débits de données de plus de 100 Gbit/s, et une latence de 1 milliseconde. La technologie de communication THz utilise la bande 0.1-10 THz afin de pouvoir l'utiliser dans la communication à plus haut débit [72]. De plus, elles exploitent les signaux optiques et les ondes électromagnétiques. Les communications THz utilisent des fréquences plus élevées pour une transmission hautement directionnelle, mais elles sont plus facilement bloquées par tout obstacle sur leur chemin. Les interférences intercellulaires peuvent être réduites tout en diminuant également les risques d'écoute clandestine et en assurant ainsi la sécurité. Des défis existent avec des opportunités prometteuses en même temps, en particulier en raison de la perte de propagation très élevée et de la distance de communication limitée. La bande THz est destinée à être la prochaine frontière des communications à haut débit, Elle promet une large bande passante, qui atteint théoriquement plusieurs THz, d'où une capacité potentielle de l'ordre du Térabits par seconde [73]. Par conséquent, la bande passante fournie est d'un ordre de grandeur au-dessus des systèmes à ondes millimétriques (mmW). Les signaux THz permettent également une directionnalité de liaison plus élevée et offrent des chances d'écoute plus faibles par rapport à la bande millimétriques.

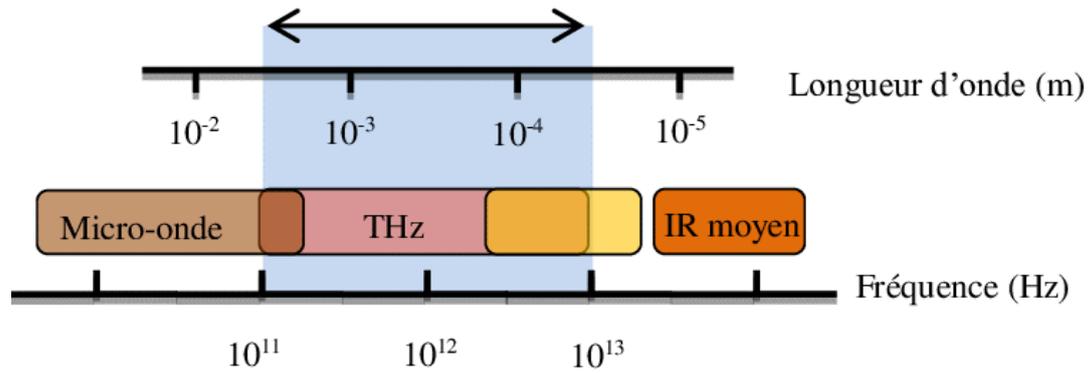


FIGURE 3.1 – Bande de fréquence de THz dans le spectre électromagnétique [74].

### 3.5.1 Architecture du système de transmission THZ

#### 3.5.1.1 Émetteurs-récepteurs térahertz

Les ondes térahertz sont considérées comme l'une des régions les moins étudiées et rarement capitalisées du spectre électromagnétique. Le fait que ces ondes se situent entre les bandes de fréquences millimétriques et optiques permet de déployer des technologies basées sur l'électronique et la photonique pour leur génération. En ce qui concerne les dispositifs électroniques, les progrès récents de la technologie de nanofabrication ont facilité l'avancement des dispositifs à semi-conducteurs fonctionnant dans la bande de fréquences térahertz. En outre, la plupart des matériaux conventionnels utilisés à des fréquences plus basses (c'est-à-dire les gammes des micro-ondes et des ondes millimétriques) ne répondent pas efficacement aux hautes fréquences et présentent généralement des pertes importantes au térahertz. Par conséquent, une alternative aux émetteurs-récepteurs compacts en bande térahertz repose sur l'utilisation de graphène. Les applications pratiques nécessitent également des matériaux électromagnétiquement reconfigurables qui forment la base de tous les composants térahertz actifs. En conséquence, les éléments térahertz basés sur le graphène ont montré des résultats très prometteurs dans la production, la modulation et la détection des ondes térahertz [75].

#### 3.5.1.2 Modèle de canal térahertz

Afin de pouvoir comprendre les particularités de n'importe quel canal sans fil avant son déploiement, il est nécessaire d'adopter un modèle spécifique qui décrit parfaitement le comportement du canal. Dans la bande de fréquence THz, le canal souffre d'une forte absorption

atmosphérique, qui résulte des molécules de vapeur d'eau. En plus de l'atténuation atmosphérique, l'affaiblissement du chemin en espace libre est considéré comme physiquement inévitable. Par conséquent, le canal de la bande THz est considéré comme hautement sélectif en fréquence [76]. Par conséquent, la distance de transmission est limitée par l'atténuation et la fréquence porteuse appropriée est déterminée en fonction de l'application.

### 3.5.2 Paramètre de transmission des système térahertz

Lors de l'étude des cas d'utilisation des communications térahertz, il convient de prendre en compte les points précis suivants [77] :

- Utilisation d'une bande de fréquences ultra-large.
- Possibilité de miniaturiser les antennes et les dispositifs
- Haute directivité et affaiblissement de propagation en espace libre élevé.
- Mise au point de technologies de fabrication, notamment en ce qui concerne les oscillateurs, les amplificateurs de puissance et les antennes à orientation de faisceau.

### 3.5.3 Domaine d'application des transmissions THz

Dans cette partie, nous nous concentrons sur un certain nombre d'opportunités prévues qui illustrent l'avenir du sans fil THz.

#### 3.5.3.1 Les drones

Ces dernières années, les véhicules autonomes sans pilote (UAV) sont devenus accessibles au public, ce qui a donné lieu à de nombreuses applications dans les domaines civils et commerciales. Les exemples incluent le contrôle météorologique, la reconnaissance des feux de forêt, la détection du trafic, le transport de marchandises, la recherche et le sauvetage d'urgence ainsi que la diffusion de communications [78]. Pour réaliser de telles applications, les drones doivent disposer d'un lien de communication fiable à tout moment. Il est intéressant de noter que l'atténuation du THz est triviale. En tant que tel, le THz peut devenir un candidat solide pour établir des communications fiables pour différents scénarios d'application des drones. En effet, en raison de la mobilité, les liaisons de communication qui souffrent de l'effet Doppler sont réduites au minimum lorsque la fréquence porteuse augmente. Par

conséquent, la bande de fréquences THz peut permettre des liaisons de communication à haut débit entre deux emplacements dynamiques. En outre, les drones ont besoin de liaisons sécurisées à courte distance pour obtenir des commandes ou transmettre des données avant de se disperser pour poursuivre leurs missions télécommandées ou autonomes. Les liaisons THz sont donc considérées comme un moyen fiable d'échanger des données critiques pour la sécurité entre les drones ainsi qu'entre le drone et les stations de contrôle au sol. En fait, la bande passante massive des systèmes THz permet des actions de protection distinctes contre différentes attaques à distance telles que le brouillage et offre la possibilité de cacher complètement l'échange d'informations. Les liaisons THz pourraient également être utilisées entre les drones et les avions afin de permettre l'accès à internet pendant les vols au lieu d'utiliser le service par satellite. De cette façon, le drone agira comme un standard téléphonique dans le ciel, servant d'intermédiaire entre la station au sol et l'avion.

### 3.5.3.2 Les centres de données

La demande croissante des consommateurs en matière d'applications en nuage a stimulé la concurrence entre les centres de données pour offrir aux utilisateurs des performances accrues. Pour cela, il faut pouvoir accueillir un grand nombre de serveurs et fournir une bande passante suffisante pour un large éventail d'applications. Cependant, il est assez difficile de gérer les rafales de trafic en raison des liens statiques et des interfaces réseau limité en s'appuyant uniquement sur des réseaux câblés fixes. Néanmoins, les réseaux sans fil, qui servent de technologie corrélative à Ethernet, possèdent l'adaptabilité et l'efficacité requises pour contribuer aux moyens possibles de résoudre le problème [79]. Il faut cependant noter que les transmissions sans fil peuvent souffrir des courtes distances et de l'intolérance aux blocages, ce qui entraîne l'épuisement de la capacité des centres de données si tous les fils sont remplacés. C'est pourquoi il est préférable d'augmenter le réseau du centre de données avec des voies aériennes sans fil plutôt que de remplacer tous les câbles [80]. Des chercheurs ont suggéré d'utiliser des liaisons THz dans les centres de données comme technologie parallèle. Ce type de déploiement permet d'améliorer les performances des centres de données et de réaliser des économies considérables sur le prix des câbles sans compromettre le débit. En particulier, les données atmosphériques ont été utilisées pour modéliser le canal THz, et ils

ont recommandé d'utiliser une largeur de bande de 120 GHz pour les applications des centres de données. Il convient de souligner que dans ce type d'application, les liaisons THz sont plus performantes que les technologies mmWaves et infrarouge, car la première a une bande passante limitée, tandis que la seconde souffre d'une énorme complexité dans la détection cohérente ainsi que de limitations dans ses détecteurs à loi carrée.

### 3.5.3.3 Les réseaux mobiles

Bien que la bande de fréquence THz souffre d'un fort affaiblissement sur le trajet et nécessite des antennes hautement directionnelles, ces inconvénients pourraient se transformer en attributs favorables lorsqu'elle est utilisée dans le régime des femtocellules (une femtocellule est une station de base de point d'accès pour le service de téléphonie cellulaire qui est souvent utilisée à l'intérieur des immeubles de bureaux et d'autres types de structures où le service cellulaire n'était traditionnellement pas disponible). Le déploiement de femtocellules réduit la distance à parcourir pour atteindre les objectifs de l'UE.

Entre la station de base active et l'utilisateur, tout en conservant un rapport SNR élevé au niveau du récepteur. Les stations de base femtocellulaires THz améliorent non seulement le principe de réutilisation des fréquences, mais augmentent également la capacité des systèmes de la bande THz. Ainsi, ces points d'accès, également appelés nœuds à faible puissance (LPN), sont utilisés comme portails pour les services et l'automatisation à domicile, les stations de métro, les centres commerciaux, les feux de circulation et de nombreuses autres applications. Un tel potentiel ouvre la porte à une nouvelle technique de communications THz pour les réseaux mobiles hétérogènes (HetNets). En fonction de l'environnement, de la qualité et du type de service de communication, les picocellules et les femtocellules seront colocalisées dans l'empreinte des macrocellules. Pour améliorer l'expérience des femtocellules THz, l'apprentissage machine (ML) pourrait être utilisé comme outil d'intelligence artificielle pour améliorer la fonctionnalité des terminales radios intelligentes. En effet, l'apprentissage machine peut-être largement utilisé pour modéliser un certain nombre de problèmes techniques, notamment les MIMO à grande échelle, les réseaux D2D et les réseaux HetNets[81]. En outre, l'apprentissage par renforcement est également d'une grande importance pour les communications THz, car la capacité d'auto-organisation est nécessaire pour permettre aux

femtocellules d'identifier de manière autonome le spectre disponible et de régler leurs paramètres en conséquence. Ces cellules fonctionneront donc dans les limites de l'évitement des interférences et de la satisfaction des demandes de QoS [82].

### 3.5.4 Avantages de la communication THz

Dans certains cas, la communication THz offre plusieurs avantages par rapport aux systèmes micro-ondes et infrarouge. Voici un résumé de ces avantages [74] :

- La communication THz offre la possibilité d'augmenter le débit et la bande passante, en comparaison aux systèmes micro-ondes et peut être utilisée pour transmettre simultanément plusieurs chaînes en haute définition .
- La communication THz peut être considérée comme une communication sécurisée pour plusieurs raisons, parmi lesquelles le fait que l'onde THz a une propagation directionnelle et qu'elle se propage sur une distance limitée à quelques dizaines de mètres, compte tenu de la forte absorption par l'eau , et d'un faisceau étroit et d'une courte durée d'impulsion qui limitent considérablement la probabilité de chute des avant-toits.
- Sous certaines conditions atmosphériques, les ondes THz sont moins atténuées que les ondes infrarouges. L'atténuation atmosphérique a alors un impact différent sur la communication THz ou infrarouge suivant les conditions météorologiques . Des mesures expérimentales récentes ont démontré que le THz est plus robuste que l'infrarouge en présence de pluie, de brouillard de poussière ou encore en présence de turbulences de l'air.
- La bande de fréquence THz n'est pas impactée par le bruit ambiant provenant de sources optiques et n'est pas non plus associée à des restrictions sanitaires ou à des limites de sécurité .

### 3.5.5 Inconvénients de la communication THz

- Les ondes THz ont une perte de propagation très élevée et une distance de communication limitée.
- Les caractéristiques atmosphériques jouent également un rôle majeur dans les liaisons

de communication fonctionnant au-dessus de 100 GHz, car l'absorption moléculaire peut entraîner de fortes pertes de signal.

- Les fréquences plus élevées, étant hautement directionnelles, sont plus facilement bloquées par tout obstacle sur leur chemin.

### 3.6 Comparaison entre les communications sans fils

Les fréquences porteuses utilisées pour les communications sans fil ont augmenté pour répondre aux besoins en bande passante. La communauté des ingénieurs a assisté au développement de larges bandes radio telles que les fréquences à ondes millimétriques (mmWave) pour répondre à la croissance explosive de la demande de données mobiles et ouvrir la voie aux réseaux 5G. Néanmoins, un changement de paradigme dans le monde électromagnétique sans fil a été observé avec l'exploitation de la bande de fréquences Terahertz et VLC. Le tableau suivant présente la différence entre ces communications.

<b>Technologie</b>	<b>Bande Mmwave</b>	<b>Bande THz</b>	<b>Transmission VLC</b>
Gamme de fréquences	30 GHz - 300 GHz	100 GHz - 10 THz	430 THz - 790 THz
Intervalle	Courte portée	Courte portée	Courte portée
consommation d'énergie	Moyenne	Moyenne	Relativement faible
Topologie du réseau	Point à multipoint	Point à multipoint	Point à point
Source de bruit	Bruit thermique	Bruit thermique	Soleil/Lumière ambiante
Sécurité	Moyenne	Haute	Haute

TABLE 3.1 – Comparaison entre les technologie de communication sans fil.

## 3.7 Conclusion

La prochaine génération de systèmes sans fil pourrait avoir besoin pour répondre aux attentes futures. Par ailleurs, plusieurs technologies prometteuses du système sans fil de nouvelle génération ont été élaborées, la bande de fréquences THz (0,1 - 10 THz) offre un vaste éventail d'applications pour répondre aux demandes de communication et aux exigences du marché au-delà des réseaux 5G. Dans ce chapitre, une revue de l'état actuel du développement des futures communications THz a été présentée ainsi autre communication.

---

---

# CHAPITRE 4

---

## SIMULATION DES PERFORMANCE DES RÉSEAUX TERAHERTZ

### 4.1 Introduction

Après avoir finalisé la partie théorique, nous passons dans ce chapitre à la discussion des résultats de simulation, obtenus par le logiciel MATLAB, et ces explications. Dans ce présent chapitre. Nous débuterons par simuler le rapport signal/bruit en fonction des fréquences Mmwave et ensuite pour les fréquences THz, à différentes distances. Ce dernier est calculé à l'aide de modèles établis, c'est-à-dire le modèle 3GPP dans un scénario de canyon urbain dans la gamme de fréquences considérée pour le 3GPP NR . Après nous allons faire des comparaisons entre des liaisons en onde millimétrique et térahertz pour les différentes distances, et fixer leur avantages et inconvénients. Enfin nous allons calculer la probabilité d'avoir un SNR supérieur à 0 dB pour différentes configurations de déploiement.

### 4.2 Définition de SNR (RSB)

Le rapport signal sur bruit, parfois appelé SNR en anglais "signal to noise ratio", est un indicateur de la qualité de transmission d'une information, il exprime de la puissance du

signal utile à celle du bruit de fond indésirable.

$$SNR = \frac{Puissance(signal)}{Puissance(bruit)} \quad (4.1)$$

Généralement, le SNR est exprimé en décibels sous forme logarithmique en tant que :

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \frac{P(signal)}{P(bruit)} \quad (4.2)$$

### 4.3 Facteur de bruit

Le facteur de bruit (F) est une mesure de la dégradation du rapport signal/bruit (SNR), causée par les composants d'une chaîne de communication. Le facteur de bruit F d'un système est défini comme suit :

$$F = \frac{SNR_i}{SNR_o} \quad (4.3)$$

Où SNR<sub>i</sub> est le rapport signal/bruit d'entrée et SNR<sub>o</sub> est de sortie. Des valeurs faibles du facteur de bruit indiquent de meilleures performances.

## 4.4 Simulation et résultat

### 4.4.1 Présentation du logiciel utilisé

MATLAB (MATrix LABoratory) a été utilisé comme environnement de simulation dans de nombreux domaines d'application. MATLAB est un système informatique très puissant utilisé pour le développement d'algorithmes, la visualisation, l'analyse des données et le calcul numérique. C'est aussi un outil pour la manipulation des calculs mathématiques. Il permet d'implémenter des algorithmes, de manipuler des matrices et de créer des interfaces utilisateurs.

## 4.4.2 Effet de bruit sur une transmission Mmwave et THz

### 4.4.2.1 Le SNR en fonction des fréquences Mmwave et THz pour $F=10\text{dB}$

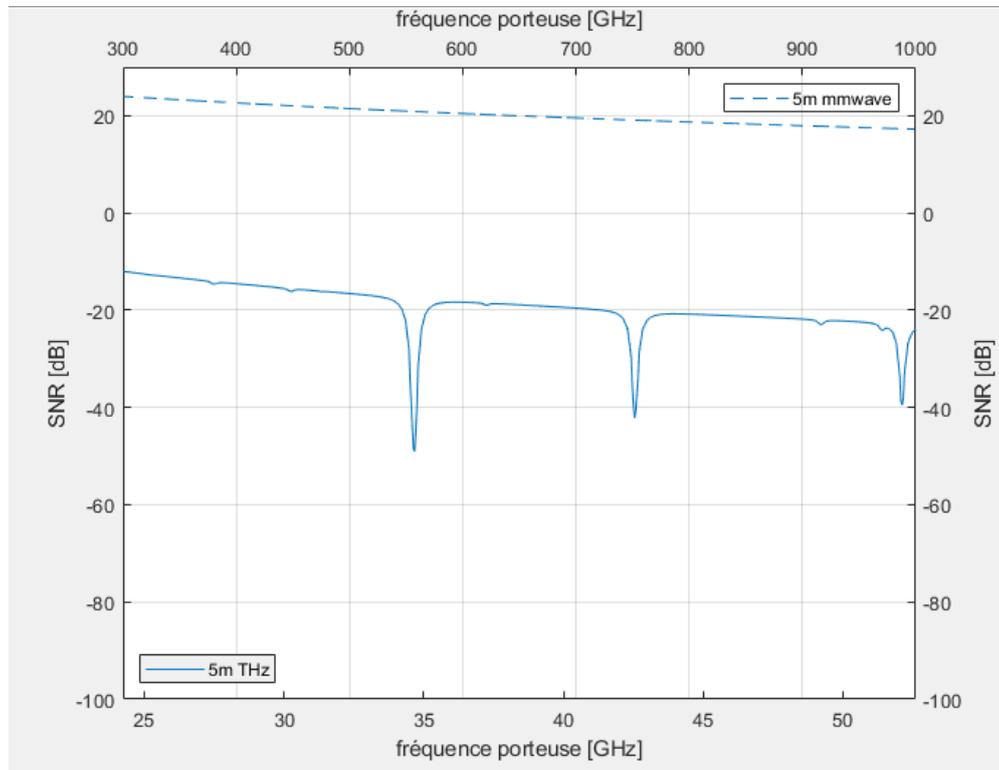


FIGURE 4.1 – le SNR en fonction des fréquences Mmwave et THz pour 5 m et  $F=10\text{dB}$ .

On remarque que la valeur de SNR diminue de 23 dB jusqu'à 17 dB proportionnellement avec la plage des fréquences mmWave [24.25, 52.6] GHz. De -12dB jusqu'à -25dB dans la plage des fréquences THz [300, 1000] GHz. Cela est pour une liaison de communication sans le gain de formation de faisceau, avec  $F=10\text{ dB}$ , et une bande passante de 400 MHz pour les ondes mmwave et 50 GHz pour les ondes TéraHertz (voir figure 4.1).

### 4.4.2.2 Le SNR en fonction des fréquences Mmwave et THz pour $F=50\text{ dB}$

Pour une liaison de communication sans le gain de formation de faisceau, avec  $F=50\text{ dB}$ , et une bande passante de 400 MHz pour les ondes mmwave et 50 GHz pour les ondes TéraHertz. La valeur de SNR diminue de -17dB jusqu'à -22dB proportionnellement avec la plage des fréquences mmwave [24.25, 52.6] GHz, et de -52dB jusqu'à -64dB dans la plage des fréquences THz [300, 1000] (voir figure 4.2).

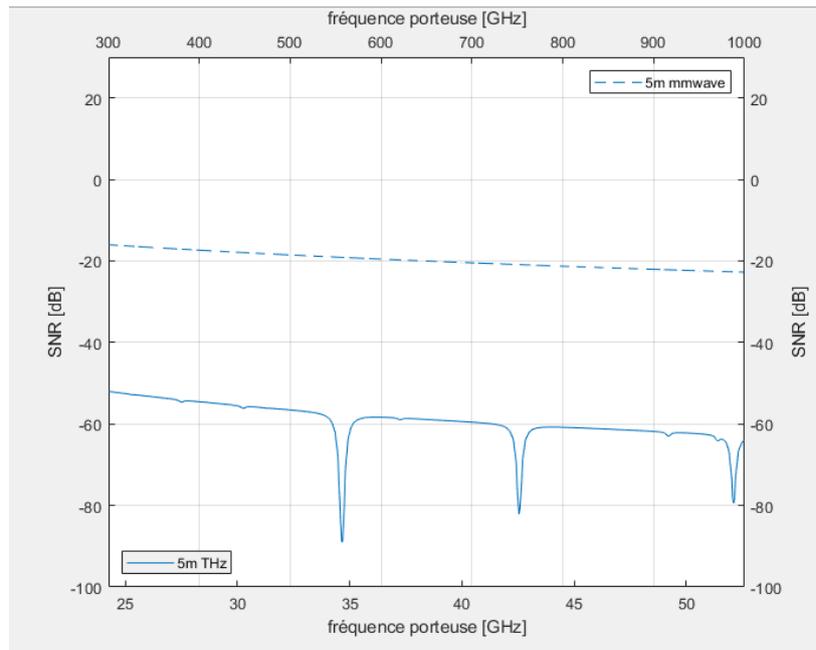


FIGURE 4.2 – le SNR en fonction des fréquences Mmwave et THz pour 5 m et  $F=50\text{dB}$ .

#### 4.4.2.3 Le SNR en fonction des fréquences Mmwave et THz pour $F=100\text{ dB}$

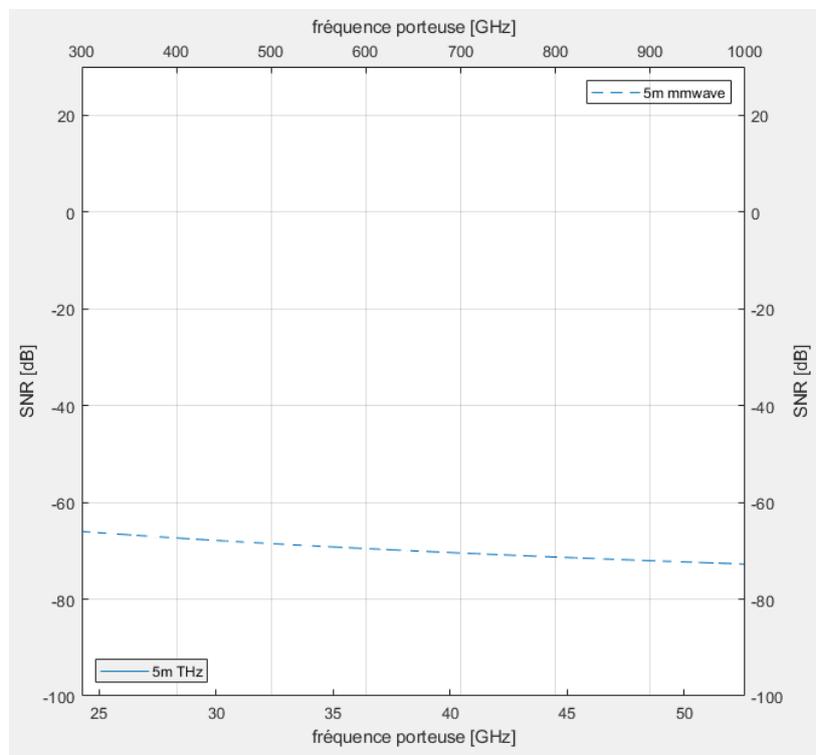


FIGURE 4.3 – le SNR en fonction des fréquences Mmwave et THz pour 5 m et  $F=100\text{dB}$ .

Pour un facteur de bruit  $F=100$  dB, on remarque que la valeur de SNR diminue de -65 dB jusqu'à -74 dB proportionnellement avec la plage des fréquences mmwave [24.25, 52.6] GHz, tandis que pour les fréquences térahertz la valeur de SNR est moins de -100 dB. Dans ce cas, on peut dire qu'on a une perte totale du signal et ça à cause de la sensibilité des ondes térahertz vers le bruit (voir figure 4.3).

D'après ces résultats, nous constatons qu'à chaque fois, on augmente le facteur du bruit le SNR diminue et par conséquent le rapport signal/bruit diminue, la puissance de signal diminue alors on aura un affaiblissement important de signal.

### 4.4.3 Calcul de SNR en fonction des fréquences Mmwave pour les différentes distances

Nous allons comparer le rapport signal/bruit à différentes distances (5, 50, 500) m, pour les liaisons en ondes millimétriques. Le SNR est donné par le rapport entre la puissance du signal reçu et la puissance du bruit en dB, sans le gain de formation de faisceau (Beamforming), afin d'analyser l'impact de la fréquence porteuse sur l'affaiblissement de propagation.

On a :

- La bande passante est de 400 MHz.
- $P_{tx}=0.5W$ .
- Facteur de bruit  $F=10dB$ .

#### 4.4.3.1 Calcul de SNR pour une distance de 5 m

Pour une liaison de communication en onde millimétrique sans le gain de formation de faisceau avec un facteur de bruit  $F=10dB$  et une bande passante de 400 MHz. On remarque que pour une distance de 5 m le SNR diminue de 23.9757 dB jusqu'à 17.268 dB proportionnellement avec la plage de fréquence de [24.25, 52.6] GHz (voir figure 4.4).

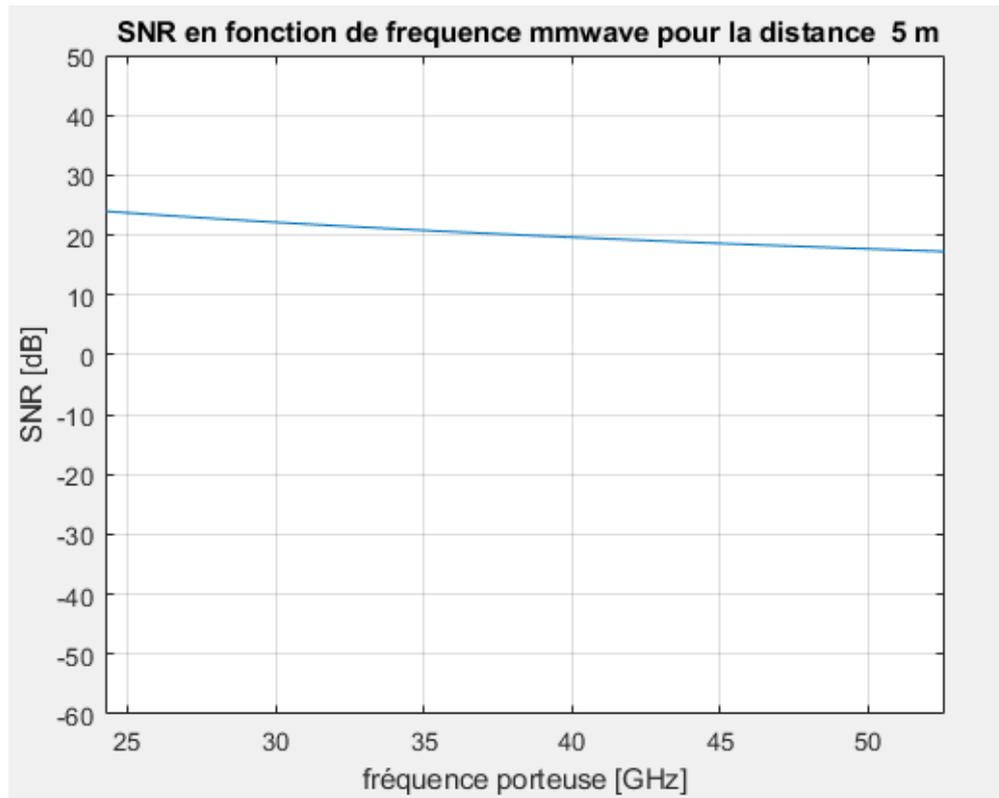


FIGURE 4.4 – Le SNR en fonction de fréquence Mmwave pour une distance de 5m.

#### 4.4.3.2 Calcul de SNR pour une distance de 50 m

Pour une liaison de communication en onde millimétrique sans le gain de formation de faisceau avec une bande passante de 400 MHz. On remarque que pour une distance de 50 m le SNR diminue de 1.25133 dB jusqu'à -5.69723 dB proportionnellement avec la plage de fréquence de [24.25, 52.6] GHz(voir figure 4.5).

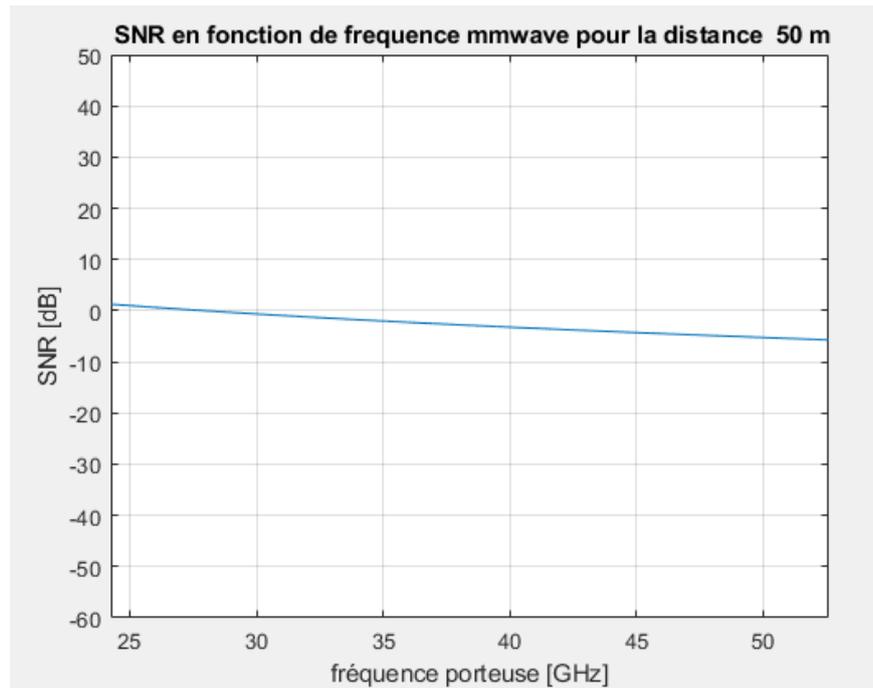


FIGURE 4.5 – Le SNR en fonction de fréquence Mmwave pour une distance de 50m.

#### 4.4.3.3 Calcul de SNR pour une distance de 500 m

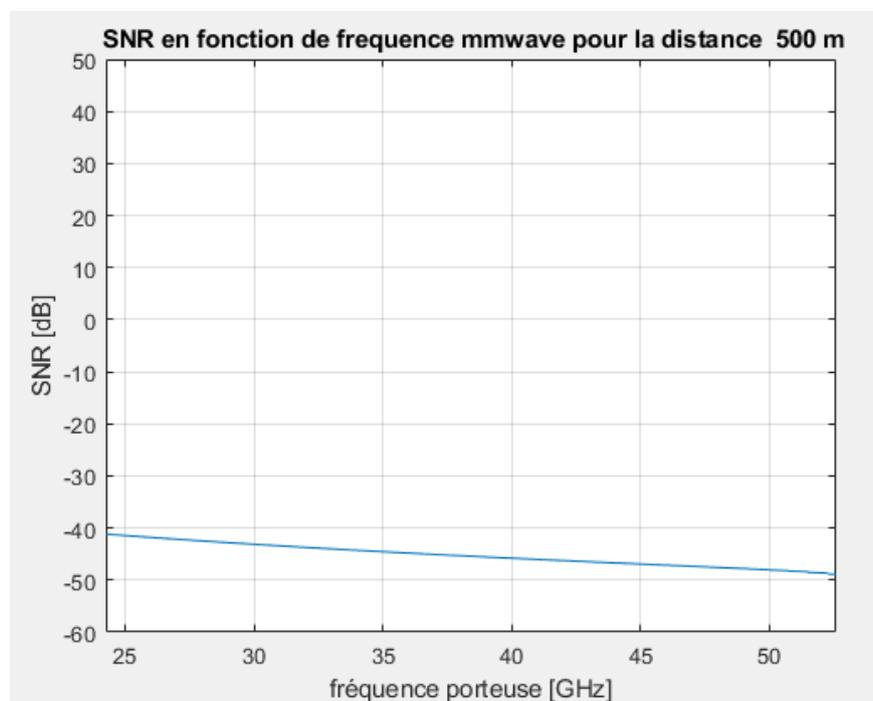


FIGURE 4.6 – Le SNR en fonction de fréquence Mmwave pour une distance de 500m.

Pour une liaison de communication en onde millimétrique sans le gain de formation de faisceau avec  $F=10\text{dB}$  et une bande passante de 400 MHz. On remarque que pour une distance de 500 m le SNR diminue de  $-41.204\text{ dB}$  jusqu'à  $-48.8729\text{ dB}$  proportionnellement avec la plage de fréquence de  $[24.25, 52.6]\text{ GHz}$ (voir figure 4.6).

Nous constatons d'après ces résultats qu'à chaque fois, on augmente la distance entre l'émetteur et le récepteur le SNR diminue et par conséquent le rapport signal/bruit diminue, et tellement le facteur de bruit est fixe donc la puissance de signal diminue alors on aura un affaiblissement important de signal.

#### 4.4.4 Calcul de SNR en fonction des fréquences THz pour les différentes distances

Nous allons comparer le rapport signal/bruit à différentes distances (5, 50, 500) m, pour les liaisons en ondes térahertz. Le SNR est donné par le rapport entre la puissance du signal reçu et la puissance du bruit en dB, sans le gain de formation de faisceau (Beamforming) afin d'analyser l'impact de la fréquence porteuse en térahertz sur l'affaiblissement de propagation.

On a :

- La bande passante est de 50GHz.
- $P_{tx}=0.5\text{W}$ .
- Facteur de bruit  $F=10\text{dB}$ .

##### 4.4.4.1 Calcul de SNR pour une distance de 5 m

Pour une liaison de communication en onde térahertz sans le gain de formation de faisceau, avec un facteur de Bruit  $F=10\text{dB}$  et une bande passante de 50 GHz. On remarque que pour une distance de 5 m le SNR diminue de  $-12.0251\text{ dB}$  jusqu'à  $-25.1927\text{ dB}$  proportionnellement avec la plage de fréquences  $[300, 1000]$ .

On peut voir clairement sur le figure, qu'on a un phénomène d'évanouissement (fading) c'est-à-dire une diminution momentanée de la puissance du signal, pour les plages de fréquences  $[544\ 574]\text{ GHz}$ ,  $[738\ 766]\text{ GHz}$ , et  $[978\ 1000]\text{ GHz}$ (voire figure 4.7).

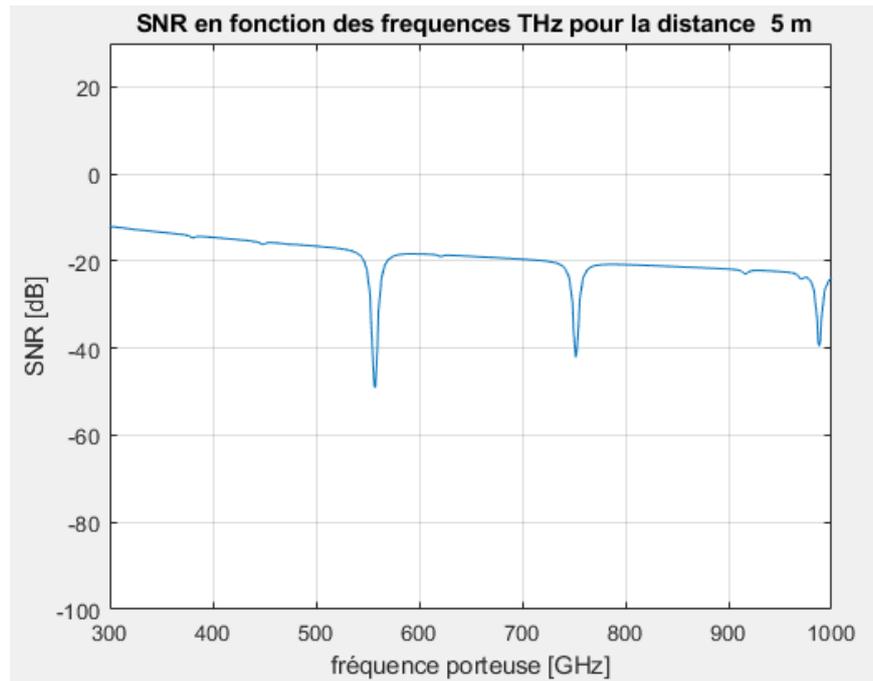


FIGURE 4.7 – Le SNR en fonction des fréquences THz pour une distance de 5 m.

#### 4.4.4.2 Calcul de SNR pour une distance de 50 m

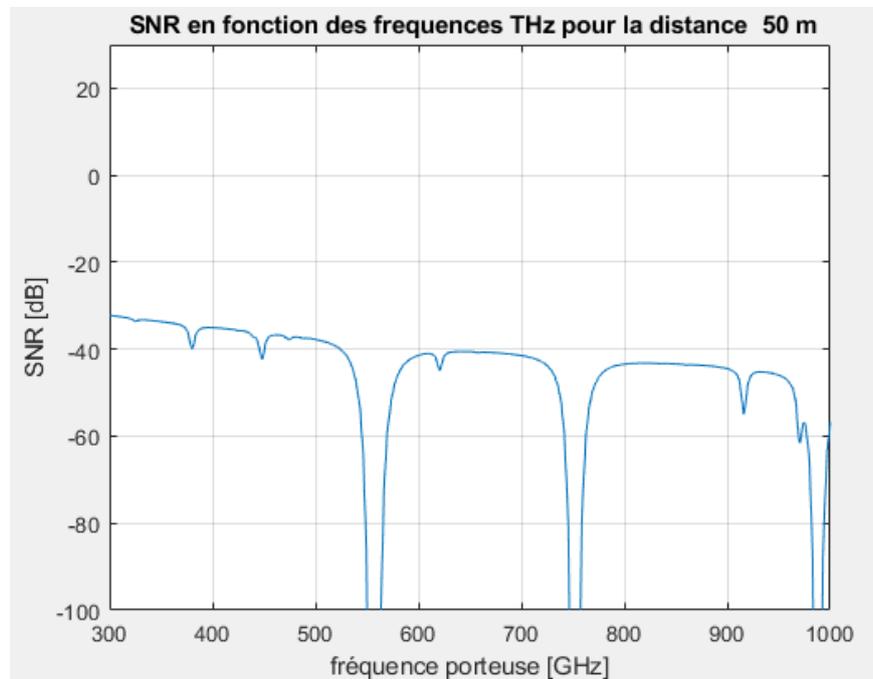


FIGURE 4.8 – Le SNR en fonction des fréquences THz pour une distance de 50 m.

Pour une liaison de communication en onde térahertz sans le gain de formation de faisceau avec une bande passante de 50 GHz. On remarque que pour une distance de 50 m le SNR diminue de -32.2131 dB jusqu'à -59.5411 dB proportionnellement avec la plage de fréquences [300, 1000](voir la figure 4.8).

On peut voir clairement sur la figure 4.5, qu'on a un phénomène d'évanouissement (fading) c'est-à-dire une diminution momentanée de la puissance du signal, pour les plages de fréquences [544 574] GHz, [738 766] GHz, et [978 1000] GHz. Que sont les mêmes plages dans le cas de 5 m de distance.

#### 4.4.4.3 Calcul de SNR pour la distance de 500 m

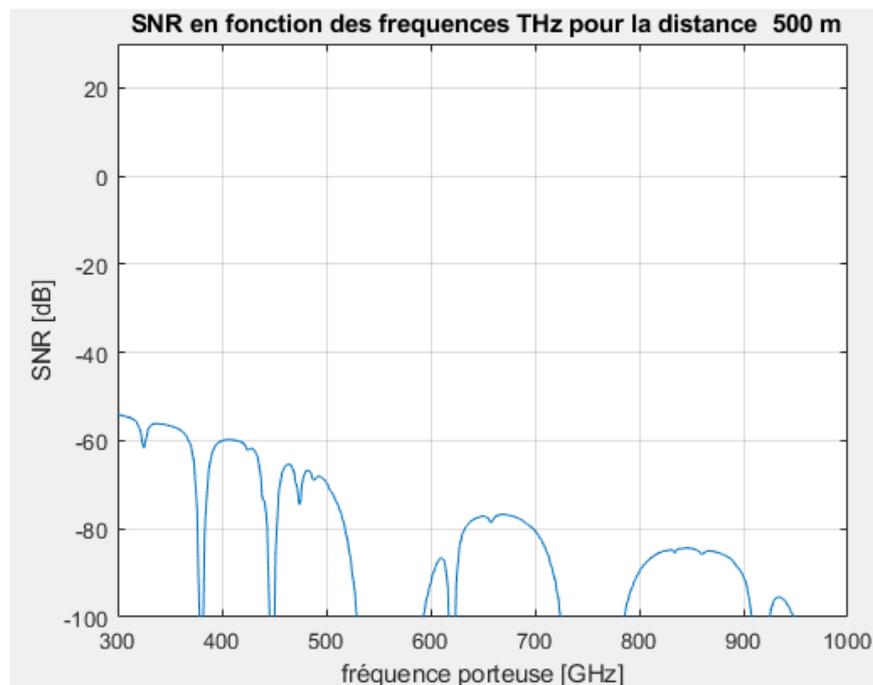


FIGURE 4.9 – Le SNR en fonction des fréquences THz pour une distance de 500 m.

Pour une liaison de communication en onde térahertz sans le gain de formation de faisceau avec un facteur de bruit  $F=10$ dB et une bande passante de 50 GHz. On remarque que pour une distance de 500 m le SNR diminue de -54.0927 dB jusqu'à -99.8723 dB proportionnellement avec la plage de fréquences [300, 1000] GHz(voir figure 4.9).

On peut voir clairement sur la figure 4.6, qu'on a un phénomène d'évanouissement (fading) c'est-à-dire une diminution momentanée de la puissance du signal, sur plusieurs plages de

fréquences. Donc on remarque un affaiblissement de signal très important alors on peut dire une perte de signal.

D'après ces résultats nous constatons qu'à chaque fois, on augmente la distance entre l'émetteur et le récepteur le SNR diminue et par conséquent, on aura un affaiblissement important de signal. On remarque que cet affaiblissement est beaucoup plus important pour les ondes térahertz, et ça due aux longueurs d'onde qu'est très petit, donc ces derniers ne voyages pas à des longues distances.

#### 4.4.5 Comparaison entre les ondes millimétriques et térahertz pour différentes distances

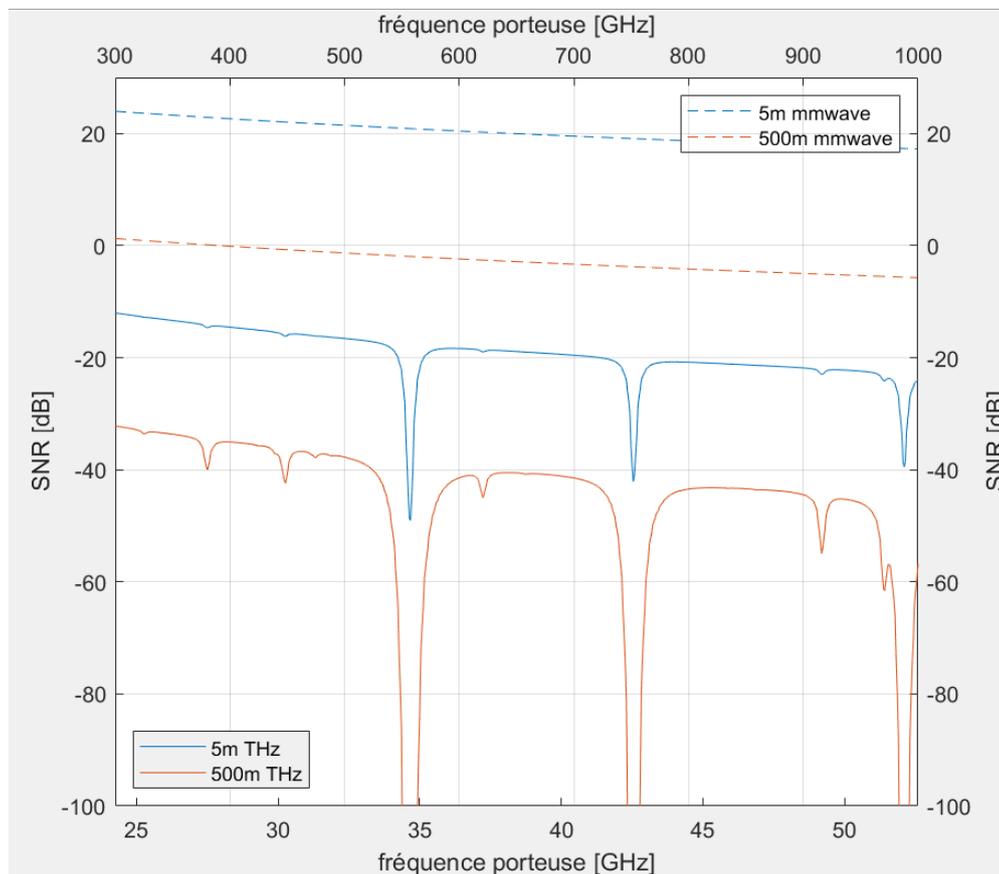


FIGURE 4.10 – Le SNR pour les distances [ 5 ,50]m, pour des liaisons en onde millimétrique et térahertz.

Nous observons que l'écart de rapport signal/bruit entre une porteuse à 30 GHz et une autre à 440 GHz est de 37 dB, pour une distance de 5 m. et de 39 dB entre une porteuse

à 45 GHz et une autre à 814 GHz, pour une distance de 50 m (voire la figure 4.10). Cet écart est dû à cause de la longueur d'onde, qu'est petite en térahertz par rapport aux ondes millimétriques. Afin de compenser cet écart et de régler le problème de grand affaiblissement de signal, on doit augmenter le nombre d'antennes dans chaque nœud.

#### **4.4.6 La probabilité d'avoir un SNR supérieur à 0 dB pour différentes configurations de déploiement**

Cette partie illustre les différences de densité de déploiement que dans des systèmes à ondes millimétriques et térahertz. La probabilité de couverture calculée comme la probabilité d'avoir un SNR supérieur à un seuil de 0 dB entre un utilisateur test, et au moins une station de base. Par exemple, il peut s'agir d'une mesure par les dispositifs mobiles lors d'une tentative d'accès initial. Les différents paramètres de simulation sont les mêmes avec la Deuxième partie.

##### **4.4.6.1 Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f=30\text{GHz}$**

Pour une fréquence de 30 GHz, avec 16 éléments d'antenne à la station de base et 4 à l'appareil mobile, nous remarquons que pour avoir une probabilité de couverture supérieure à 0,95 on a besoin de 60 BS/km<sup>2</sup> (voir la figure 4.11).

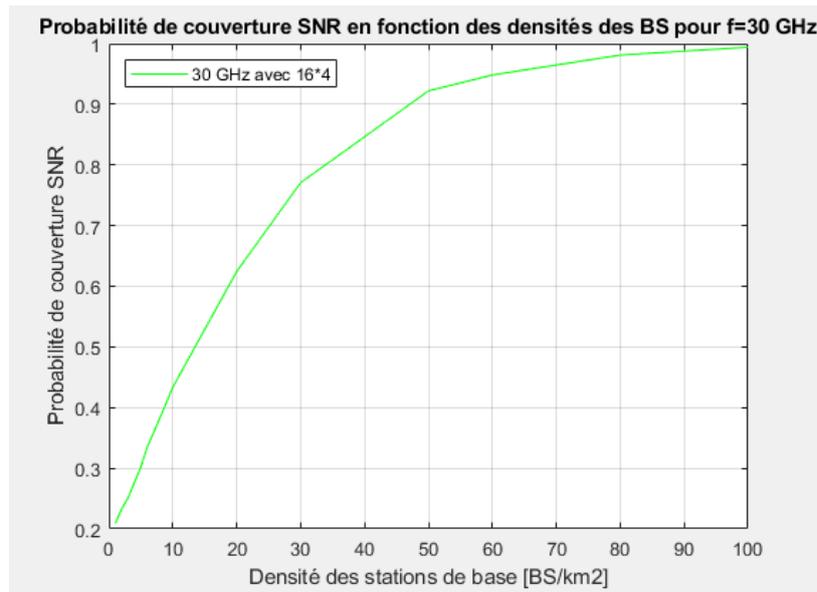


FIGURE 4.11 – Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 30GHz

4.4.6.2 Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 0.43 THz avec 16\*4

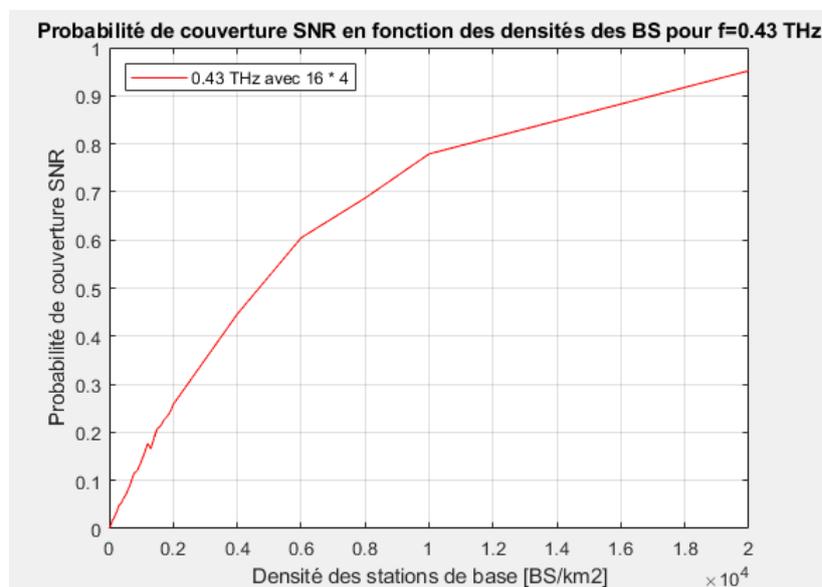


FIGURE 4.12 – Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 0.43THz.

Pour une fréquence de 0,43 THz, avec la même configuration d'antenne ce qui veut dire 16 éléments d'antenne à la station de base et 4 à l'appareil mobile, nous remarquons que pour avoir une probabilité de couverture supérieure à 0,95 on a besoin de 20000 BS/km<sup>2</sup> (voir la figure 4.12).

#### 4.4.6.3 Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f=0.43$ THz avec $256 \times 256$

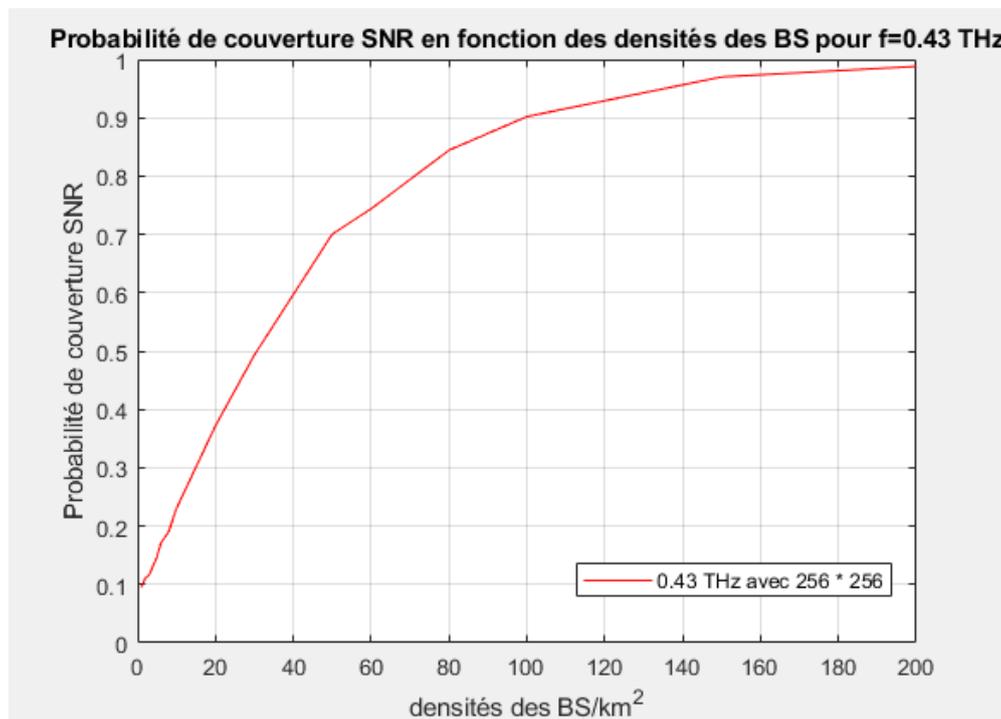


FIGURE 4.13 – Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour  $f=0.43$  THz  $256 \times 256$ .

Avec une configuration différente d'antenne, 256 éléments d'antenne à la station de base et 256 à l'appareil mobile. Pour une fréquence de 0.43 THz, on note que pour avoir une probabilité de couverture supérieure à 0.95, il faut 140 BS/km<sup>2</sup> (voir la figure 4.13).

#### 4.4.6.4 Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f=0.43$ THz avec $512*256$

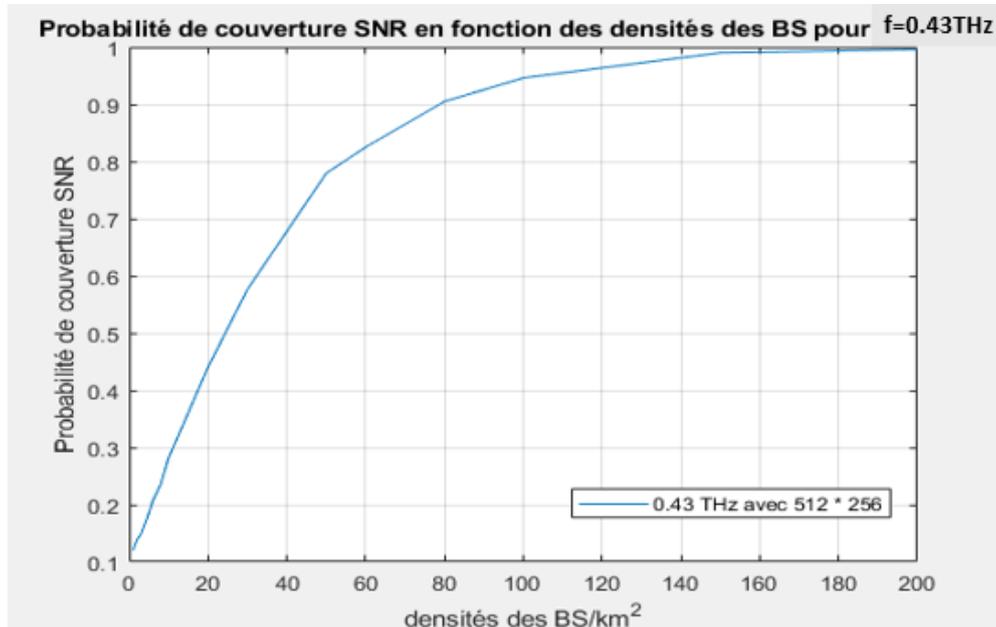


FIGURE 4.14 – Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour  $f=0.43$ THz.

Pour la configuration suivante, 512 éléments d'antenne à la station de base et 256 à l'appareil mobile. Avec une fréquence de 0.43 THz, on remarque que pour avoir une probabilité de couverture supérieure à 0.95, on a besoin de 120 BS/ $\text{km}^2$  (voire la figure 4.14).

#### 4.4.6.5 Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f=0.43$ THz avec $1024 * 256$ antennes.

Pour une fréquence de 0,43 THz, avec une configuration différente d'antenne, ce qui veut dire 1024 éléments d'antenne à la station de base et 256 à l'appareil mobile. Nous remarquons que pour avoir une probabilité de couverture supérieure à 0.95, on a besoin juste de 100 stations de base par  $\text{km}^2$  (voire la figure 4.15). Ce résultat est presque le même avec 30 GHz (fréquence mmWave).

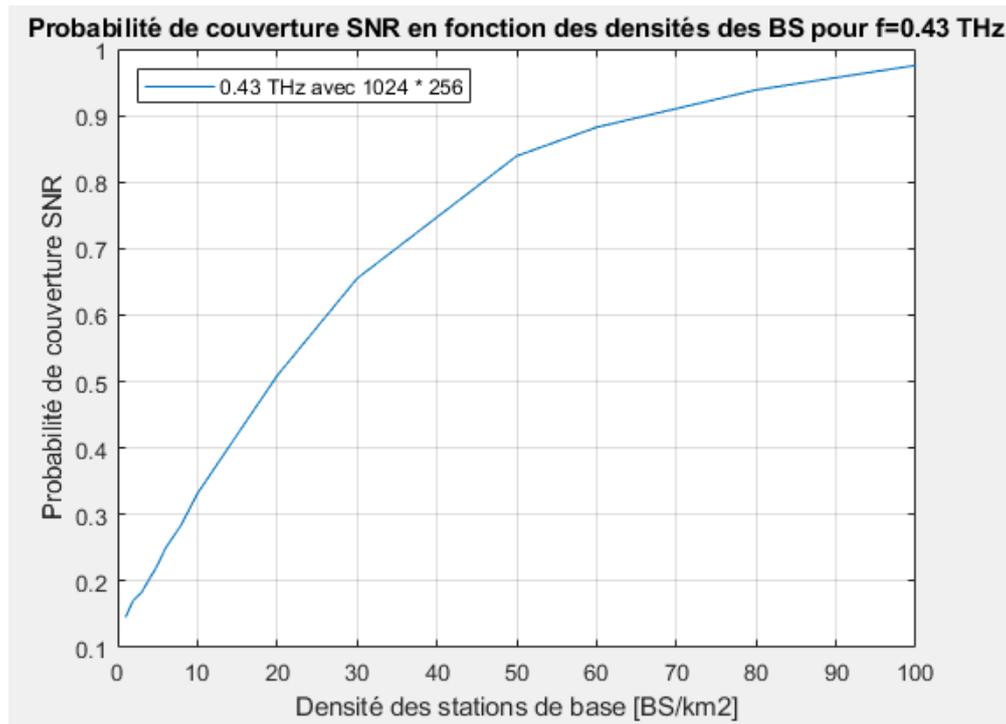


FIGURE 4.15 – Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour  $f=0.43\text{THz}$  avec  $1024 * 256$  antennes.

#### 4.4.6.6 Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f=1.5\text{THz}$ avec $16*4$

Pour une fréquence de 1,5 THz avec 16 éléments d'antenne à la station de base et 4 à l'appareil mobile, on remarque que pour attendre une probabilité de SNR supérieure à 0.95, on a besoin d'un très grand nombre de stations de base(voire la figure 4.16).

Donc, il est presque impossible d'avoir une valeur de SNR supérieure à 0 avec cette fréquence et avec un tel nombre d'antennes. Par conséquent un très grand affaiblissement de propagation et une transmission impossible du signal.

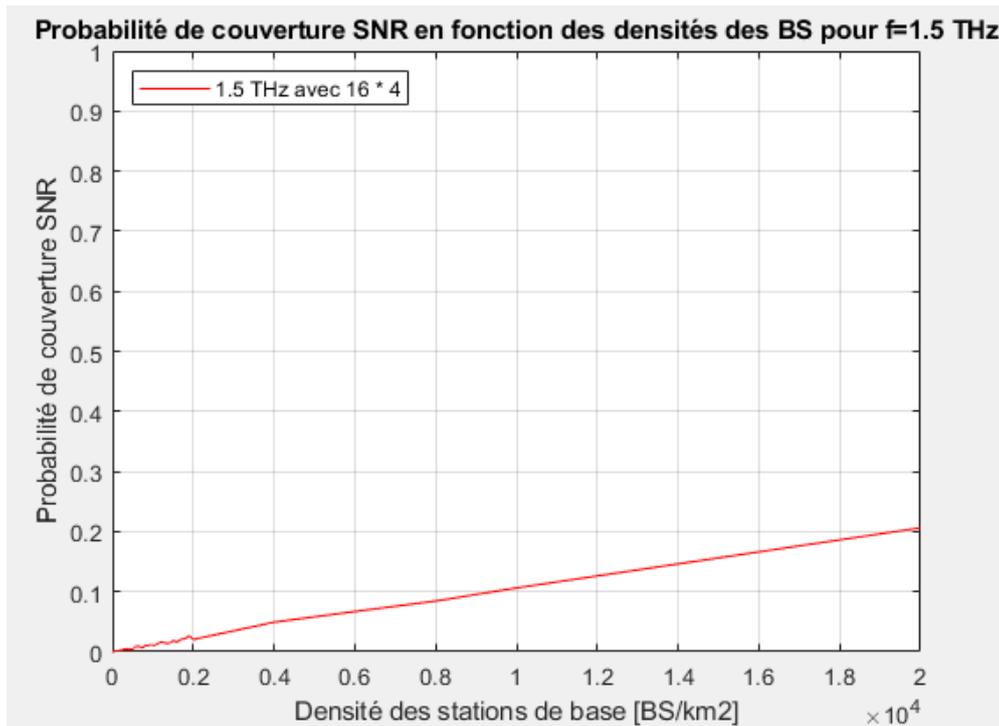


FIGURE 4.16 – Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour  $f=1.5\text{THz}$ .

#### 4.4.6.7 Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f=1.5\text{THz}$ avec $256*256$

Avec une configuration de 256 éléments d'antenne à la station de base et 256 à l'appareil mobile. Pour une fréquence de 1,5 THz, on note que pour avoir une probabilité de couverture supérieure à 0.95, on a besoin de 1000 BS/km<sup>2</sup> (voir la figure 4.17).

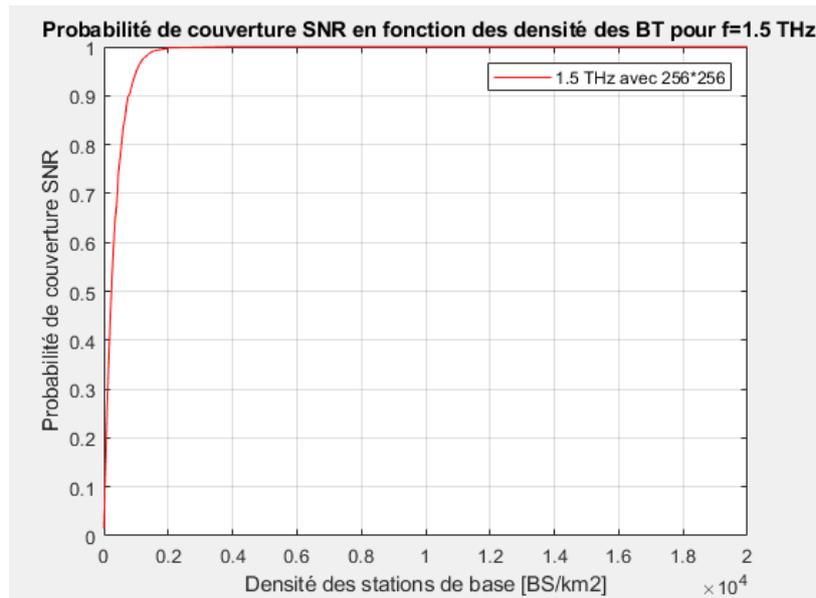


FIGURE 4.17 – Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 1.5THz.

4.4.6.8 Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 1.5THz avec 512\*256

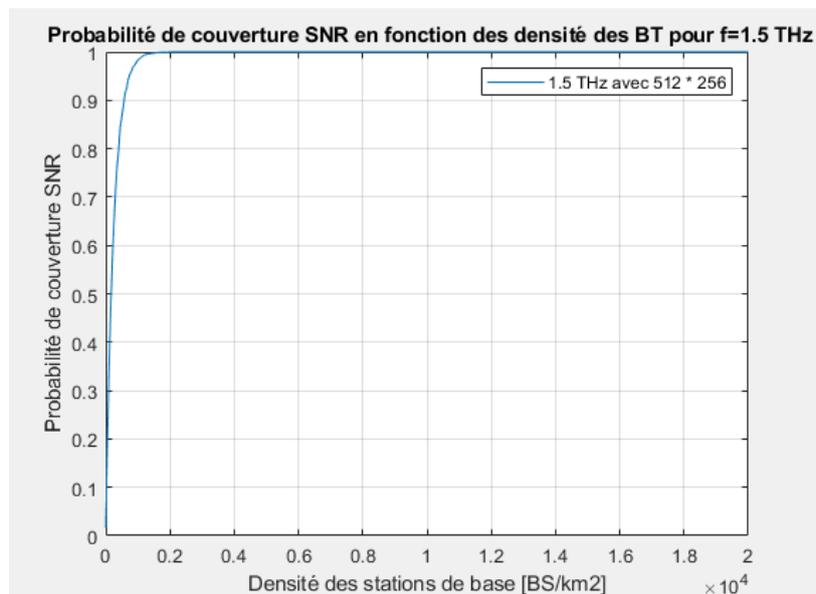


FIGURE 4.18 – Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour f= 1.5THz.

Avec une configuration différente d'antenne, 512 éléments d'antenne à la station de base et 256 à l'appareil mobile. Pour la fréquence de 1.5 THz, on remarque que pour avoir une probabilité de couverture supérieure à 0.95, on a besoin de 700 BS/km<sup>2</sup> (voir la figure 4.18).

#### 4.4.6.9 Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour $f=1.5$ THz avec 1024 \* 256 antennes.

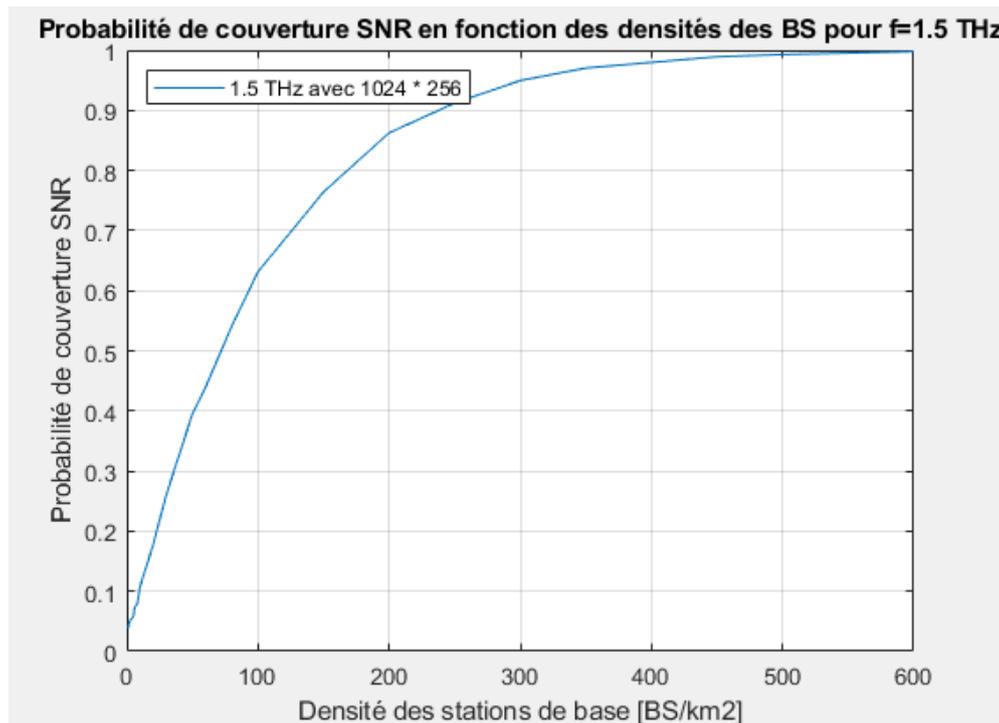


FIGURE 4.19 – Probabilité de couverture SNR en fonction des densités des BS pour  $f=1.5$  THz avec 1024\*256 antennes.

Avec une configuration différente d'antenne, 1024 éléments d'antenne à la station de base et 256 à l'appareil mobile. Pour une fréquence de 1,5 THz, on note que pour avoir une probabilité de couverture supérieure à 0.95, il faut 300 BS/km<sup>2</sup> (voir la figure 4.19). Ce résultat proche au résultat de 30 GHz (fréquence mmWave).

D'après les résultats de la Partie 02 et ceux de cette partie, On constate que la même configuration d'antenne ne garantit pas une performance adéquate en Téraherzt. Afin de régler le problème de grand affaiblissement de signal, les réseaux d'antennes comportant un plus grand nombre d'éléments d'antenne seront nécessaires pour les bandes de fréquences en

Térahertz.

## 4.5 Conclusion

Bien que les bandes THz aient un énorme potentiel pour leur utilisation dans les communications, leurs déploiements commerciaux présentent des défis importants. En particulier, la communication dans ces bandes souffre de mauvaises caractéristiques de propagation, d'une pénétration plus élevée, de pertes de blocage et de diffusion, d'une plage de couverture plus courte et d'un besoin de forte directivité dans la transmission, par rapport aux ondes millimétrique. Dans ce chapitre, on a calculé le rapport signal/bruit en fonction des fréquences Mmwave et ensuite pour les fréquences Thz, à différentes distances. Puis la probabilité d'avoir un SNR supérieur a zéro, en fonction de la densité des BS/Km<sup>2</sup>. D'après ce travail, on a conclu qu'il est nécessaire d'utiliser un grand nombre d'antennes du côté de l'émetteur et/ou du récepteur et de trouver une solution efficace pour éviter les blocages pour les ondes Térahertz.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Les systèmes radios mobiles de 5e génération attirent de plus en plus l'attention des chercheurs et des opérateurs ces dernières années. La technologie 5G promet une plus grande bande passante et des temps de latence faibles permettre de développer de nouveaux services. Une étude large et non-exhaustive sur la vision actuelle de future génération a été réalisée tout au long de ce mémoire. Poussés par les demandes hétérogènes du monde hyperconnecté, un nouveau paradigme de réseau est envisagé pour faciliter les applications émergentes. Les futures applications nécessiteront des débits de données de plusieurs centaines de gigabits par seconde, avec une faible latence et une fiabilité élevée, qui sont actuellement considérés comme les objectifs de conception des systèmes de communication de prochaine génération. Compte tenu du potentiel des systèmes de communication THz pour fournir de tels débits sur des courtes distances, ils sont actuellement considérés comme la prochaine frontière pour la recherche sur les communications sans fil.

L'objectif principal de notre travail réside dans la présentation de la 5G et la vision des réseaux futurs, en base sur l'étude des performances de la transmission en ondes térahertz.

Après le travail effectué, nous avons réussi à approfondir et à améliorer nos connaissances dans le domaine des réseaux mobiles cellulaires en particulier la 5G et la vision des réseaux futures, la communication térahertz et les différentes techniques de transmission. Nous avons également eu accès à l'ossature d'un programme destiné à la simulation des réseaux térahertz, que nous avons pu exploiter afin de vous offrir notre chapitre IV. Ou on a calculé le rapport signal/bruit en fonction des fréquences Mmwave et ensuite pour les fréquences Thz, à différentes distances. Puis la probabilité d'avoir un SNR supérieur a zéro, en fonction de la densité des BS/Km<sup>2</sup>.

D'après ce travail fait, on a conclu qu'il est nécessaire d'utiliser un grand nombre d'antennes pour les transmissions térahertz.

Il serait judicieux comme perspectives d'avenir d'approfondir notre étude sur d'autres paramètres de transmission THz et les simuler.

---

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] TONGYI HUANG, WU YANG, JUN WU, (Member, IEEE),JIN MA, XIAOFEI ZHANG, and DAOYIN ZHANG, "A Survey on Green 6G Network : Architecture and Technologies", School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China. Information Security Research Center, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211000, China. December 18, 2019
- [2] Ahmad, W. S. H. M. W., Radzi, N. A. M., Samidi, F. S., Ismail, A., Abdullah, F., Jamaludin, M. Z., Zakaria, M. (2020). 5G technology : Towards dynamic spectrum sharing using cognitive radio networks. IEEE Access, 8, 14460-14488
- [3] Hajri, S. E. (2018). L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs (Doctoral dissertation).
- [4] [https://www.digi.com/blog/post/5g-networkarchitecture?utm\\_source=subscribeutm\\_medium=rss](https://www.digi.com/blog/post/5g-networkarchitecture?utm_source=subscribeutm_medium=rss)
- [5] Mojtaba Vaezi · Zhiguo Ding,H. Vincent Poor Editors "Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond" Springer.
- [6] 3GPP TS 38.401 version 15.2.0 Release 15.
- [7] Gupta, A., Jha, R. K. (2015). A survey of 5G network : Architecture and emerging technologies. IEEE access, 3, 1206-1232.
- [8] Huawei 5G Spectrum Public Policy Position 2018.

- [9] livre : NG-RAN et 5G-NR : L'accès radio 5G et l'interface radioélectrique
- [10] Comparison between Performances of Channel estimation Techniques for CP-LTE and ZP-LTE Downlink Systems - Scientific Figure on ResearchGate. Available from : [https://www.researchgate.net/figure/Physical-Resource-Block\\_fig2\\_30648725](https://www.researchgate.net/figure/Physical-Resource-Block_fig2_30648725)[accessed 27 May, 2022]
- [11] S.Sébastien, "Les Enjeux De La 5G, " ARCEP, 2017.
- [12] J. M. and K. Thomas, "What Is Massive MIMO Technology?" [Online]. Available : <https://5g.co.uk/guides/what-is-massive-mimo-technology/>.
- [13] Livre-Blanc
- [14] La technologie 5G Beamforming est la clé des expériences de réseau et d'appareil par Sean Kinney, RCR Wireless 03/19
- [15] D. López-Pérez, I. Güvenç, G. De La Roche, M. Kountouris, T. Q. S. Quek, and J. Zhang, "Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 22–30, 2011.
- [16] T. Lte and G. P. P. Release, "LTE Technology Introduction White Paper," 2009.
- [17] International Telecommunications Union Radiocommunication Sector (ITU-R), "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," 2015.
- [18] P. P. Fellow, K. F. Trillingsgaard, and S. Member, "5G Wireless Network Slicing for eMBB , URLLC , and mMTC : A Communication-Theoretic View," *ArXiv e-prints*, 2018.
- [19] Ericsson, "5G systems : 5G for humans and machines : use cases and requirements," White Pap., vol. 284, no. rev B, pp. 3–5, 2017.
- [20] E. Markoval, D. Moltchanov, R. Pirmagomedov, D. Ivanova, Y. Koucheryavy et K. Samouylov, « Coexistence basée sur la priorité du trafic eMBB et URLLC dans les déploiements industriels 5G NR », dans Proc. IEEE 12e Int. Congr. UltraMod. Télécommun. Système de contrôle Ateliers (ICUMT), 2020, p. 1–6.
- [21] N. Mahmood, A. Munari, F. Clazzer et H. Bartz, « Communication de type machine critique et massive vers la 6G », 6G Res. Vis., Univ. Oulu, Oulu, Finlande, 2020
- [22] NH Mahmoudet coll., "Livre blanc sur la communication de type machine critique et massive vers la 6G", 2020. [En ligne]. Disponible : [arXiv :2004.14146](https://arxiv.org/abs/2004.14146).

- [23] W. Saad, M. Bennis et M. Chen, « Une vision des systèmes sans fil 6G : applications, tendances, technologies et problèmes de recherche ouverts », Réseau IEEE., vol. 34, non. 3, pp. 134–142, mai/juin. 2019.
- [24] F. Fang, Y. Xu, Q.-V. Pham et Z. Ding, "Conception économe en énergie des réseaux IRS-NOMA", IEEE Trans. Véh. Technol., vol. 69, non. 11, p. 14088–14092, novembre 2020.
- [25] C.-X. Wang, J. Huang, H. Wang, X. Gao, X. You et Y. Hao, « Mesures et modèles de canaux sans fil 6G : Tendances et défis », IEEE Véh. Technol. Mag., vol. 15, non. 4, p. 22–32, décembre 2020. [175] H. Yang, A. Alphones, Z. Xiong, D. Niyato, J. Zhao et K. Wu, "Réseaux 6G intelligents activés par l'intelligence artificielle", Réseau IEEE., vol. 34, non. 6, pp. 272–280, nov./déc. 2020.
- [26] H. Yang, A. Alphones, Z. Xiong, D. Niyato, J. Zhao et K. Wu, "Réseaux 6G intelligents activés par l'intelligence artificielle", Réseau IEEE., vol. 34, non. 6, pp. 272–280, nov./déc. 2020.
- [27] J. Chen, S. Li, J. Tao, S. Fu et GE Sobelman, "Modulation de faisceau sans fil : une technologie de communication économe en énergie et en spectre pour les futurs systèmes IoT massifs", Communication sans fil IEEE., vol. 27, non. 5, p. 60–66, octobre 2020.
- [28] SP Rout, "Communication sans fil 6G : sa vision, sa viabilité, son application, ses exigences, ses technologies, ses rencontres et ses recherches", dans Proc. IEEE 11e Int. Conf. Calcul. Commun. Réseau Technol. (ICCCNT), 2020, p. 1–8.
- [29] J. Navarro-Ortiz et coll., "Une enquête sur les scénarios d'utilisation et les modèles de trafic 5G", IEEE commun. Enquêtes Tuts., vol. 22, non. 2, pp. 905–929, 2e quart., 2020.
- [30] C.-X. Wang, J. Huang, H. Wang, X. Gao, X. You et Y. Hao, « Mesures et modèles de canaux sans fil 6G : Tendances et défis », IEEE Véh. Technol. Mag., vol. 15, non. 4, p. 22–32, décembre 2020
- [31] De Alwis, C., Kalla, A., Pham, Q. V., Kumar, P., Dev, K., Hwang, W. J., Liyanage, M. (2021). Survey on 6G frontiers : Trends, applications, requirements, technologies and future research. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2, 836-886.

- [32] Mahmoud HHH, Amer AA, Ismail T. 6G : A comprehensive survey on technologies, applications, challenges, and research problems. *Trans Emerging Tel Tech.* 2021 ;e4233. <https://doi.org/10.1002/ett.4233>
- [33] F. Tariq, M. R. Khandaker, K.-K. Wong, M. A. Imran, M. Bennis, and M. Debbah, “A speculative study on 6G,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 4, pp. 118–125, Aug. 2020.
- [34] Y. Siriwardhana, P. Porambage, M. Liyanage, and M. Ylinattila, “A survey on mobile augmented reality with 5G mobile edge computing : Architectures, applications and technical aspects,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, early
- [35] delkader Mekrache, Abbas Bradai, Emmanuel Moulay, Samir Dawaliby. Deep reinforcement learning techniques for vehicular networks : recent advances and future trends towards 6G. *Vehicular Communications*, Elsevier, In press, [ff10.1016/j.vehcom.2021.100398](https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2021.100398). [ffhal-03326474f](https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2021.100398)
- [36] CHAMITHA DE ALWIS, ANSHUMAN KALLA, QUOC-VIET PHAM, PARDEEP KUMAR, KAPAL DEV, WON-JOO HWANG, AND MADHUSANKA LIYANAGE. Survey on 6G Frontiers : Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research. Digital Object Identifier [10.1109/OJCOMS.2021.3071496](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3071496)
- [37] X. Xu, Y. Pan, P. P. M. Y. Lwin, and X. Liang, “3D holographic display and its data transmission requirement,” in *Proc. Int. Conf. Inf. Photon. Opt. Commun.*, 2011, pp. 1–4.
- [38] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6G networks : Use cases and technologies,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, Mar. 2020.
- [39] I. Petrov and T. Janevski, “5G mobile technologies and early 6G viewpoints,” *Eur. J. Eng. Res. Sci.*, vol. 5, no. 10, pp. 1240–1246, 2020
- [40] S. Nahavandi, “Industry 5.0—A human-centric solution,” *Sustainability*, vol. 11, no. 16, p. 4371, 2019.
- [41] K. A. Demir, G. Döven, and B. Sezen, “Industry 5.0 and human–robot co-working,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 158, pp. 688–695, 2019. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.104>
- [42] (2019). Robotic Surgery. Accessed : Mar. 29, 2021. [Online]. Available : <https://www.womencentre.com.au/robotic-surgery.html>

- [43] M. Park, S. Lee et S. Lee, « Protocole de reconstruction dynamique de la topologie pour la mise en réseau d'essaims de drones », *Symmetry*, vol. 12, non. 7, p. 1111, 2020.
- [44] MOSTAFA ZAMAN CHOWDHURY, MD. SHAHJALAL, SHAKIL AHMED, AND YEONG MIN JANG. 6G Wireless Communication Systems : Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions. Digital Object Identifier 10.1109/OJ-COMS.2020.3010270
- [45] B. Li, Z. Fei, and Y. Zhang, "UAV communications for 5G and beyond : Recent advances and future trends," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 2241–2263, Apr. 2019.
- [46] Q.-V. Pham, M. Zeng, R. Ruby, T. Huynh-The, and W.-J. Hwang, "UAV communications for sustainable federated learning," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, early access, Mar. 9, 2021, doi : 10.1109/TVT.2021.3065084.
- [47] T. Huang, W. Yang, J. Wu, J. Ma, X. Zhang et D. Zhang, « Une enquête sur le réseau 6G vert : architecture et technologies », *Accès IEEE*, vol. 7, p.175 758–175 768, 2019.
- [48] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, GK Karagiannidis et P. Fan, « Réseaux sans fil 6G : vision, exigences, architecture et technologies clés », *IEEE Véh. Technol. Mag.*, vol. 14, non. 3, p. 28–41, septembre 2019.
- [49] X. Fang, T. Wei, W. Feng, H. Wei, Y. Chen, N. Ge et C.-X. Wang, "5G Embraces Satellites for 6G Ubiquitous IoT : Basic Models for Integrated Satellite Terrestrial Networks," *préimpression arXiv arXiv :2011.03182*, 2020.
- [50] D. Zhou, K. Li, C. Wang, W. Wu et Y. Zhang, "Conception et mise en oeuvre d'un routeur à faible latence pour le réseau spatial", dans *Actes de la 4e conférence internationale IEEE 2019 sur le cloud computing et l'analyse des mégadonnées (ICCCBDA)*. IEEE, 2019, p. 454–459.
- [51] Y. Zeng, R. Zhang et TJ Lim, "Communications sans fil avec des véhicules aériens sans pilote : opportunités et défis", *Magazine des communications de l'IEEE*, vol. 54, non. 5, p. 36–42, 2016.
- [52] L. Gupta, R. Jain et G. Vaszkun, "Survey of important issues in UAV communication networks," *Enquêtes et didacticiels sur les communications IEEE*, vol. 18, non. 2, p. 1123–1152, 2015

- [53] Z. Zheng, AK Sangaiah et T. Wang, "Protocoles de communication adaptatifs dans un réseau ad hoc volant", Magazine des communications de l'IEEE, vol.56, non. 1, p. 136–142, 2018.
- [54] Tomkos, I., Klouididis, D., Pikasis, E., Theodoridis, S. (2020). Toward the 6G network era : Opportunities and challenges. IT Professional, 22(1), 34-38.
- [55] L. Loven, T. Leppanen, E. Peltonen, J. Partala, E. Harjula, P. Porrambage, M. Ylianttila, J. Riekkii, Edge Ai : une vision pour une intelligence artificielle distribuée et native Réseaux 6g, 1er sommet sans fil 6G, 2019, p. 1–2.
- [56] F. Tang, Y. Kawamoto, N. Kato, J. Liu, Futur réseau de véhicules intelligent et sécurisé vers la 6g : approches d'apprentissage automatique, Proc. IEEE.
- [57] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, M.-S. Alouini, Que devrait être 6g? Nat. Électron. 3 (1) (2020) 20–29.
- [58] EC Strinati, S. Barbarossa, JL Gonzalez-Jimenez, D. Ktenas, N. Cassiau, C. Dehos, 6g : the Next Frontier, arXiv Preprint arXiv :1901.03239.
- [59] X. Lin, J. Li, J. Wu, H. Liang et W. Yang, " Making knowledge trad able in edge-ai enabled IoT : A consortium blockchain-based efficient and incentive approach, " IEEE Trans. Ind. Informat., à paraître.
- [60] X. Ling, J. Wang, T. Bouchoucha, BC Levy et Z. Ding, "Réseau d'accès radio Blockchain (B-RAN) : Vers un paradigme d'accès radio sécurisé décentralisé", IEEE Access, vol. 7, p. 9714–9723, 2019.
- [61] S. Kiyomoto, A. Basu, MS Rahman et S. Ruj, « Sur l'architecture d'autorisation basée sur la blockchain pour les services mobiles au-delà de la 5G » , dans Proc. 12e Int. Conf. Technologie Internet. Trans. sécurisée. (ICITST), décembre 2017, pp. 136–141.
- [62] U. A. K. Chude-Okonkwo, R. Malekian, B. T. Maharaj, and A. V. Vasilakos, "Molecular communication and nanonetwork for targeted drug delivery : A survey," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 19
- [63] I. F. Akyildiz, M. Pierobon, S. Balasubramaniam, and Y. Koucheryavy, "The Internet of bio-nano things," IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 3, pp. 32-40, Mar. 2015

- [64] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao et S. Li, "Communications sans fil 6G : vision et techniques potentielles", Réseau IEEE, vol. 33, non. 4, p.70-75, juillet/août 2019.
- [65] | T. Haraguchi, "Méthodes et applications de la communication moléculaire mobile", Actes de l'IEEE, vol. 107, non. 7, pages 1442-1456, juillet 2019.
- [66] L. Gyongyosi, S. Imre, HV Nguyen, Une enquête sur les capacités des canaux quantiques, IEEE Commun. Surv. Tutoriels 20 (2) (2018) 1149–1205.
- [67] W. Zhang, D.-S. Ding, Y.-B. Sheng, L. Zhou, B.-S. Shi, and G.-C. Guo, "Quantum secure direct communication with quantum memory," Phys. Rev. Lett., vol. 118, no. 22, p. 220501, 2017.
- [68] T. Huang, W. Yang, J. Wu, J. Ma, X. Zhang et D. Zhang, "Une enquête sur le réseau 6G vert : architecture et technologies", Accès IEEE, vol. 7, pages 175758-175768, 2019.
- [69] MS Islam, RX Ferreira, X. He, E. Xie, S. Videv, S. Viola, S. Watson, N. Bamiedakis, RV Penty, IH White, et al., Vers une communication de lumière visible basée sur le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence de 10 gb/s à l'aide d'un microled violet gan, Photon. Rés. 5 (2) (2017) A35–A43.
- [70] J. Luo, L. Fan, H. Li, Systèmes de positionnement intérieur basés sur la communication par la lumière visible : état de l'art, IEEE Commun. Surv. Tutoriels 19 (4) (2017) 2871–2893.
- [71] S. Ucar, S. Coleri Ergen, O. Ozkasap, D. Tsonev, H. Burchardt, Secvlc : secure visible light communication for military vehicular networks, in : Actes du 14e ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access , 2016, p. 123–129
- [72] Elayan, H., Amin, O., Shubair, R. M., Alouini, M. S. (2018, April). Terahertz communication : The opportunities of wireless technology beyond 5G. In 2018 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet) (pp. 1-5). IEEE.
- [73] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, and C. Han, "TeraNets : ultra-broadband communication networks in the terahertz band," IEEE Commun. Mag., vol. 21, no. 4, pp. 130–135, Aug. 2014.
- [74] YANG, Y., WU, T. V., SEMPEY, A., PRADERE, C., SOMMIER, A., BATSALE, J. C. Methods of terahertz radiation and flat thermal probes for the non-destructive examination of thick walls for the thermal diagnosis of buildings.

- [75] M. Hasan, S. Arezoomandan, H. Condori, et B. Sensale-Rodriguez, "Graphene terahertz devices for communications applications," *Nano Comm. Net.* , vol. 10, pp. 68-78, 2016.
- [76] J. M. Jornet et I. F. Akyildiz, "Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band," *IEEE Trans. Commun.* vol. 10, no. 10, pp. 3211-3221, oct. 2011.
- [77] Rapport UIT-R SM.2352-0 (06/2015).Orientations technologiques des services actifs dans la gamme de fréquences 275-3 000 GHz Série SM Gestion du spectre Egalement disponible en ligne : <http://www.itu.int/publ/R-REP/fr>.
- [78] Y. Zeng, R. Zhang, et T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles : opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.* , vol. 54, no. 5, pp. 36-42, mai 2016
- [79] Y. Cui, H. Wang, X. Cheng, et B. Chen, "Wireless data center networking," *IEEE Commun. Mag.* , vol. 18, n° 6, pp. 46-53, déc. 2011.
- [80] D. Halperin, S. Kandula, J. Padhye, P. Bahl et D. Wetherall, "Augmenting data center networks with multi-gigabit wireless links," in *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* , vol. 41, no. 4. ACM, 2011, pp. 38- 49.
- [81] C. Jiang, H. Zhang, Y. Ren, Z. Han, K. C. Chen, et L. Hanzo, "Machine learning paradigms for next-generation wireless networks," *IEEE Commun. Mag.* vol. 24, n° 2, p. 98-105, avril 2017.
- [82] G. Alnwaimi, S. Vahid et K. Moessner, "Dynamic heterogeneous learning games for opportunistic access in lte-based macro/femtocell deployments", *IEEE Trans. Commun.* vol. 14, no. 4, pp. 2294-2308, avril 2015.