

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En : TELECOMMUNICATIONS**

**Spécialité : Réseaux et Télécommunications**

**Par : EL-HACI Zineb**

### **Sujet**

**Modélisation d'un réseau MIMO-mmWave dans l'environnement Simulink**

Soutenu publiquement, le 12/09/2020, devant le jury composé de :

Mr. BENDIMERAD Fethi Tarik	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr. MERIAH Sidi Mohammed	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
Mr. BOUSAHLA Miloud	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur
Mr. DERREZ Fouad	MCB	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr Taleb-Ahmed Abdelmalik	Professeur	Univ. Valenciennes	Co-Directeur de mémoire
Mr Dayoub Iyed	Professeur	Univ. Valenciennes	Invité

Année universitaire : 2019/2020

## *Dédicaces*

### *Je dédie ce travail*

#### *A la mémoire de mon père Elhaci Abderrahmane*

*A la personne la plus chère à mon cœur qui a sacrifié toute sa vie pour la réussite de ses enfants et pour les voir dans les rangs supérieurs. En ce jour-là, je réalise l'un de ses souhaits, et j'espère être à la hauteur de sa confiance en moi et être fier de ce succès.*

*Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation. Que Dieu ait ton âme dans sa sainte miséricorde.*

#### *A ma très chère mère Zoubida*

*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.*

*Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

#### *A mon très cher Mari Mustapha*

*Quand je t'ai connu, j'ai trouvé l'homme de ma vie qui a été toujours à mes côtés dans tous les moments.*

*Tes sacrifices, ton soutien moral et matériel, ta gentillesse sans égal, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études.*

*Sans ton aide, tes conseils et tes encouragements ce travail n'aurait vu le jour. Que dieu nous réunisse pour un long chemin commun et serein. Reçoit ce travail un témoignage de ma profonde reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.*

#### *A mon cher frère Mohammed salah eddine*

*En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je te souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, te protège et te garde.*

#### *A mes chères sœurs Safia, Ihssene et Yassmine*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, Votre joie et votre gaieté ne comblent de bonheur.*

*Puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser à vote tour vos vœux les plus chers.*

***A ma chère belle famille, beau-père, belle mère, mes belles-sœurs et mes beaux-frères***

*Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.*

***A Mes amies de toujours : Ahlem, Wafaa, Soria,***

*En souvenir de notre sincère et profond amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.*

*Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.*

*Une spéciale dédicace pour un couple qui compte déjà énormément pour moi, et pour qui je porte beaucoup de tendresse et de respect a :*

***Mon oncle Djawed et sa femme Hayet sans oublier la petite qui va venir bientôt au monde.***

*Mme. EL-HACI Zineb*

## *Remerciement*

*Tout d'abord nous adressons nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers ALLAH, le clément et le miséricordieux, lequel nous a accordé la force et le courage de mener bien ce modeste travail.*

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

*En second lieu, à mon encadreur Monsieur DERRAZ FOUAD, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail. Mes plus grands remerciements vont à Monsieur TALEB – AHMED ABDELMALIK et Monsieur DAYOUB IYAD pour leur aide, aussi à mes professeurs qui tout au long de mon cursus m'ont appris que le goût de la constance dans le travail scientifique est la clef de tout succès.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes recherches en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*En fin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## *Résumé*

Les technologies basées sur les MIMO ont montré leur efficacité permettant améliorer les performances des systèmes de télécommunication sans fil actuels (i.e. 4G) et futurs (i.e. 5G et au-delà). Outre la robustesse, les MIMO permettent d'augmenter l'efficacité spectrale. La bande millimétrique (au-delà de 6 Gbit/s) et les systèmes aux longueurs d'onde millimétriques (mmWave) sont pressentis comme une solution prometteuse pour les futurs réseaux de télécommunication sans fil 5G. Avec la bande passante « très large » disponible, la longueur d'onde « très petites par rapport à la bande radio fréquence actuellement utilisée pour les systèmes de télécommunications », permet d'utiliser et d'intégrer un nombre conséquent d'antennes « dizaines voire centaines constituant ainsi un système MIMO massif » à un terminal mobile. Ainsi, associer les MIMO massifs à la bande millimétrique s'avère très intéressant afin de répondre aux problèmes des réseaux denses et hétérogènes.

Ce projet d'étude a pour objectif de modéliser une chaîne de transmission MIMO basée sur la technologie mmWave, à savoir l'étude de la chaîne de transmission dans la bande millimétrique.

**Mots clés :** 5G, onde millimétriques (mmWave), MIMO, antennes intelligentes.

## *Abstract*

Technologies based on MIMO have been shown to be effective in improving the performance of current wireless telecommunications systems (i.e. 4G) and future (i.e. 5G and beyond). In addition to robustness, MIMOs can increase spectral efficiency.

The millimeter band (beyond 6 Gbit / s) and systems at wave lengths millimeter (mmWave) are seen as a promising solution for futur 5G wireless telecommunications networks. With the "very wide" band width available, the "very small" wave length compared to the radio frequency band currently used for telecommunications systems ", allows the use and to integrate a significant number of antennas "tens or even hundreds constituting thus a massive MIMO system" to a mobile terminal. Thus, associating massive MIMOs with the millimeter band is very interesting in order to respond to the problems of dense and heterogeneous networks.

This study project aims to model a MIMO transmission chain based on mmWave technology, namely the study of the transmission chain in the millimeter band.

**Keywords:** 5G, mmWave, MIMO, Smart antennas.

## *Abstract*

Technologies based on MIMO have been shown to be effective in improving the performance of current wireless telecommunications systems (i.e. 4G) and future (i.e. 5G and beyond). In addition to robustness, MIMOs can increase spectral efficiency.

The millimeter band (beyond 6 Gbit / s) and systems at wave lengths millimeter (mmWave) are seen as a promising solution for futur 5G wireless telecommunications networks. With the "very wide" band width available, the "very small" wave length compared to the radio frequency band currently used for telecommunications systems ", allows the use andto integrate a significant number of antennas "tens or even hundreds constituting thusa massive MIMO system"to a mobile terminal. Thus, associating massive MIMOs with the millimeter band is very interesting in order to respond to the problems of dense and heterogeneous networks.

This study project aims to model a MIMO transmission chain based on mmWave technology, namely the study of the transmission chainin the millimeter band.

**Keywords:** 5G, mmWave, MIMO, Smart antennas.

## ملخص

وقد أظهرت تقنيات الإدخال المتعدد والإخراج المتعدد (MIMO) فعاليتها في تحسين أداء أنظمة الاتصال اللاسلكية الحالية (i.e. 4G) والمستقبلية (الجيل الخامس وما بعده). تساعد تقنية الإدخال المتعدد والإخراج المتعدد (MIMO) المرنة على زيادة الفعالية الطيفية.

أما النطاق الترددي العريض (الذي يتجاوز 6 جيجابت في الثانية) والأنظمة ذات النطاق الترددي العريض (Waf) فقد تم إستشعار ذلك باعتباره حلاً واعدًا لشبكات الاتصالات اللاسلكية ذات الجيل الخامس في المستقبل. فالنطاق الترددي العريض المتاح "الواسع جدًا" يتيح طول الموجة "الصغيرة جدًا" مقارنة مع النطاق الترددي الحالي لنظم الاتصالات السلكية واللاسلكية" إمكانية إستخدام عدد كبير من الهوائيات ودمج عدد كبير من "العشرات من الهوائيات التي تعمل بتقنية الإدخال المتعدد والإخراج المتعدد (MIMO) على نطاق ترددي عريض للغاية في جهاز محمول. وبالتالي ربط MIMO الهائلة ب عرض المليمترية الكبير مهم جدًا في حل مشاكل الشبكات الكثيفة وغير المتجانسة. ويهدف مشروع الدراسة إلى وضع نموذج لسلسلة من الاتصالات بتقنية الإدخال المتعدد والإخراج المتعدد (MIMO) القائمة على تقنية Wave وهي دراسة خط النقل في الشريط المليمترية.

الكلمات الرئيسية: G5، موجة (m) mmWave، MIMO، هوائيات ذكية.

# Table des matières

<i>Dédicaces</i> .....	I
<i>Remerciement</i> .....	III
<i>Résumé</i> .....	IV
<i>Abstract</i> .....	V
ملخص .....	VI
<i>Liste des tables</i> .....	XI
<i>Liste des abréviations</i> .....	XIII
<i>Introduction générale</i> .....	1
<b>Chapitre I</b> .....	<b>Revu de la technologie 5G et au-delà</b>
I.1 Introduction.....	4
I.2 Les objectifs de la 5G.....	4
I.3 Technologie 5G.....	5
I.4 Applications de 5G .....	5
I.5 L'architecture des réseaux 5G.....	5
I.5.1 Les Services Innovants (SI) .....	6
I.5.2 La Plate-forme de Validation (PV).....	6
I.5.3 La Radio Hyper-Connecté.....	6
I.6 La couche physique .....	6
I.7 Technologies clés pour la 5G.....	7
I.7.1 Massive MIMO (Multiple Inputs-Multiple Output) .....	7
I.7.2 Communications à ondes millimétriques .....	7
I.7.3 Formes d'ondes de la 5G.....	8
I.8 Comparaison entre les performances de la 4G et de la 5G : .....	8
I.9 Les défis de la 5G.....	10
I.9.1 Défis technologiques.....	10
I.9.1.1 Interférence Inter-cellule .....	10
I.9.1.2 Contrôle d'accès moyen efficace .....	10
I.9.1.3 Gestion du trafic.....	10
I.9.2 Défis communs.....	10
I.9.2.1 Services multiples.....	10
I.9.2.2 Infrastructure .....	11
I.9.2.3 Communication et Navigation .....	11
I.9.2.4 Sécurité et confidentialité .....	11
I.9.2.5 Législation des lois informatiques.....	11
I.10 La 5G au niveau mondial .....	11
I.10.1 Etats-Unis d'Amérique .....	11

I.10.2	Japon .....	12
I.10.3	Chine .....	12
I.10.4	Corée .....	12
I.10.5	La 5G au niveau européen .....	12
I.11	Les avantages et les inconvénients de la 5G .....	12
I.11.1	Avantages.....	12
I.11.2	Inconvénients.....	13
I.12	Conclusion .....	13
<b>Chapitre II</b>		
<b>Les communications millimétriques pour la 5G</b>		
II.1	Introduction.....	14
II.2	Rappel sur les technologies de modulation pour la 5G .....	14
II.2.1	La modulation par déplacement de phase (PSK).....	14
II.2.2	La modulation par déplacement de Fréquence (FSK).....	16
II.2.3	La modulation d’amplitude de deux porteuses en quadrature (QAM).....	17
II.3	Multiplexage par répartition orthogonale par fréquence .....	18
II.3.1	Principe de l’OFDM .....	18
II.3.2	Modulation et démodulation OFDM .....	18
II.3.3	Orthogonalité.....	20
II.3.4	Extension cyclique.....	20
II.4	Les système MIMO & Massive MIMO .....	21
II.5	Architectures réseau et techniques multi- cellulaires coopératives.....	22
II.5.1	Réseaux hétérogènes (HetNets) .....	22
II.5.2	Small Cells .....	23
II.5.3	ICIC (Inter Cell Interference Coordination) .....	23
II.5.4	CoMP (Coordinated Multi-Point).....	24
II.5.5	Résumé des points forts des architectures hétérogènes : .....	25
II.6	Longueurs d’onde millimétriques (Mmwave).....	25
II.6.1	Application aux systèmes Massive MIMO .....	26
II.6.1.1	Avantages .....	26
II.6.1.2	Inconvénients .....	26
II.7	Conclusion .....	27
<b>Chapitre III</b>		
<b>Système millimétriques d’architecture hybride Transmitter / Receiver</b>		
<b>Partie 1 : Caractéristiques générales des systèmes Massive MIMO.....</b>		<b>28</b>
III.1.1	Introduction .....	28
III.1.2	Canal de propagation et notations .....	28
III.1.2.1	Notation.....	29
III.1.3	Antennes et propagation .....	29
III.1.3.1	Réseaux d’antennes.....	30

III.1.3.2	Antennes Intelligentes et formation du faisceau (beamforming).....	33
III.1.4	Précodage et Formation du faisceau .....	35
III.1.4.1	Les différents précodeurs linéaires .....	35
III.1.5	Capacité.....	37
III.1.5.1	Formule générale.....	37
III.1.5.2	MU-MIMO versus MIMO point-à-point : .....	38
III.1.5.3	Impact du pré codage sur la capacité.....	40
Partie 2 :	Massive MIMO versus Hybride Numérique et Analogique .....	41
III.2.1	Beamforming Hybride Numérique et Analogique .....	42
III.2.1.1	Modèle du système .....	42
III.2.1.2	Performances d'un système hybride.....	43
III.2.2	Massive MIMO avec terminaux directifs .....	44
III.2.2.1	Description.....	45
III.2.2.2	Généralisation à tous réseaux d'antennes 3D.....	45
III.2.3	Comparaison entre systèmes Hybride et Massive MIMO avec terminaux directifs ..	45
III.1	Conclusion.....	46
<b>Chapitre IV</b>		
	<b>Simulation et résultats</b>	
IV.1	Introduction.....	46
IV.2	Conception et Simulation du Réseau d'antennes pour la Bande des 28 GHz.....	46
IV.2.1	Conception de l'antenne patch résonante à 28 GHz .....	46
IV.2.1.1	Structure de l'antenne.....	46
IV.2.1.2	Conception de l'alimentation .....	48
IV.2.1.3	Résultats et discussions .....	48
IV.2.2	Mise en place de réseaux d'antennes pour la bande des 28 GHz à partir de l'élément précédemment conçu .....	54
IV.2.2.1	Structure de réseau d'antenne 2x1 .....	55
IV.3	Modélisation de la chaine de transmission mmWave .....	60
IV.3.1	Description du modèle.....	60
IV.3.1.1	QPSK Transmitter.....	62
IV.3.1.2	RF .....	62
IV.3.1.3	Transmit Array Beamformers .....	63
IV.3.1.4	Transmit subarray.....	64
IV.3.1.5	Receive Array.....	64
IV.3.1.6	QPSK Receiver.....	65
IV.3.2	Extension de la chaine de transmission .....	66
IV.3.2.1	QAM-4 Transmitter (1 <sup>er</sup> extension ) .....	66
IV.3.2.1	RF Transmitter (2eme extension).....	67
IV.3.2.3	Transmit subarray (3 iem extension) (4x16) .....	68

IV.4 Conclusion .....	69
<i>Conclusion générale</i> .....	70

## *Liste des tables*

Tableau I- 1: les performances attendues de la 5G .....	9
Tableau IV- 1: Dimensions de l'antenne patch .....	47
Tableau IV- 2: Paramètres fondamentaux de l'antenne patch dans la fréquence 28GHz.....	54
Tableau IV- 3: paramètres du réseau d'antennes patch2x1. ....	55
Tableau IV- 4: Paramètres fondamentaux de réseau d'antennes 2x1.....	60

## *Liste des figures*

Figure I- 1: Les objectifs de la 5G [3] .....	5
Figure I- 2: Un système MIMO [15] .....	7
Figure I- 3: Comparaison entre la 4G et la 5G [19].....	9
Figure I- 4: Les défis communs [23] .....	11
Figure II- 1: Onde de la sortie du modulateur (PSK) .....	16
Figure II- 2: Modulation FSK d'une trame .....	16
Figure II- 3: Schéma bloc de la modulation d'impulsion en amplitude (MIA) classique.....	17
Figure II- 4: Schéma bloc de la modulation en quadrature QAM (une voie sinus et une voie cosinus).....	18
Figure II- 5: Spectre OFDM [34].....	19
Figure II- 6: Emetteur OFDM basé sur une IFFT [34].....	19
Figure II- 7: Récepteur OFDM basé sur une FFT [34] .....	20
Figure II- 8: Principe du préfixe cyclique [34].....	21
Figure II- 9: Système Massive MIMO en transmission multi-utilisateurs [36].....	21
Figure II- 10: Réseau hétérogène composé d'une macro cellule (plus ses relais et RRH) et de plusieurs Small Cells permettant de soulager le trafic de données de la macro cellule [42]. ....	23
Figure II- 11: Transmission Conjointe .....	24
Figure II- 12: Coordinated Beamforming/Coordinated Scheduling. ....	25
Figure III- 1: présentation des canaux en MIMO point-à-point et multi-utilisateurs. ....	29
Figure III- 2: Structure d'un réseau d'antennes, chaque chaîne RF subissant un déphasage et/ou une atténuation nécessaire à l'obtention du diagramme de rayonnement désiré .Si un contrôle dynamique est implémenté (blocs bleu), on appelle ces systèmes des Smart Antenna.....	30
Figure III- 3: Facteur d'un réseau linéaire uniforme a) 4 éléments , b) 8 éléments .....	31
Figure III- 4: Illustration du diagramme de rayonnement résultant du produit de 2 diagrammes, celui du facteur de réseau et celui de l'élément rayonnant individuel. ....	32
Figure III- 5: Beamforming analogique.....	34
Figure III- 6: Technique d'accès SDMA-beamforming multi-utilisateurs .....	35
Figure III- 7: Structure d'un réseau d'antennes avec précodage. ....	36
Figure III- 8: Illustration du rayonnement d'un système point-à-point et d'un système multi-utilisateur. ....	38
Figure III- 9: Illustration de l'impact du pré codeurs sur le rayonnement du réseau d'antenne. ....	39
Figure III- 10: Impact du digramme de rayonnement sur les performances de chaque utilisateur dans un exemple de canal purement LOS.....	41
Figure III- 11: Système Hybride Numérique et Analogique.....	43
Figure III- 12: Comparaison des performances entre un système hybride à:.....	44

Figure III- 13: Structure d'un réseau d'antennes multicouches chaque antenne un déphasage adapté.....	45
Figure IV- 1: Un patch Micro -ruban.....	47
Figure IV- 2: le modèle de l'antenne patch .....	48
Figure IV- 3: Variation de S11 en (dB) en fonction de la fréquence .....	49
Figure IV- 4: VSWR en fonction de la fréquence.....	49
Figure IV- 5: Diagramme de rayonnement (Gain réalisé) de l'antenne patch.....	50
Figure IV- 6: Diagramme de rayonnement (directivité) de l'antenne patch.....	50
Figure IV- 7: Diagramme de rayonnement en 2D ( $\phi=0^\circ$ ) de l'antenne patch.....	50
Figure IV- 8: Diagramme de rayonnement en 2D ( $\phi=90^\circ$ ) de l'antenne patch.....	51
Figure IV- 9: Efficacité totale de l'antenne patch.....	51
Figure IV- 10: (Gain- Directivité) (dB) de l'antenne patch.....	52
Figure IV- 11: Courant de surface de l'antenne patch.....	52
Figure IV- 12: La directivité de l'antenne patch.....	53
Figure IV- 13: Le gain de l'antenne patch.....	53
Figure IV- 14 Le code du patch rectangulaire .....	54
Figure IV- 15: S11 en (dB) en fonction de la fréquence.....	55
Figure IV- 16: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.....	56
Figure IV- 17: Diagramme de rayonnement (Gain réalisé) de réseau d'antenne 2x1.....	56
Figure IV- 18: Diagramme de rayonnement (directivité) de réseau d'antenne 2x1.....	57
Figure IV- 19: Diagramme de rayonnement ( $\phi=0^\circ$ ) de réseau d'antenne 2x1.....	57
Figure IV- 20: Diagramme de rayonnement ( $\phi=90^\circ$ ) de réseau d'antenne 2x1.....	57
Figure IV- 21: Efficacité totale de réseau d'antenne 2*1.....	58
Figure IV- 22: Efficacité totale de réseau d'antennes 2x1.....	58
Figure IV- 23: Courant de surface de réseau d'antenne 2x1.....	58
Figure IV- 24: La directivité de réseau d'antennes 2x1.....	59
Figure IV- 25: Le gain de réseau d'antenne 2x1.....	59
Figure IV- 26: Chaîne de transmission mmWave.....	61
Figure IV- 27: Spectre des signaux d'entrée et de sortie de la chaîne.....	62
Figure IV- 28: Chaîne de l'émission QPSK.....	62
Figure IV- 29: Les blocs de RF Transmitter.....	63
Figure IV- 30: Les blocs de l'émission des faisceaux.....	63
Figure IV- 31: Transmission des sous-porteuses.....	64
Figure IV- 32: Receive Array.....	65
Figure IV- 33: Chaîne de réception QPSK.....	65
Figure IV- 34: Le signal d'entrée pour le décodeur QPSK.....	66
Figure IV- 35: La chaîne de transmission millimétrique.....	66
Figure IV- 36: Chaîne de l'émission QAM-4.....	67
Figure IV- 37: Les blocs de RF Transmitter (8x8).....	67
Figure IV- 38: Transmission des sous porteuses 4x16.....	68

## *Liste des abréviations*

3G	3rd Generation.
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project (3GPP).</i>
4G	4th Generation
5G	5th Generation.
5G-PPP	5G Public Private Partnership.
ADC	Analogue to Digital Converter.
API	Application Programming Interfaces
ASK	Amplitude Shift Modulation
BER	The bit Error Rate
BFSK	binary FSK.
CAN	Controller Area Network
CB	Coordinated Beamforming
CB	Conjugate Beamforming
CDMA	Code Division Multiple Access
CoMP	Coordinated Multi-Point
CP	Cyclic Prefix .
CS	Coordinated Scheduling
DBS	Digital Beam steering .
DoA	Date of Announcement.
e ICIC	Enhanced ICIC.
FBMC	Multi-carrier modulation based on filter banks
FDD	Frequency Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFC	Federal Communications Commission,
FFT	<i>Fast Fourier Transform.</i>
F-OFDM	Filtered OFDM
FSK	Frequency Shift Modulation
GFDM	Generalized Frequency division Multiplexing
ICIC	The Coordination of Intercellular Interference
IEP	Interference between carriers ( Interférence entre porteuses).
IES	Interferences Between Symbols
<i>IFFT</i>	<i>Inverse Fast Fourier Transform.</i>
IoT	Internet of Things
IQ Modulation	Quadrature Amplitude Modulation.
ISI	Inter symbol Interference
LOS	Loss of Signal
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine
Mbps	Megabit per second.
MDP	Magellan Data Provider
MIA	Modulation of a Series of Periodic Pulses
MIMO	Multiple Inputs-Multiple Output
MMSE	Minimum Mean Square Error
Mmwave	Millimeter Wave
MVDR	Minimum Variance Distortionless Response
NFV	Network Functions
NLOS	<i>Non-line-of-Sight (NLOS) .</i>

NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NRZ	No-Return-to-Zero
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
$P_e$	Constant Transmit Power
PEC	Perfect electric Conductor.
PSK	Phase Shift Modulation
PV	Validation Platform.
QAM	Amplitude Modulation of Two Quadrature Carriers
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAN	Radio Access Networks
RAT	Radio Access Technologies
RF	Radio-Frequency channel
RRH	Remote Radio Head
SB	Base Station.
SB	The Base Station
SCMA	Sparse Code Multiple Access
SDMA	Space Division Multiple Access.
SDN	Software Defined Networking
SI	Innovative Service.
SIR	Selective Information Retrieval
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
SNR	Signal-To-Noise.
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TDD	Time Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access.
TOS	<i>Standing wave rate.</i>
TX/RX	Transmitter and Receiver.
UC	Central Unit.
UFMC	Universal Filtered Multi-Carrier
VSWR	voltage <i>standing wave ratio.</i>
ZF	Zero Forcing

## *Introduction générale*

Depuis deux décennies, l'évolution des réseaux de télécommunications a connu un essor phénoménal. L'augmentation du nombre de services en plus de la voix tel que le multimédia (SMS, emails, web, télévision, géo localisation) a créé un engouement important pour ce moyen de communication. L'émergence de nouveaux standards de télécommunications assurant un débit et une couverture plus importants est donc une étape clé dans l'amélioration des services et de la qualité proposés.

La première génération de réseau radio, n'assurait qu'un service voix dont la capacité était limitée et où les terminaux étaient volumineux. Ils n'étaient plus adaptés à l'arrivée des nouveaux services et souvent leurs utilisations sont limitées. Le déploiement du réseau s'est basé sur des cellules dont la configuration était omnidirectionnelle. L'inconvénient principal de cette solution est la multiplication du nombre de stations et par conséquent un coût très élevé. C'est pourquoi les stations ont très vite basculé vers une configuration tri-sectorielle. La même zone couverte est ainsi passée de trois stations à une seule.

La deuxième génération a bénéficié de la numérisation de la voix sur les réseaux radio cellulaires et est apparue au début des années 90 avec la norme GSM. La norme GSM, adoptée par un grand nombre de pays dans le monde, est basée sur l'interopérabilité et a permis une réduction considérable des coûts, et a fait de cette technologie une réussite industrielle, permettant l'accès d'un grand nombre d'utilisateurs au service voix à un prix raisonnable.

Largement déployé, le réseau GSM va connaître les premières saturations. D'un point de vue antenne, le déploiement de la 2G n'utilisait que deux bandes de fréquences et les antennes associées étaient relativement simples à concevoir. Le déploiement des stations de base était relativement aisé grâce au choix de la configuration tri-sectorielle et plusieurs antennes pouvaient être installées sur le même secteur dans le but de créer de la diversité et améliorer les bilans de liaison avec les mobiles.

Un nouveau standard vient prendre la relève via la troisième génération : l'UMTS. Au début de l'an 2000, la 3G a été déployée et a permis d'assurer de meilleurs débits. Le haut débit mobile et les visioconférences se répandent dans les usages quotidiens. Basé sur la même architecture de réseau que le GSM, l'UMTS va connaître des latences importantes. Le standard 3G n'est pas le plus adapté pour des données volumineuses et les équipements associés sont chers et lourds à manipuler. Des ralentissements apparaissent, les usages croissants vont également saturer les rares canaux disponibles par les opérateurs. Le passage d'une architecture verticale à une architecture horizontale permet de réduire les latences. L'ajout de la 3G sur les stations de base a rendu les spécifications des antennes panneaux plus difficiles à obtenir puisque ce standard a introduit de nouvelles bandes de fréquences.

Des travaux ont été nécessaires par les fabricants afin de répondre aux besoins de bandes et de standards multiples plus importants que la 2G seule. L'usage d'antennes le plus multi-bandes possible est exigé par les opérateurs puisque les stations déjà existantes ont vu leur coût d'exploitation augmenté causé par le nombre croissant d'antennes installées. La mise en place de la diversité de polarisation a également apporté des avantages indéniables aux opérateurs.

En 2012, la 4G (LTE) est déployée pour le grand public en se basant sur l'utilisation de ce protocole et assure des débits toujours plus importants en ayant mis en place une rupture technologique et architecturale du réseau.

Chaque ajout de standard permet de diminuer le niveau de saturation des standards précédents. Ceci a été particulièrement vrai lors de l'arrivée de la 3G puis de la 4G. La bande passante proposée aux utilisateurs est alors élargie et le nombre de services disponibles est étendu. Cependant, les standards cohabitent et obligent les opérateurs à maintenir le maximum de qualité pour chacun d'entre eux. Ceci a pour conséquence des coûts de déploiement importants et de maintien en conditions opérationnelles complexes.

L'apparition de limites technologiques avec l'arrivée de chaque nouveau standard a montré la nécessité de concevoir de nouvelles antennes panneaux plus adaptées à ces évolutions tout en conservant les standards précédents. Les antennes de stations de base ont alors subi de lourdes modifications pour faire coexister tous ces nouveaux standards.

Les conditions opérationnelles des opérateurs montrent aujourd'hui que les solutions apportées par les fabricants ont toutes des limitations non négligeables et difficilement acceptables par les opérateurs et l'arrivée du nouveau standard 5G d'ici la fin de la décennie n'arrange en rien leur situation. Pour y remédier à ces difficultés, plusieurs solutions sont proposées et les opérateurs requièrent de plus en plus des antennes compactes permettant une intégration facile en environnement urbain tout en répondant aux exigences des futurs standards : gain, bande passante, qualité des diagrammes de rayonnement.

Récemment, une partie du spectre électromagnétique connu sous le nom bande millimétrique qui a été suggéré pour une utilisation dans la 5G, où plusieurs GHz de cette partie du spectre peut être utilisé pour fournir des commandes élevées de la taille des données pour les utilisateurs de téléphones mobiles, peuvent également prendre en charge les connexions entre les petites cellules dans ces fréquences, il existe un large spectre disponible, car il n'est pas utilisé actuellement. Les fréquences 28, 38, 71-76 et 81-86 GHz sont les plus confortables dans ce segment du spectre, selon des mesures récentes. En raison des faibles longueurs d'onde de mmWave, des antennes de grande capacité peuvent être fabriquées dans les deux petits appareils portables comme dans les stations de base.

Notre recherche vise à étudier la communication de cinquième génération et le champ d'étude des formes d'antennes d'ondes millimétriques. Pour se conformer au problème de la recherche, l'objectif suivant est proposé en général : Mise en œuvre des bandes d'antenne dans la bande des 28 GHz pour une utilisation potentielle en 5G. Afin de résoudre le problème de

recherche et atteindre l'objectif global, les recherches se trouvant dans la littérature proposent sur les objectifs spécifiques suivants.

Caractériser le ruban millimétrique et les antennes micro-ondes, et déterminer les propriétés qui permettent de les utiliser en 5G.

Rechercher une bande de 28 GHz et des réseaux d'antennes pour cette bande, indiquant la possibilité d'effectuer en 5G.

Identifier les paramètres de base des antennes et des types d'antennes utilisés pour les gammes de fréquences millimétriques.

Décrivez les outils qui seront utilisés pour simuler des antennes pour des ondes millimétriques.

Parmi les objectifs spécifiques proposés, les questions scientifiques suivantes se posent : Quelles sont les propriétés de la gamme millimétrique et les antennes qui déterminent leur utilisation en 5G ? Quelle est la recherche dans la bande des 28 GHz et les arrangements d'antennes pour cette bande, qui démontrent leur mise en œuvre potentielle dans la 5G ? Quels sont les paramètres de base des antennes et des types d'antennes utilisés pour la fréquence millimétrique et quelles sont les antennes les plus couramment utilisées ? Quels instruments sont utilisés pour simuler des antennes pour des ondes millimétriques ? Comment implémenter un réseau d'antennes pour la bande des 28 GHz, en utilisant MATLAB 2019 ?

Pour atteindre les objectifs fixés, le présent manuscrit de recherche a été organisé autour de : d'une introduction générale, quatre chapitres, conclusions générales.

Dans le premier chapitre nous allons donner une présentation succincte des réseaux mobiles 5G, nous rappelons les concepts de couche physique, son architecture, ses objectifs et on termine par ses avantages et ses inconvénients.

Dans deuxième chapitre, nous nous concentrons la présentation des concepts des communications millimétriques pour la 5G, aussi sur l'architecture réseau et techniques multi-cellulaires coopératives ensuite, nous introduisons le formalisme de longueurs d'ondes millimétriques (Mmwave) et nous terminons ce chapitre par un aperçu des applications possibles aux systèmes Massive MIMO.

Dans le troisième chapitre, nous présentons l'architecture d'un système de communication millimétrique, dans la première partie nous présentons les Caractéristiques générales des systèmes Massive MIMO, canal de propagation, antennes et propagations, ensuite nous introduisons le Précodage et le beamforming. La deuxième partie est consacré au Massive MIMO versus Hybride Numérique et Analogique avec une étude des Performances d'un système hybride, aussi une Généralisation à tous réseaux d'antennes 3D etc....

Et à la fin au niveau du quatrième chapitre, nous discutons les résultats de simulation d'un système de communication millimétrique.

# Chapitre I : REVU DE LA TECHNOLOGIE 5G ET AU-DELA

## ***1.1 Introduction***

Actuellement, la technologie 5G veut se présenter comme une génération de rupture, qui ne s'intéresse plus uniquement au monde des opérations de téléphonie mobile et des communications grand public, mais qui ouvre de nouvelles perspectives et permet la cohabitation d'applications et usages extrêmement diversifiés, unifiés au sein d'une même technologie. La 5G se propose comme une interface pour faciliter la numérisation de la société et de l'économie [1] [2]. L'idée qui commence à se forger derrière la notion 5G est que celle-ci ne correspondrait pas à une simple augmentation des débits, comme cela a été le cas pour les précédentes générations.

Les communications mobiles grand public, le téléchargement de vidéos et l'utilisation d'applications mobiles représentent l'essentiel de l'utilisation actuelle des ressources radio dans les réseaux 4G, avec la 5G, l'objectif serait que le spectre des usages et la diversité des utilisateurs soit grandement élargie [1, 3].

La technologie 5G vise des secteurs très variés, qui ne partageaient pas nécessairement d'autres éléments communs que cette technologie, mais qui sont des piliers importants de notre société comme l'énergie, la santé, les médias, l'industrie, le transport...etc.

## ***1.2 Les objectifs de la 5G***

Cette nouvelle technologie rendra possible un certain nombre de nouvelles applications [3]. On pourra bénéficier de vidéos en ligne avec une bonne qualité de réception, même dans des zones à forte densité d'utilisateurs. Aussi, un haut niveau de service (accès à haut débit d'une moyenne de 50 Mbps) sera garanti sur tout site géographique tant sur des équipements fixes que mobiles et y compris au cours de déplacements rapides comme dans les trains à grande vitesse [4].

L'Internet des objets (IoT) connectera des milliards d'appareils et de capteurs. Le temps de latence (délai) des données dans les réseaux 5G ne sera que d'une milliseconde (ms), comparé aux 50 ms pour les systèmes actuels [5]. Ceci rendra possible des communications quasiment en temps réel (véhicule autonome, drone, réalité virtuelle, e-santé robotique, ...etc). Notant que l'arrivée de la 5G pourrait avoir un impact important dans le développement économique et social à l'échelle mondiale notamment par l'implication de nombreux secteurs numérisés.

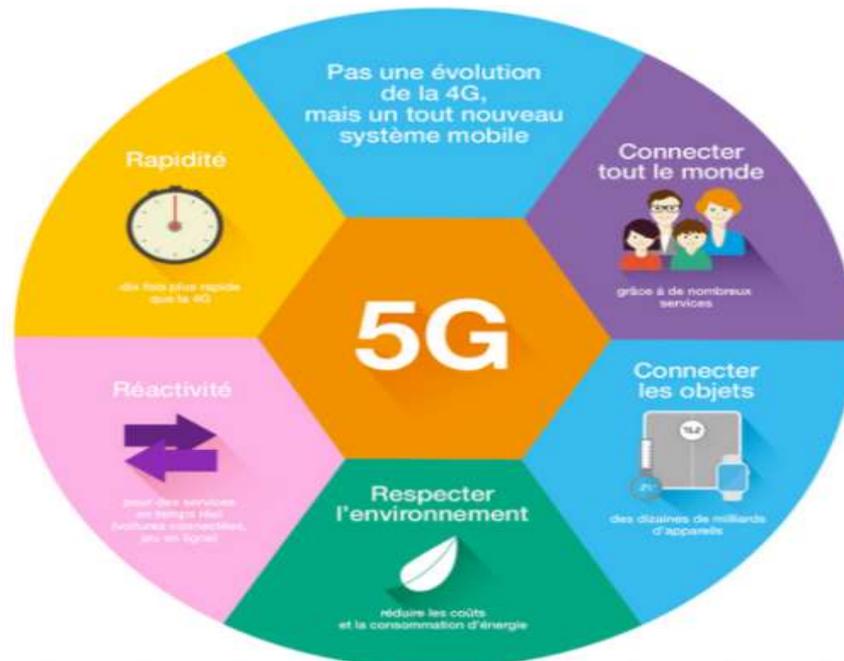


Figure I- 1: Les objectifs de la 5G [3]

### 1.3 Technologie 5G

La technologie 5G propose de fournir des nouvelles bandes de fréquences ainsi qu'une plus large bande spectrale par le biais de canal de fréquence. Aussi, la 5G utilise une nouvelle technologie de formation de faisceaux, et donnera également une avancée en termes de [6] :

- Débit plus important et volume de données plus grand.
- Haute capacité pour plus de connectivité des périphériques
- Réduire la consommation d'énergie.
- Meilleure connectivité par rapport à la situation géographique.
- Meilleur rapport couts / fiabilité des communications.

### 1.4 Applications de 5G

Nous pouvons citer les applications significatives comme [7] :

- Un standard global unifié.
- Un réseau intelligent avec une meilleure couverture.
- Disponibilité de la vraie zone Wifi dense.
- Un support compatible pour la radio cognitive.

### 1.5 L'architecture des réseaux 5G

L'architecture 5G est principalement composée de trois couches horizontales, à savoir « l'activation de service innovant », « la plate-forme d'activation » et « la radio hyper-connectée », que nous décrivons dans cette section en détail [8].

### **1.5.1 Les Services Innovants (SI)**

C'est une couche supérieure qui est basée sur des capacités d'infrastructure 5G différenciées, les services 5G seront en mesure d'offrir une expérience utilisateur hautement fiable et immersive. En particulier, la diffusion de vidéo en ultra-haute définition finira par devenir des services dominants. En effet, la bande passante suffisante et la grande fiabilité offerte par la 5G faciliteront l'émergence d'autres services d'internet des objets (IOT) [9].

### **1.5.2 La Plate-forme de Validation (PV)**

C'est la couche intermédiaire qui crée des valeurs significatives. Elle prend en charge la couche supérieure SI en transformant correctement les éléments mécaniques et disjoints [10].

### **1.5.3 La Radio Hyper-Connecté**

C'est une couche inférieure qui peut fournir efficacement et de manière transparente une quantité massive de données à la couche PV. En raison de l'énorme quantité de données transmises et des exigences de latence strictes, cette couche inclura à la fois les technologies de réseau radio existantes et les nouvelles technologies capables d'améliorer le fractionnement des cellules, l'efficacité spectrale, la bande passante du conduit canal et l'efficacité du fonctionnement du réseau [11].

## **1.6 La couche physique**

De nombreux chercheurs de l'industrie et du monde universitaire travaillent activement à répondre aux exigences nécessaires pour une mise en œuvre fiable et robuste de la 5G. Les caractéristiques clés suivantes ont joué un rôle déterminant dans la conception de la couche physique de la 5G NR [12] :

- Prise en charge d'une large gamme de bandes de fonctionnement, d'une variété de largeurs de canal parmi ces bandes et de multiples options de déploiement.
- Prise en charge d'applications caractérisées par une très faible latence, ce qui nécessite des paquets courts et des interférences par rafales et discontinues de la part des transmissions critiques.
- Partage dynamique du spectre afin de fournir des liaisons montantes (UL), descendantes (DL), latérales et de raccordement.

Mise en œuvre d'une technologie multi-antenne (entrées multiples, sorties multiples ou MIMO) pour une efficacité spectrale supérieure.

- Maintien d'un fonctionnement dans un délai limité et d'une utilisation plus efficace de la fréquence pour des déploiements TDD (duplex à répartition dans le temps) et FDD (duplex à répartition en fréquence) plus performants.

- Exigences en termes de symétrie des liaisons DL/UL pour permettre le fonctionnement à des fréquences d'ondes millimétriques (mmWave) de stations de base compactes et peu coûteuses.

## 1.7 Technologies clés pour la 5G

Afin de répondre aux besoins de croissance des services sans fil au cours des dix prochaines années, la capacité des réseaux sans fil peut être étendue de plusieurs manières : augmenter l'utilisation du spectre, améliorer le multiplexage spatial et l'expansion de la bande passante. Par exemple, on peut augmenter considérablement la bande passante disponible du système 5G en élargissant l'utilisation du spectre sans licence de la bande haute fréquence et de la bande des ondes millimétriques.

Grâce au MIMO massif, on peut exploiter davantage les potentiels de l'espace et améliorer considérablement l'utilisation du spectre. Ainsi, plusieurs technologies clés peuvent être utilisées. Nous présenterons brièvement, dans ce qui suit, les plus importantes [14].

### 1.7.1 Massive MIMO (Multiple Inputs-Multiple Output)

Cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes, sur le même panneau (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquence supérieures à 6 GHz) permet d'augmenter le débit et focaliser l'énergie sur le terminal [15] [16].

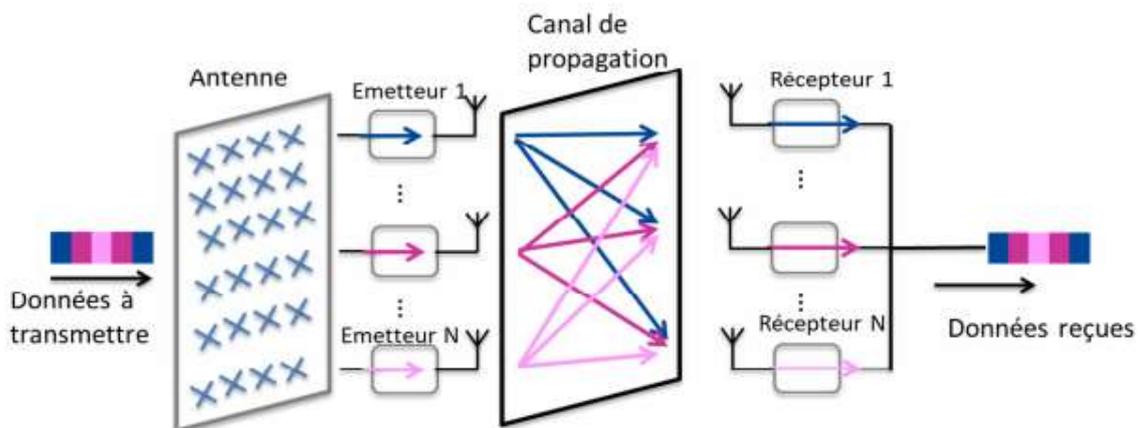


Figure I- 2: Un système MIMO [15]

### 1.7.2 Communications à ondes millimétriques

La capacité et la bande passante du canal sont proportionnelles au rapport signal/bruit (SNR). Pour atteindre le débit de données de niveau Gbps du réseau 5G, une plus grande bande passante est nécessaire. Plus la fréquence est élevée, plus la bande passante et la capacité des canaux sont grandes. Par conséquent, la bande passante haute fréquence continue et devenue un choix inévitable pour la 5G. Les ressources de fréquence disponibles dans la bande d'ondes millimétriques (30\_300 GHz) sont assez abondantes, ce qui correspond à environ 200 fois la bande de basse fréquence. Par conséquent, l'industrie a commencé à explorer comment utiliser la bande de fréquences millimétrique (30\_300 GHz) dans les communications sans fil [16].

Cependant, en raison des caractéristiques de propagation de la bande d'ondes millimétriques, son application dans les communications sans fil cellulaires présente plusieurs défis [17] :

- La perte de transmission de l'onde millimétrique est proportionnelle au carré de la fréquence et doit être compensée par la formation de faisceau à gain élevé.
- La transmission des ondes millimétriques est très sensible à l'interaction avec les objets et la perte de transmission est très importante.

### **1.7.3 Formes d'ondes de la 5G**

Bien que la couche physique de la 4G utilise la technologie basée sur le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (OFDM), la forme d'onde OFDM elle-même présente certains défauts. Par exemple :

- De grandes fuite hors bande
- Pour éviter les interférences entre les porteuses, une synchronisation est nécessaire entre les nœuds de transmission.

Cependant, la caractéristique de fuite de l'OFDM et sa synchronisation stricte ne peuvent pas s'adapter à un accès rapide asynchrone pour les entreprises en temps réel et à une utilisation efficace du spectre. Ciblant les inconvénients de l'OFDM, de nombreuses formes d'onde alternatives ont été proposées [18] :

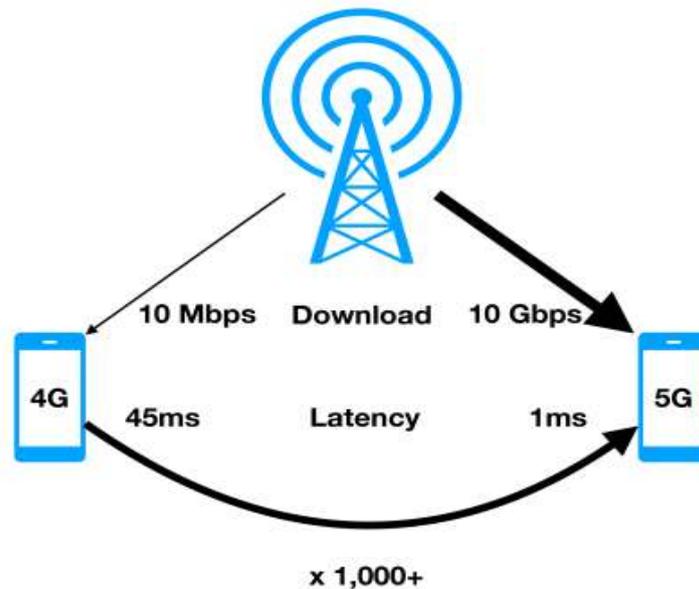
- Filter Bank based Multi-Carrier (FBMC).
- Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC).
- Generalized Frequency division Multiplexing (GFDM).
- Filtered OFDM (F-OFDM).

## **1.8 Comparaison entre les performances de la 4G et de la 5G :**

L'objectif de la 5G, en tant que successeur de la 4G, sera aussi de pouvoir fournir [19] :

- Les premiers déploiement 5G offriront de performances en progression mais dans la continuité de ce qu'offrira alors la 4G qui aura évolué en parallèle (4.5G, 4.9G).
- Les performances continueront d'augmenter avec l'introduction progressive de technologies de rupture, comme par exemple l'utilisation de fréquences millimétriques.

Selon les objectifs de 5G devra offrir unet un débit maximal respectivement 10 et 20 fois supérieur à ce qui est disponible actuellement. La densité maximale de connexion sera multipliée par 10 et la latence divisée par au moins 10 (la latence point à point cible est de 1 ms, contre 30 à 40 ms ce jour).



**Figure I- 3: Comparaison entre la 4G et la 5G [19].**

L'objectif de la 5G, en tant que successeur de la 4G, sera aussi de pouvoir fournir :

- Un réseau extrêmement fiable, avec des performances plus homogènes, quelle que soit la position de l'utilisateur par rapport à la station de base.
- Une connexion stable même en mobilité (avec de vitesse de l'ordre de 500 Km/h) et une augmentation de l'efficacité énergétique.

Le tableau I.1 résume les performances attendues de la 5G et celles qui sont actuellement disponibles avec la 4G [19] :

Performances/ Génération	4G	5G
1.Débit maximal (Gbit/s).	1	20
2.Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s).	10	100
3.Efficacité spectrale.	1x	3x
4.Vitesse (Km/h).	350	500
5.Latence.	10	1
6.Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets /Km <sup>2</sup> ).	10e5	10e6

**Tableau I- 1: les performances attendues de la 5G**

## ***1.9 Les défis de la 5G***

Pourtant, il existe des dizaines de pays en utilisant les technologies 2G et 3G et ne savent même pas à propos de 4G, dans un tel état, les questions les plus importantes dans l'esprit de tout le monde sont [20] :

- Jusqu'on 5G être viable ?
- Est-ce que ce sera la technologie de certains des pays développés ou des pays en développement qui en profitera également ?

Pour répondre à ces questions, les défis de 5G sont classés dans les deux rubriques suivantes :

- ◇ Défis technologiques.
- ◇ Défis communs.

### ***1.9.1 Défis technologiques***

#### ***1.9.1.1 Interférence Inter-cellule***

Ceci est l'un des principaux problèmes technologiques qui doivent être résolus. Il y a des variations dans la taille des cellules marco traditionnelles et de petites cellules simultanées qui conduiront à des interférences.[20]

#### ***1.9.1.2 Contrôle d'accès moyen efficace***

Dans une situation ou un déploiement dense de points d'accès et de terminaux utilisateurs est requis, le débit utilisateur sera faible, la latence sera élevée et les points d'accès ne seront pas compétents pour la technologie cellulaire. Il doit être recherché correctement pour optimiser la technologie [21].

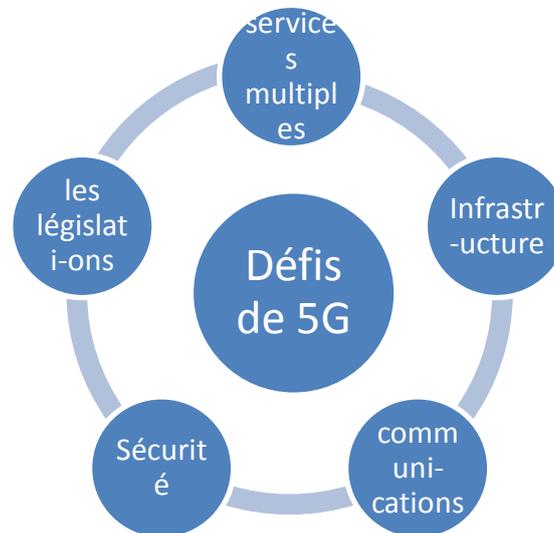
#### ***1.9.1.3 Gestion du trafic***

Par rapport au trafic humain traditionnel dans les réseaux cellulaires, un grand nombre de dispositif Machine to Machine (M2M) dans une cellule peut causer de sérieux problèmes de système, c'est-à-dire des problèmes de réseau d'accès radio (RAN), ce qui causera une surcharge et une congestion [22].

### ***1.9.2 Défis communs***

#### ***1.9.2.1 Services multiples***

Contrairement à d'autres services de signaux radio, la 5G aurait une tâche énorme pour offrir des services à des réseaux hétérogènes, des technologies et des appareils fonctionnant dans différentes régions géographiques. Le défi de la normalisation consiste donc à fournir des services sans fil dynamiques, universels, centrés sur l'utilisateur et riches en données pour répondre aux attentes élevées des gens. [23]



**Figure I- 4: Les défis communs [23]**

### **1.9.2.2 Infrastructure**

Les chercheurs sont confrontés à des défis technologiques de la normalisation et de l'application des services 5G [24].

### **1.9.2.3 Communication et Navigation**

Ces services dépendent en grande partie de la disponibilité du spectre radioélectrique, à travers lequel les signaux sont transmis. Bien que la technologie 5G a une forte puissance de calcul pour traiter l'énorme volume de données provenant de sources différentes et distinctes, mais il a besoin du soutien de l'infrastructure plus grande [23].

### **1.9.2.4 Sécurité et confidentialité**

Ceci est l'un des défis les plus importants de la 5G qui a besoin d'assurer la protection des données personnelles. 5G devra définir les incertitudes liées aux menaces de sécurité, y compris la confiance, la vie privée, le cyber sécurité, qui se développent à travers le monde [24].

### **1.9.2.5 Législation des lois informatiques**

Cyber criminalité et autres fraudes peut également augmenter avec la haute vitesse et la technologie 5G omniprésente. Par conséquent, la législation de cyber Law est également un problème impératif, qui est en grande partie gouvernementale et politique (question nationale et internationale) dans la nature [24].

## **1.10 La 5G au niveau mondial**

### **1.10.1 Etats-Unis d'Amérique**

La course mondiale est déjà lancée entre pays pour être le premier à mettre en place des expérimentations 5G à grande échelle, puis à lancer des services commerciaux, quand bien même ceux-ci seraient basés sur des pré-standards de spécifications techniques [25].

La 5G est considérée comme étant une opportunité sans précédent pour la croissance économique avec de gros impacts sur l'éducation, l'emploi, les transports, etc... Ces futurs réseaux nécessitent, selon la FFC (Federal Communications Commission, l'agence de régulation

américaine) de se pencher sur les 3 éléments suivants : le spectre, l'infrastructure et le réseau de raccordement (backhaul) [25].

### ***1.10.2 Japon***

Le Japon veut démontrer son leadership sur la 5G en déployant le premier réseau commercial 5G à être conforme aux spécifications techniques internationales pour les jeux olympiques d'été de Tokyo en 2020 [26].

### ***1.10.3 Chine***

Tout comme au Japon, la Chine entend montrer son leadership avec des premiers déploiements commerciaux dès 2020. Les premiers tests seront faits avant 2020 dans la bande 3400-3600 MHz. Les bandes 3300-3400 MHz, 4400-4500 MHz et 4800-4990 MHz sont aussi considérées et à l'étude. Pour de plus hauts débits, les bandes autour de 25 GHz et 40 GHz sont envisagées [26].

### ***1.10.4 Corée***

La Corée quant à elle, vise un déploiement pré-commercial de la 5G durant les jeux olympiques d'hiver de Pyonchang 2018. Plusieurs expérimentations sont en cours de préparation pour des démonstrations grandeur nature dans plusieurs villes coréennes. Les trois opérateurs nationaux espèrent des fréquences dans la bande 26.5-29.5 GHz. [26]

### ***1.10.5 La 5G au niveau européen***

Le 5G-PPP (5G Public Private Partnership) est un partenariat public-privé, dédié à la recherche et au développement autour de la 5G et créé à l'initiative de la commission européenne dès 2013, avec un budget de 700 millions d'euros de fonds public. Les objectifs principaux du 5G-PPP sont [27] :

- Réunir le tissu économique et académique du secteur des tél » communications autour de grands projets de R&D, sur toute la chaîne de valeur.
- Réduire la dépendance technologique aux Etats-Unis et à l'Asie tout en maintenant une forte part de marché mondial.

## ***1.11 Les avantages et les inconvénients de la 5G***

La technologie 5G possède des avantages et des inconvénients qui sont [28]:

### ***1.11.1 Avantages***

- Plus efficace et efficiente.
- Technologie pour faciliter les outils de supervision des abonnés pour l'action rapide.
- Très probablement, fournira une énorme diffusion de données (en Gigabit), qui prendra en charge plus de 60.000 connexions.
- Facilement gérable avec les générations précédentes.

- Possibilité de fournir une connectivité uniforme, interrompue et cohérente dans le monde entier.

### ***1.11.2 Inconvénients***

- La technologie est encore en cours de développement et des recherches sur sa viabilité sont en cours [28].
- La vitesse, cette technologie semble difficile à atteindre (à l'avenir, elle pourrait l'être) en raison de l'incompétence du support technologique dans la plupart des régions du monde.
- Beaucoup d'anciens appareils ne seraient pas compétents pour la 5G, d'où la nécessité de tous les remplacer par un nouvel appareil –une affaire couteuse.
- La question de la sécurité et de la protection de la vie n'a pas encor été résolue.

### ***1.12 Conclusion***

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur la technologie 5G, Ses objectifs et ses applications, On a cité aussi sa couche physique, Son architecture, Sa comparaison avec la technologie 4G, ses défis, ses avantages et ses inconvénients finalement sa présence dans le monde.

# Chapitre II : Les communications millimétriques pour la 5G

## II.1 Introduction

Ce chapitre vise à décrire le contexte actuel des communications numériques pour permettre de comprendre l'intérêt porté au concept de Massive MIMO et son impact dans les futures communications de 5e génération (5G). Pour cela une première définition de ce qu'un tel système représente sera donnée, suivie d'une description des architectures réseaux plus susceptibles d'atteindre les performances visées par les objectifs 5G. La densification des réseaux étant considérée comme inévitable, une approche des communications aux longueurs d'onde millimétriques suivra pour déboucher sur une description des principales limitations auxquelles sont confrontés les systèmes Massive MIMO. Enfin une liste succincte des systèmes proches ou identiques appliqués à d'autres applications sera fourni pour permettre de conclure sur la direction prise par cette étude.

## II.2 Rappel sur les technologies de modulation pour la 5G

La modulation a pour objectif d'adapter le signal à émettre u canal de transmission. Cette opération consiste à modifier un ou plusieurs paramètres d'une onde porteuse  $S(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  centrée sur la bande de fréquence du canal [29].

- Dans les procédés de modulation binaire, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui ne prends que deux valeurs possibles.
- Dans les procédés de modulation M-aires, l'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui prend M valeurs. Ceci permet d'associer à un état de modulation un mot de n digits binaires. Le nombre d'états est donc  $M=2^n$ , ces n digits proviennent du découpage en paquets de n digits du train binaire issu du codeur.

Les types de modulation les plus fréquemment rencontrés sont les suivants :

- La modulation par déplacement de phase (PSK).
- La modulation par déplacement d'amplitude (ASK).
- La modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature (QAM).
- La modulation par déplacement de Fréquence (FSK).

### II.2.1 La modulation par déplacement de phase (PSK)

La modulation PSK appelé modulation par déplacement de phase désigne une famille de formes de modulations numériques qui ont toutes pour principe de (porteuse) [30] et exclusivement par ce biais.

- L'expression générale d'un signal modulé en PSK est :

$$m(t) = \text{Re} [\sum_k c_k(t) e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)}] \quad (\text{II.1})$$

D'où :

$$c_k = e^{j\varphi_k} = \cos \varphi_k + j \sin \varphi_k \quad \text{avec} \quad \begin{cases} a_k = \cos \varphi_k \\ b_k = \sin \varphi_k \end{cases}$$

- Les signaux élémentaires  $a_k$  et  $b_k$  utilisent la même forme d'onde  $g(t)$  qui est ici une impulsion rectangulaire, de durée  $T$  et d'amplitude égale à  $A$  si  $T$  appartient à l'intervalle  $[0, T]$  et égale à 0 ailleurs. [30]

$$g(t) = \text{rect} \left( \frac{t-T/2}{T} \right)$$

- Les symboles  $c_k$  prennent leurs valeurs dans un alphabet de  $M > 2$  éléments  $e^{j\varphi_k}$  ou  $\varphi_k$  est défini ci-dessus avec  $k = 0, 1, \dots, M-1$ .

On peut aussi considérer que  $a_k$  et  $b_k$  prennent simultanément leurs valeurs dans l'alphabet  $\cos(\varphi_k)$  et  $\sin(\varphi_k)$ .

- Le signal modulé devient :

$$m(t) = \text{Re} \left[ \sum_k e^{j\varphi_k} g(t - kT) e^{(j\omega_0 t + \varphi_0)} \right] = \text{Re} \left[ \sum_k g(t - kT) e^{(j\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k)} \right] \quad (\text{II.2})$$

- Soit plus simplement en ne considérant que l'intervalle de temps  $[kT, (k+1)T]$  :

$$m(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_k) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos(\varphi_k) - A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin(\varphi_k) \quad (\text{II.3})$$

- Cette dernière expression montre que la phase de la porteuse est modulée par l'argument  $\varphi_k$  de chaque symbole ce qui explique le nom donné à la MDP, remarquons aussi que la porteuse en phase  $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  est modulée en amplitude par le signal  $A \cos(\varphi_k)$  et que la porteuse en quadrature  $\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$  est modulée en amplitude par le signal  $A \sin(\varphi_k)$  [30].
- L'expression de la MDP montre qu'il s'agit d'une modulation à enveloppe constante : l'enveloppe étant le module de l'enveloppe complexe. Cette propriété est intéressante pour des transmissions sur les canaux non linéaires, ce qui fait la MDP un outil de choix par exemple pour les transmissions par satellites. L'intérêt d'avoir un signal modulé à enveloppe constante est que cela permet d'employer les amplificateurs dans leur zone de meilleur rendement qui correspond souvent à un mode de fonctionnement non linéaire.
- On pourrait imaginer plusieurs MDP-M pour la même valeur de  $M$  ou les symboles seraient disposés de façon quelconque sur le cercle. Pour améliorer les performances par rapport au bruit, on impose aux symboles d'être répartis régulièrement sur le cercle (il sera ainsi plus facile de les discerner en moyenne). L'ensemble des phases possibles se traduit alors par les expressions suivantes :

$$M > 2 : \varphi_k = \frac{\pi}{2} + \frac{2k\pi}{M} \quad (\text{II.4})$$

$$M = 2 : \varphi = 0 \text{ ou } \varphi = \pi$$

- On appelle « MDP-M » une modulation par déplacement de phase correspondant à des symboles  $M$ -aires. On distingue :
  - La modulation PSK-2
  - La modulation PSK-4

○ La modulation PSK- 8

Généralement on parle d'une modulation PSK d'ordre M.

La modulation de phase associe à un code binaire une valeur de la phase de la porteuse. La vitesse peut être facilement augmentée en utilisant un code binaire sur 2, 3 bits ou plus sans augmentation de la fréquence de la porteuse [30].

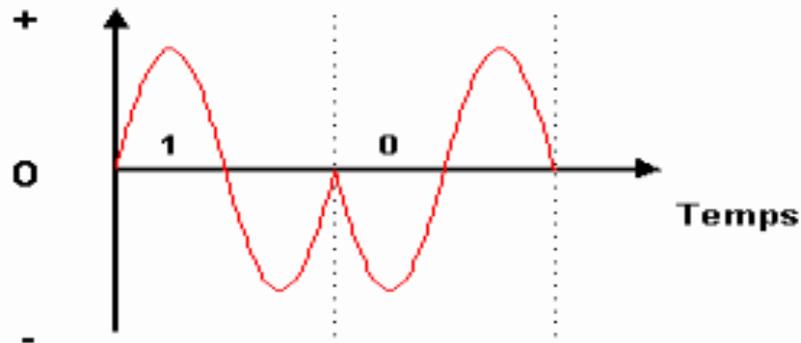


Figure II- 1: Onde de la sortie du modulateur (PSK)

### II.2.2 La modulation par déplacement de Fréquence (FSK)

Le FSK est une modulation numérique par variation de fréquence. La variation se faisant entre fréquences prédéterminées en fonction du symbole à transmettre. La version la plus simple étant la version binaire du FSK noté BFSK. Le BFSK utilise donc deux fréquences particulières pour transmettre une information binaire. Par convention, les « mark » sont notés par 1 et les « spaces » sont notés par 0. Les deux fréquences utilisées peuvent être totalement distinctes : f1 et f2 (voir figure II. 2). Cela peut être réalisé en utilisant deux oscillateurs distincts que l'on commute en fonction du symbole considéré sur la période [29]. Dans ce cas nous pouvons écrire les équations qui décrivent les deux signaux transmis.

$$\left. \begin{aligned} S(t) &= A * \cos (2 * \pi * f1 * t) && \text{si symbole} = 0 \\ S(t) &= A * \cos (2 * \pi * f2 * t) && \text{si symbole} = 1 \end{aligned} \right\} \quad (II.5)$$

- A représente l'amplitude du signal (dois-je préciser qu'il vaut mieux que A soit ≠ 0)
- f1 et f2 représentent les deux fréquences prédéterminées.
- t l'instant considéré.

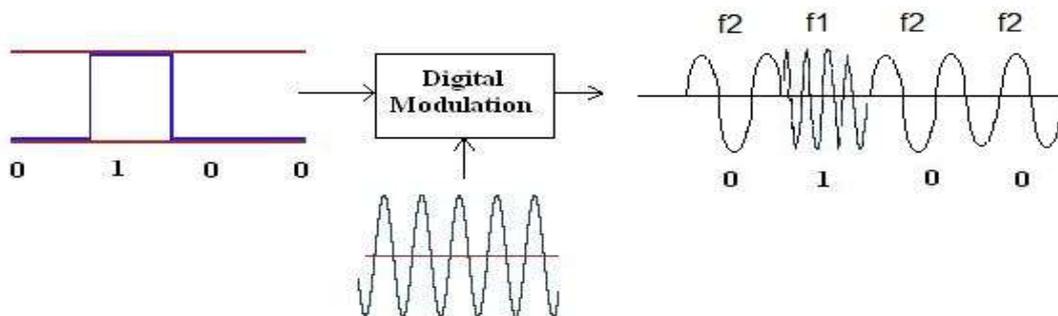


Figure II- 2: Modulation FSK d'une trame

L'inconvénient de cette méthode est que les deux oscillateurs ne seront pas nécessairement en phase et donc les amplitudes varieront à chaque instant de commutation. Ce qui résulte en une discontinuité du signal en sortie. C'est ce que l'on peut visualiser sur la figure II.2. Dans la pratique, les transmetteurs FSK n'utilise qu'un seul oscillateur et la

commutation de fréquence préserve la phase. L'élimination de cette discontinuité de phase réduit la puissance des bandes latérales. On évitera donc de perturber les fréquences voisines [31].

On notera également que la modulation FSK adoptera généralement la méthode de codage NRZ. Cela signifie que chaque symbole (1 ou 0) est représenté par des états significatifs distincts, sans utilisation du niveau 0 comme représentation.

La modulation FSK a l'avantage d'être très robuste aux risques d'erreurs et d'avoir un rapport SNR élevé.

### II.2.3 La modulation d'amplitude de deux porteuses en quadrature (QAM)

La QAM résulte de la composition de deux fréquences porteuses sinusoïdales déphasées l'une de l'autre de  $\pi/2$  [32]. Du fait de cette orthogonalité, la détection (démodulation) s'en trouve facilitée. Rappelons le principe de la modulation d'impulsion en amplitude (MIA), pour lequel le signal transmis est de la forme :

$$S(t) = \sum_k g(t - kts)\sqrt{2} \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (\text{II.6})$$

Le facteur  $\sqrt{2}$  est souvent introduit pour une commodité (normalisation) dans les calculs de puissance (présence du cosinus).

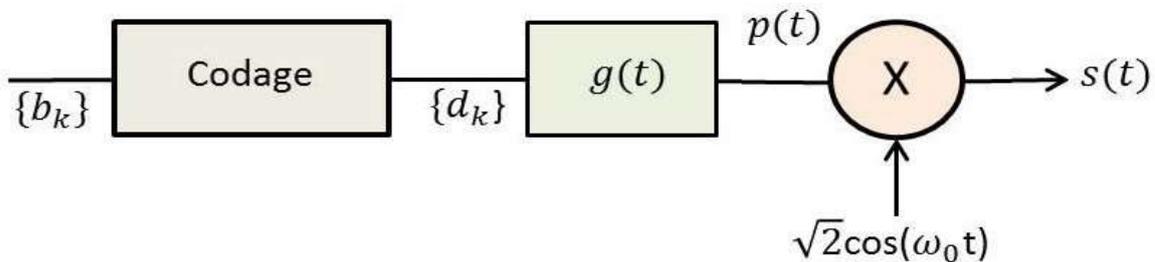


Figure II- 3: Schéma bloc de la modulation d'impulsion en amplitude (MIA) classique.

Un autre signal numérique qui module un sinus à la même fréquence peut être ajouté au cosinus, ces deux signaux occupant le même spectre et sont facilement séparables à la démodulation (orthogonalité des porteuses).

Cette modulation des deux porteuses en quadrature (QAM) a pour expression la suivante [33] :

$$S(t) = P(t) * \sqrt{2} \cos(\omega_0 t + \varphi) - q(t) * \sqrt{2} \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (\text{II.7})$$

$$\text{Avec : } P(t) = \sum_k d_{pk} g(t - kts)\sqrt{2} \text{ et } q(t) = \sum_k d_{qk} g(t - kts)\sqrt{2}$$

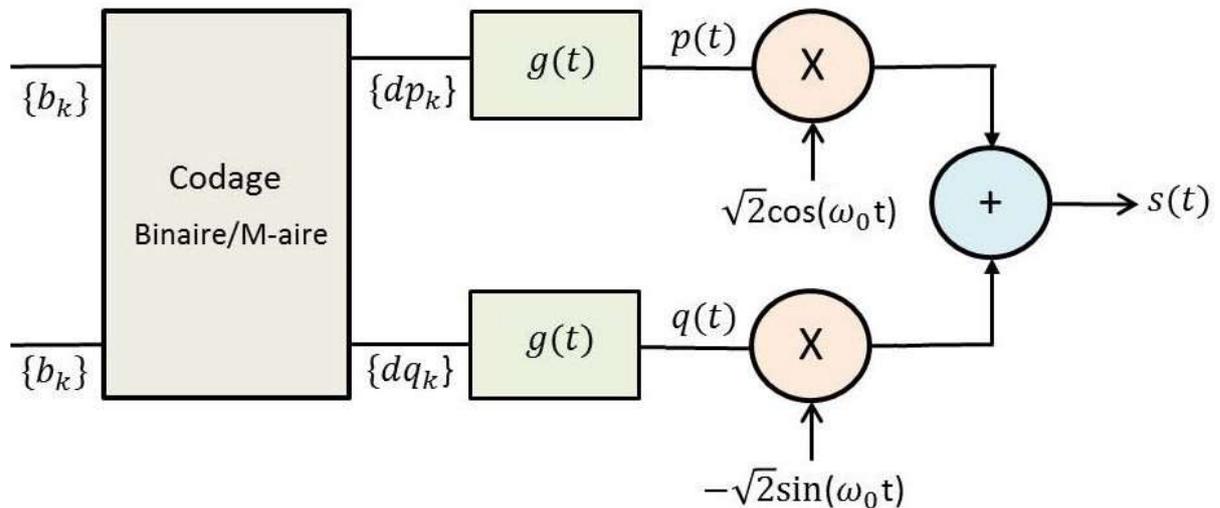


Figure II- 4: Schéma bloc de la modulation en quadrature QAM (une voie sinus et une voie cosinus).

Avec sa voie en sinus, la modulation QAM permet de passer deux fois plus de données que la MIA classique pour une même occupation spectrale. Son efficacité spectrale a été doublée.

Rappelons que l'efficacité spectrale  $\eta$  est définie comme le rapport du débit d'information binaire transmis par la modulation à la largeur de bande utilisée :

$$\eta = D_b / W \quad (II.8)$$

Avec  $D_b$  : le débit de l'information binaire et  $W$  : la largeur de la bande utilisée.

### II.3 Multiplexage par répartition orthogonale par fréquence

#### II.3.1 Principe de l'OFDM

Le principe de fonctionnement du système OFDM consiste à diviser la bande passante disponible  $B$  en un certain nombre  $N_c$  de sous-bandes (sous-porteuses ou sous canaux) [34]. Chaque sous-bande a une largeur de  $\Delta f = B/N_c$ , sur laquelle le canal sans fil peut être considéré comme plat. Les données sont transmises au rythme de  $R$  symboles par seconde (débit en bauds), avec une période de symbole  $T_s = \frac{N_c}{R}$ .

Longue par rapport au retard maximum de la propagation,  $T_s \gg \tau_{\max}$ , où  $\tau_{\max}$  est le retard de propagation du canal [34]. Si le retard est supérieur à environ 10% de la durée du symbole, le signal reçu subit une interférence inter-symboles (ISI), ce qui peut augmenter considérablement le taux d'erreur sur les bits (BER). En même temps, la bande passante des sous-bandes peut être faible par rapport à la largeur de bande de cohérence du canal  $B_c \ll B/N_c$ .

#### II.3.2 Modulation et démodulation OFDM

La forme générale du signal OFDM en bande base est décrite comme suit [34] :

$$S(t) = \sum_{k \in Z} \sum_{m=0}^{N_c-1} c_{m,k} e^{2\pi f_m t} = \sum_{k \in Z} \sum_{m=0}^{N_c-1} c_{m,k} Q_m(t) \quad (II.9)$$

Où  $C_{m,k}$  sont les symboles complexes à transmettre par  $N_c$  sous porteuses du signal OFDM. Ces symboles peuvent être sélectionnés à partir d'un alphabet.

M-aires PSK ou un alphabet M-aires QAM, et sera converti en  $N_c$  flux parallèles avec une conversion série-parallèle (S/P). En raison de la conversion S/P, la durée du symbole OFDM transmis est étendue à  $T_{sym} = N_c T_s$ , avec  $T_s$  la période symbole de l'information. On a [34]:

$$Q_m = \begin{cases} e^{j2\pi f_m t} & \text{si } 0 \leq t \leq T_{sym} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Où :  $Q_m$  la forme d'onde pour l-ème sous-porteuse, et  $f_m = f_0 + l \cdot \Delta f$  est la fréquence de la sous-porteuse, avec  $f_0$  est la plus basse fréquence utilisée, et  $\Delta f = 1/T_{sym}$  est l'espacement entre les sous-porteuses adjacentes [34].

Le spectre du signal OFDM peut être considéré comme la somme des fonctions sinc décalées en fréquence dans le domaine fréquentiel. Les fonctions sinc sont espacées de  $1/T_{sym}$ . La figure II.5 illustre le spectre OFDM...

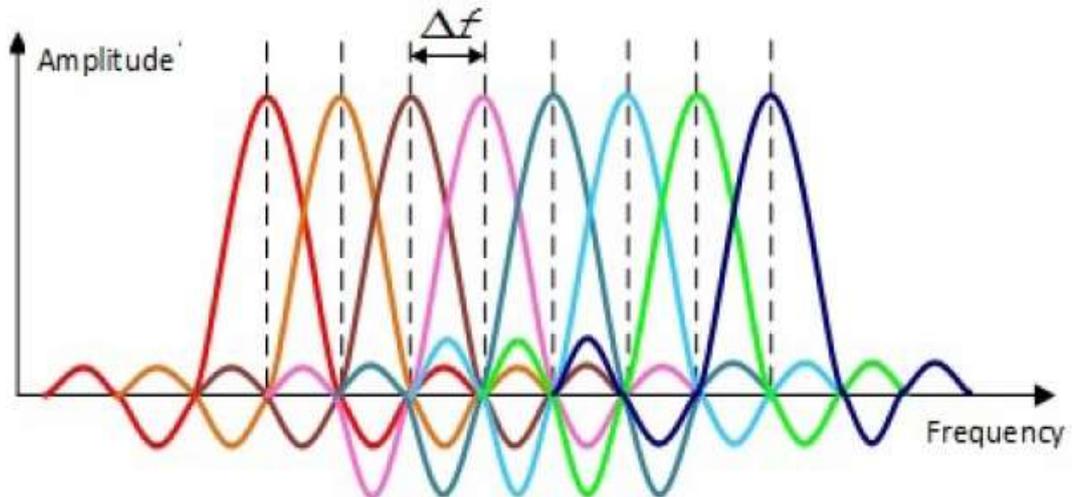


Figure II- 5: Spectre OFDM [34]

Les équations (II.9)(II.10), montrent clairement que la modulation OFDM peut être implémentée par une transformée de Fourier inverse (figure II.6). À la réception, la procédure inverse est appliquée.

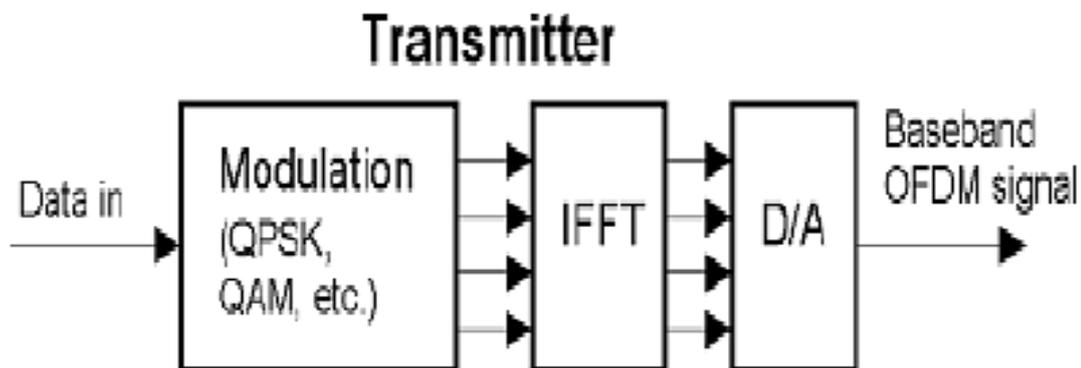


Figure II- 6: Emetteur OFDM basé sur une IFFT [34]

La démodulation consiste à effectuer une transformée de Fourier discrète des symboles reçus. Ceci peut être réalisé à l'aide de l'algorithme de la FFT. La figure II.10 décrit le schéma d'un démodulateur OFDM.

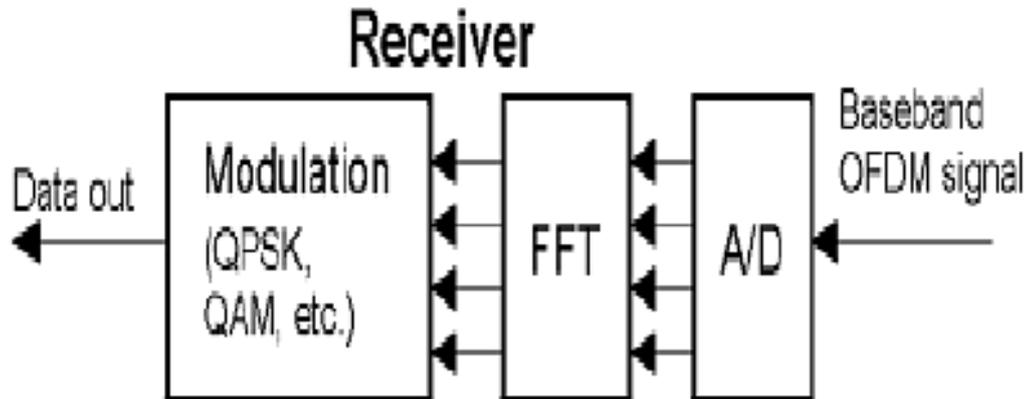


Figure II- 7: Récepteur OFDM basé sur une FFT[34]

### II.3.3 Orthogonalité

Les différentes sous-bandes OFDM se chevauchent, même si elles n'interfèrent pas entre elles,  $f = f_m, m = 0, \dots, N_c - 1$ . Dans ce cas, la durée du symbole doit être suffisamment longue pour que  $T_{sym}\Delta f = 1$ , qui est appelée condition d'orthogonalité, définie par [34] :

$$\frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} Q_{m'}(t)Q_m(t)dt = \begin{cases} 1 & \text{pour } m = m' \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

L'orthogonalité est la condition essentielle pour éviter les interférences inter-porteuses.

### II.3.4 Extension cyclique

Le passage du signal OFDM transmis à travers un canal dispersif dans le temps provoque des interférences entre symboles (IES), de plus, l'orthogonalité entre les sous porteuses est perdue, ce qui entraîne une interférence entre porteuses (IEP). Pour faire face à la dispersion des retards des canaux sans fil, une extension cyclique du symbole est utilisée dans les systèmes OFDM, qui est appelée préfixe cyclique (CP), avec une longueur  $N_g$  au moins égale à la longueur de l'étalement des retards  $\tau_{rms}$ .

La figure II.8 illustre ce principe où les  $N_g$  derniers échantillons de chaque symbole sont étendus de manière cyclique au début du symbole correspondant. Le préfixe cyclique a une durée dont la valeur est paramétrable (un ratio du temps symbole OFDM) et peut prendre les valeurs  $G = \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16}, \frac{1}{32}$ .

Plus le canal présentera un nombre de trajets important et espacés dans le temps, plus le préfixe cyclique devra être grand. L'augmentation de la durée du préfixe cyclique se fait au détriment du débit réel de la transmission. Une chaîne de transmission OFDM complète avec l'insertion du CP est représentée sur la figure II.8.

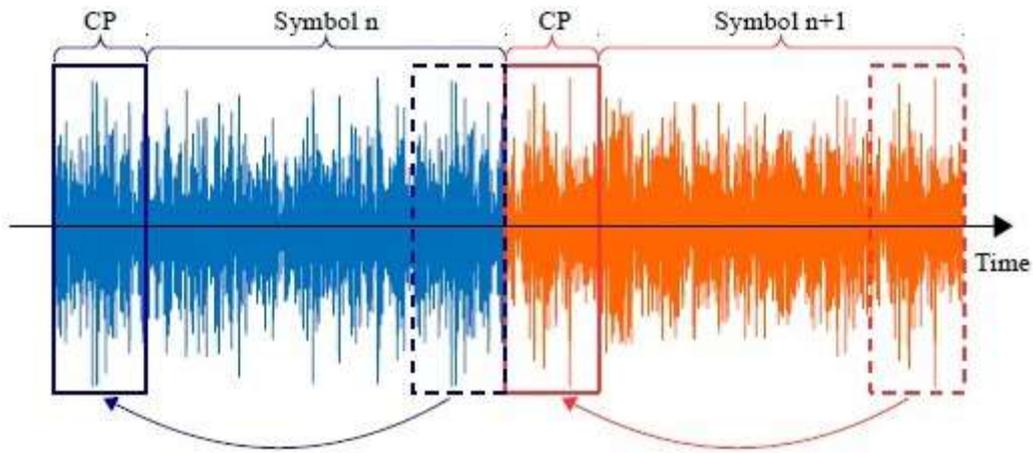


Figure II- 8: Principe du préfixe cyclique[34].

## II.4 Les système MIMO & Massive MIMO

Le MIMO ou Multiple Input Multiple Output représente une des techniques les plus modernes dans les systèmes de communication, elle sert à améliorer la performance du système tout en exploitant l'effet multi-trajets ainsi que la richesse du canal de propagation [35].

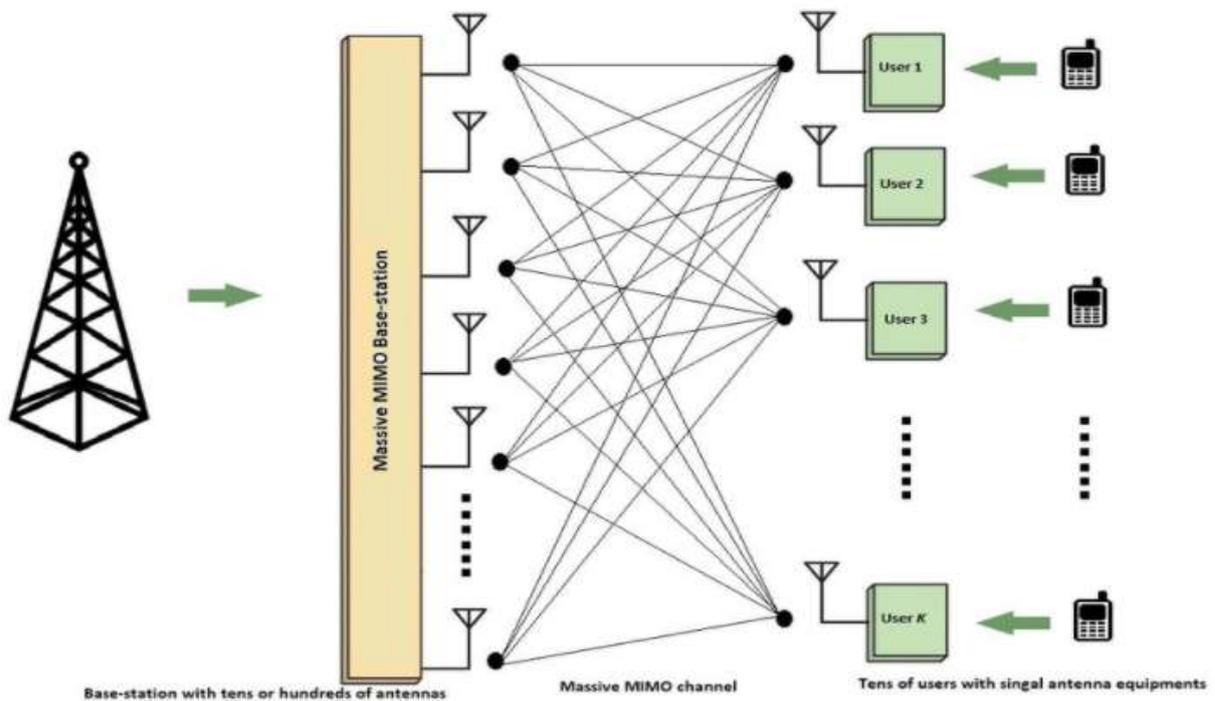


Figure II- 9: Système Massive MIMO en transmission multi-utilisateurs [36].

Afin de parvenir à cette amélioration, le MIMO propose deux méthodes différentes, donc il utilise soit la diversité spatiale (envoie la même information sur plusieurs antennes) ou bien multiplexer les données sur des canaux parallèles pour servir un utilisateur avec plusieurs antennes MIMO ou plusieurs utilisateurs. Beaucoup d'avantages sont promis par l'intégration du Massive MIMO dont une meilleure fiabilité des communications, une latence réduite, des débits plus élevés ainsi que d'autres avantages vitaux pour l'intégration promise de la 5G [35].

Massive MIMO n'est pas une simple extension linéaire du MIMO mais présente des particularités, des avantages et des difficultés d'implémentation spécifiques. Bien que tout à fait adaptée à des transmissions point-à-point, cette particularité fait que cette solution est souvent associée à des techniques multi-utilisateurs en raison de son potentiel à focaliser l'énergie vers plusieurs positions particulières de l'espace.

Cette caractéristique est mise en œuvre par le processus de pré codage, dont le rôle est d'exploiter une certaine connaissance du canal de propagation pour cibler plusieurs utilisateurs et les servir simultanément. Chacun d'entre eux peut alors bénéficier de la totalité de la bande passante et obtenir un débit très élevé. Notons que bon nombre d'études considèrent des terminaux à antenne unique [36,37] car tous les traitements sont réalisés au niveau de la station de base, l'utilisateur n'ayant pas les informations nécessaires à effectuer de traitements de post codage. A cette focalisation d'énergie est souvent associé le terme d'efficacité énergétique qui contribue à en faire une solution d'avenir très appropriée [37]. En effet, cette focalisation se traduit par un gain plus fort lié au pré codage sans augmentation de la puissance de transmission. En d'autres termes, un système Massive MIMO permet théoriquement de diviser la puissance radio nécessaire à l'obtention d'une même qualité de service qu'un système SISO (Single Input Single Output) par un facteur proportionnel à un nombre d'antennes du système ( $1/M$ ) [35].

**Remarque :** Dans la suite du mémoire nous allons désigner les stations de base Massive MIMO par Mass-BS.

## ***II.5 Architectures réseau et techniques multi-cellulaires coopératives***

Cette section va permettre d'introduire les architectures des futurs réseaux pour lesquels un système Massive MIMO peut avoir un impact fort. En effet il existe de nombreuses architectures (fig II.12) répondant à des objectifs 5G similaires et nous avons ciblé celles qui présentent le plus gros potentiel en termes de haut débit et d'efficacité énergétique [38]. La première partie introduit la notion de réseau hétérogène puis on décrit plus en détail ces petites cellules qu'on appelle couramment *smal*, *pico* ou *femto Cells* (dans un souci de clarté nous n'utiliserons que le terme de *Small Cells*). Enfin certaines techniques usant de coordination inter-cellules sont abordées, différenciant celles annulant les interférences de celles permettant aux stations de base d'émettre conjointement.

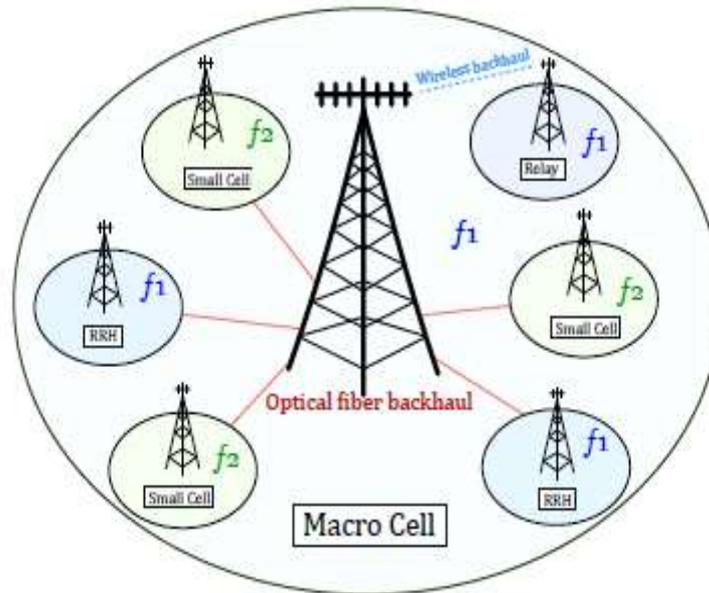
### ***II.5.1 Réseaux hétérogènes (HetNets)***

Un réseau hétérogène, ou réseau multi-RAT2, est constitué de plusieurs technologies fonctionnant simultanément sur des bandes de fréquences pouvant différer. Le terme *Remote Radio Head (RRH)* désigne une station de base secondaire permettant d'étendre ou de renforcer la couverture de la macro cellule. A la différence d'un relais, un tel système est relié au système central via une fibre optique. Un tel réseau va nécessiter une grande flexibilité de la part des récepteurs afin qu'ils puissent, dans un premier temps, commuter rapidement d'une bande à une autre et, dans un second temps, utiliser toutes les bandes en parallèle et ainsi

accroître considérablement le débit utilisateur [39]. Plusieurs techniques sont envisagées pour, soit y remédier avec des techniques de coordination visant à réduire les interférences inter cellules (ICIC), soit profiter de cette diversité avec des techniques de coopération multicellulaires (CoMP) [40] [41].

### II.5.2 Small Cells

De nos jours, un réseau hétérogène est souvent associé aux cellules dites *small cells* [42]. Une telle cellule a la particularité de posséder un rayon de couverture réduit et d'offrir ainsi un débit élevé à ses utilisateurs, découlant directement du fait que moins de terminaux se partagent la ressource.



**Figure II- 10: Réseau hétérogène composé d'une macro cellule (plus ses relais et RRH) et de plusieurs Small Cells permettant de soulager le trafic de données de la macro cellule [42].**

Elle peut alors aisément être complémentaire d'une cellule à plus large couverture mais au débit moindre (macrocell). On parle d'ailleurs d'offloading des données lorsque la transmission d'information est attribuée à la small cell au lieu de la macrocell. La densification des réseaux avec ces small cells rentre pleinement dans les problématiques 5G, tant pour améliorer l'efficacité énergétique (grâce au simple fait de diminuer la taille des cellules) que pour supporter les futurs besoins en débit [42]. Une telle densification va également nécessiter un backhaul pouvant supporter ces forts débits, ces liens étant illustrés sur la Figure II.10 entre la macro cell et les small cells, RRH et relais. Un autre aspect très prometteur des small cells est la mise en place d'un mode veille contrôlé par une macro cell qui serait capable d'activer ou de désactiver la transmission au sein des small cells en fonction des besoins ponctuels en débit [42].

### II.5.3 ICIC (Inter Cell Interference Coordination)

Les techniques ICIC, visent à réduire les interférences inter-cellules afin de faciliter le handover (estuntransfert intercellulaire dans les communications mobiles cellulaires). On parle de coordination car un échange d'information est effectué entre l'utilisateur et les deux SB concernées [43]. Ainsi lors de la gestion du handover, les SB adaptent leur puissance d'émission en fonction des indicateurs reçus pour interférer le moins possible avec l'autre SB et ainsi

faciliter la commutation d'une cellule à l'autre pour l'utilisateur concerné. Soulignons cependant que ces techniques ne couvrent pas les scénarios de réseaux hétérogènes vers lesquels nous nous orientons et de nouvelles méthodes, appelées eICIC pour « enhanced ICIC », ont été définies dans les releases de la norme LTE Advanced pour y remédier. Elles sont classées en 3 catégories : celles liées au domaine temporel, au domaine fréquentiel et au contrôle de puissance [43]. Ces dernières sont efficaces mais ne permettent pas de supprimer complètement les interférences ou de profiter de la multiplicité des cellules pour accroître la capacité globale d'une zone. C'est en cela qu'interviennent les techniques CoMP.

#### II.5.4 CoMP (Coordinated Multi-Point)

Il s'agit d'un ensemble de techniques visant à tirer parti d'une communication entre plusieurs SB afin de réduire ou de s'affranchir des interférences inter cellules tout en augmentant considérablement la capacité et l'efficacité énergétique du système [44]. Deux catégories de CoMP sont identifiées :

- **Joint Processing** (Figure II.11) :cette technique vise à faire coopérer les SB pour :
  - Soit exploiter des cellules adjacente sa fin de transmettre conjointement les informations à un même utilisateur.
  - Soit sélectionner dynamiquement la SB la plus adapte à transmettre les données à un utilisateur en fonction de sa position (handover immédiat).

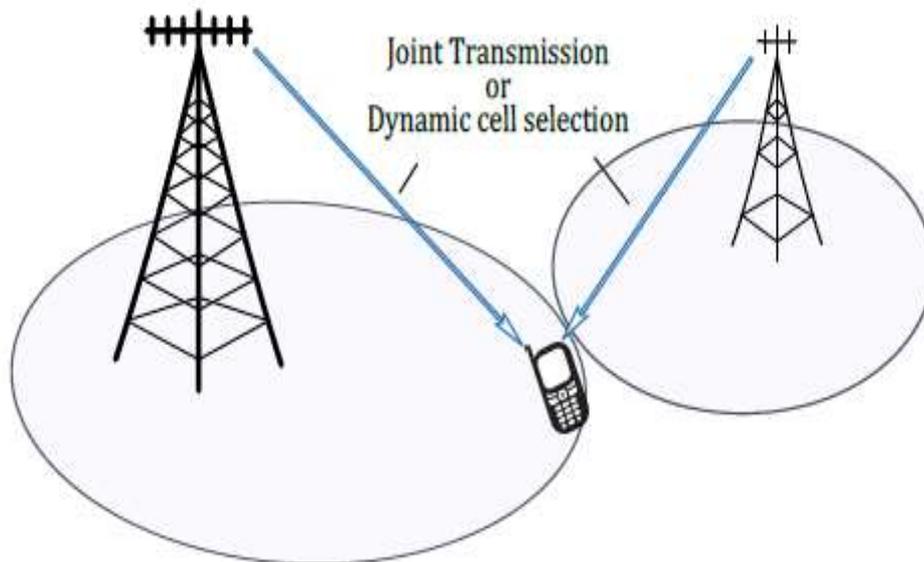


Figure II- 11: Transmission Conjointe

- **CB /CS** (Figure II.11): le Coordinatd Beamforming/Coordinated Scheduling permet, au travers de cette communication inter cellules, la modification du diagramme de rayonnement de chaque SB vers l'utilisateur profitant des mêmes ressources(temporelles/fréquentielles) dans la (les) cellule (s) adjacente(s),tout en offrant un maximum de rayonnement vers l'utilisateur visé.

Une technique CoMP nécessite donc de pouvoir centraliser tous les calculs, ce qui soulève plusieurs problèmes. Par exemple une transmission conjointe va avoir besoin d'une synchronisation fine et donc les backhails reliant chaque small cell ne doivent générer que très peu de latence. De plus, le coût d'un tel déploiement ne sera pas négligeable si l'on considère

l'ensemble des liens fibres à mettre en place. Sur ce point, l'utilisation d'un système Massive MIMO entant que Wireless backhaul est digne d'intérêt. Les systèmes Massive MIMO bénéficieraient beaucoup des techniques CoMP en raison de leur forte vulnérabilité aux interférences inter cellules, Une implémentation réaliste vise à considérer des clusters de cellules formés autour d'unités de calculs centralisées, les interférences inter-clusters pouvant être en revanche très problématiques pour des utilisateurs en bord de cluster.

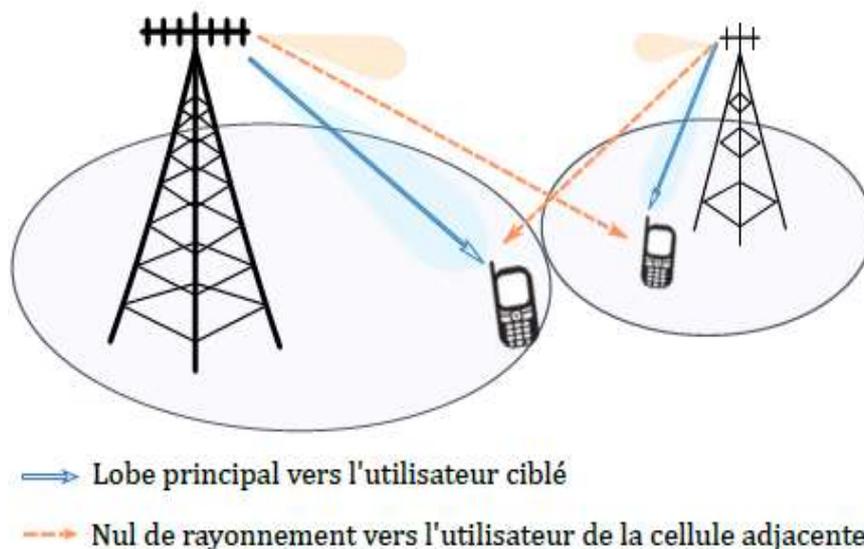


Figure II- 12: Coordinated Beamforming/Coordinated Scheduling.

### II.5.5 Résumé des points forts des architectures hétérogènes :

Résumons succinctement les points forts des architectures hétérogènes :

- **Small Cells :**
  - Capacité accrue
  - Relâchement du trafic géré par la macro cell (*of flooding*)
  - Meilleure efficacité énergétique (encore plus importante avec la mise en place d'un mode veille)
  - Extension de couverture possible
- **ICIC :**
  - Capacité accrue
  - Communications plus robustes grâce à la gestion des interférences.
- **CoMP :**
  - Capacité accrue.
  - Meilleure efficacité énergétique
  - Handover facilité ou inexistant (à part en dehors du *cluster* de cellules que va gérer l'unité centralisée de calculs, plus aucune zone inter cellulaire ne va poser problème).

## II.6 Longueurs d'onde millimétriques (Mmwave)

La réduction de la taille des cellules provoquée par la densification des réseaux permet d'envisager d'exploiter des systèmes à très haute fréquence ( $> 6$  GHz) pour de futures communications. En effet, couvrir une large zone n'est plus possible en raison de fortes pertes en espace libre à ces fréquences, mais de très larges bandes de fréquences peuvent être utilisées et ainsi permettre de découpler le débit [45].

### **II.6.1 Application aux systèmes Massive MIMO**

Il devient de plus en plus évident que l'obtention de tels débits passera par une nette densification des réseaux [46]. Nous allons lister succinctement les avantages et les inconvénients d'une utilisation de ces larges réseaux d'antennes à très hautes fréquences :

#### **II.6.1.1 Avantages**

*Très faible encombrement* : en effet la taille des antennes est grandement réduite ce qui permet à une Mass-BS de conserver une taille très raisonnable [47].

- *Très larges bandes* : augmenter la bande passante est un moyen direct pour augmenter la capacité d'une cellule (de 100 à 500 MHz de bande contre un maximum de 20MHz aujourd'hui sans agrégation)
- *Canaux majoritairement en Line of Sight (LOS)* : la réduction de la taille des cellules va augmenter la probabilité que le terminal soit en visibilité directe de la SB. Cette particularité va permettre l'utilisation de nouvelles techniques basées sur la structure angulaire du canal [47].

#### **II.6.1.2 Inconvénients**

- *Fortes en sensibilité aux obstructions* : ces fréquences ne pénètrent pas les murs et les communications peuvent subir de fortes dégradations en présence d'obstacles. Cela nécessite d'identifier des scénarios particuliers comme, par exemple, des stades ou des festivals où les obstructions sont très rares et la mobilité est faible [47].
- *Imperfections et couplage* : en hyper fréquences, plus on monte en fréquence plus les lignes de transmission sont fines et par conséquent plus aptes à rayonner. Cet effet va à contresens de la direction prise vers une meilleure efficacité énergétique et il est crucial d'évaluer et de contrôler son ampleur. Le besoin d'intégrer de nombreuses chaînes RF dans un tel système va donc nécessiter une étude approfondie de l'architecture du réseau d'antennes pour réduire le plus possible le couplage entre ces lignes [47].
- *Chaînes RF et antennes coûteuses* : la précision nécessaire à la fabrication de tels systèmes les rend onéreux. Il faudra donc opter pour un compromis coût/performances pour rendre le système viable économiquement.
- *Doppler important* : l'écart fréquentiel provoqué par un élément mobile de vitesse  $v$  est appelé fréquence Doppler  $f_d$ . Elle est liée à la fréquence porteuse  $f_c$  et à la vitesse de la lumière dans le vide.

Par exemple en OFDM, un Doppler important peut déporter les informations portées par une sous-porteuse sur une sous-porteuse voisine, brouillant l'information véhiculée par cette dernière. Les systèmes millimétriques sont donc beaucoup plus pertinents dans des

environnements à très faible mobilité, ce qui est tout à fait cohérent avec la volonté de densifier le réseau dans les zones urbaines denses (piétonnes Outdoor ou Indoor).

## **II.7 Conclusion**

Le futur des télécommunications comprendra indéniablement de nombreux systèmes à grand nombre d'antennes et de nombreuses études sont en cours visant à répondre au mieux aux objectifs fixés pour atteindre les performances attendues. Ce chapitre a ciblé les différents éléments, scénarios et certains aspects fondamentaux, autour desquels gravite le terme de Massive MIMO afin d'avoir une vision globale des possibilités qu'un tel système peut offrir. De plus il est important de différencier les études déjà réalisées des études à mener afin de choisir la direction à prendre pour la suite de mémoire. Nous avons vu qu'il est efficace énergétiquement de déployer un réseau dense de stations de base ce qui permet dans un second temps d'envisager des cellules coordonnées regroupées. Il reste de nombreuses études à réaliser concernant la latence des liaisons entre Mass-BS et UC afin de connaître l'aire maximale que peut couvrir un cluster de cellules coopératives.

L'utilisation de systèmes mmWave semble être un cheminement logique permettant d'accroître les bandes de transmission et donc la capacité dans un réseau dense, sa principale limitation étant les pertes en espace libre subies par l'onde. La taille des réseaux d'antennes est également largement réduite et cela facilitera grandement son intégration dans les futures structures de réseaux mobiles, l'ergonomie des systèmes étant un aspect à ne pas oublier.

# **Chapitre III : Système millimétriques d'architecture hybride Transmitter/ Receiver.**

## Partie 1 : Caractéristiques générales des systèmes Massive MIMO

### III.1.1 Introduction

Ce chapitre va permettre d'établir les principes fondamentaux théoriques nécessaires à la compréhension des choix effectués pour la suite de la mémoire. Nous commencerons donc par décrire le canal et les éléments qui le composent puis l'on développera les aspects rayonnement d'antennes et propagation pour comprendre les avantages et inconvénients résultant de l'association de plusieurs antennes. Ensuite le terme de précodage sera défini et son impact sur les communications évalué. Nous terminerons par une description de deux grandes familles MIMO, à savoir les systèmes MIMO point-à-point et multi-utilisateurs, en les comparant à l'aide des formules de capacité.

### III.1.2 Canal de propagation et notations

- **Définition** : Le canal de propagation décrit la manière dont se propage l'onde entre une antenne d'émission et une antenne de réception. La modélisation de celui-ci est donc très importante afin de permettre au système de communication de s'adapter aux éléments qu'ils entourent, allant du passage d'un piéton ou d'une voiture entre un émetteur et un récepteur à l'atténuation du signal électromagnétique provoqué par l'absorption de l'oxygène dans l'air [48].
- **Diversité d'un système**

On parle d'exploitation de la diversité du canal lorsqu'on se sert de la nature dispersive du canal pour envoyer plusieurs répliques d'un même signal au récepteur. En effet, plus ce dernier reçoit de répliques moins il y a de chances que toutes aient subi une forte atténuation et l'on améliore ainsi la qualité du lien radio. L'exploitation de la diversité du canal ne sert que lorsque le canal subit de fortes atténuations car dans le cas contraire, exploiter cette diversité ne fera qu'utiliser de la ressource spectrale, temporelle ou spatiale, ressources toutes aussi rares et précieuses, pour un gain presque inexistant. La sélectivité du canal doit donc être étudiée au préalable.

Cette étude se base sur l'hypothèse d'un canal sélectif en temps et en fréquence dès lors que des trajets réfléchis sont pris en compte.

- **Diversité temporelle**

Exploiter la diversité temporelle du canal consiste à envoyer plusieurs fois le même signal à des instants différents. Cela revient à répartir les données utiles dans le temps, par exemple à l'aide de codage de canal et d'entrelaceur temporel, afin de pouvoir recombinaison en réception les différentes instances et reconstruire le signal utile [49].

Pour exploiter au mieux la diversité temporelle, il est nécessaire que deux instances du même signal soient espacées d'au moins le temps de cohérence du canal  $T_{coh}$ , temps pendant lequel le canal est considéré comme statique.

$$T_{coh} \propto \frac{1}{f_{dmax}} = \frac{c}{v_{max}f_c} \quad (III.1)$$

Où  $v_{max}$  est la vitesse maximale pouvant être atteinte par n'importe quel élément de l'environnement, est  $f_{dmax}$  la fréquence Doppler générée par cet élément,  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide et  $f_c$  est la fréquence porteuse.

### ▪ Diversité fréquentielle

En présence d'un canal sélectif en fréquence, l'exploitation de la diversité fréquentielle consiste par exemple à émettre le même signal sur deux porteuses différentes au même instant.

Pour exploiter au mieux la diversité fréquentielle, l'espacement entre deux porteuses, ou deux bandes de fréquences, doit excéder la bande de cohérence  $B_{coh}$  du canal et est inversement proportionnel à l'étalement des retards ( $\tau_{max}$ ). Une évaluation de la bande de cohérence est donnée par :

$$B_{coh} \propto \frac{1}{\tau_{max}} \quad (III.2)$$

### ▪ Diversité spatiale

La diversité spatiale peut être exploitée lorsqu'un signal est émis de plusieurs points distincts de l'espace. La distance ( $d$ ) entre chaque antenne d'un même réseau d'antennes doit être d'au moins une demi longueur d'onde ( $d \geq \frac{\lambda}{2}$ ) pour que la diversité puisse être exploitée (antennes suffisamment décorrélées). Le couplage entre les antennes va également dégrader les performances.

#### III.1.2.1 Notation

Selon qu'il s'agisse d'un système MIMO point-à-point ou d'un système MIMO multi-utilisateurs nous allons utiliser différentes notations, illustrées sur la Figure II.1, pour identifier le nombre d'antennes afin de conserver les notations des ouvrages constituant l'état de l'art :

- En MIMO point à point, on appellera donc  $N_t$  le nombre d'antennes d'émission et  $N_R$  le nombre d'antennes de réception.
- En MIMO multi-utilisateurs, on posera  $M$  le nombre d'antennes à la SB et  $K$  le nombre d'utilisateurs de la cellule ayant chacun  $n_{UE}$  antennes. On considère  $n_{UE} = 1$  pour la suite de ce document, étant l'hypothèse la plus généralement adoptée en Massive MIMO.

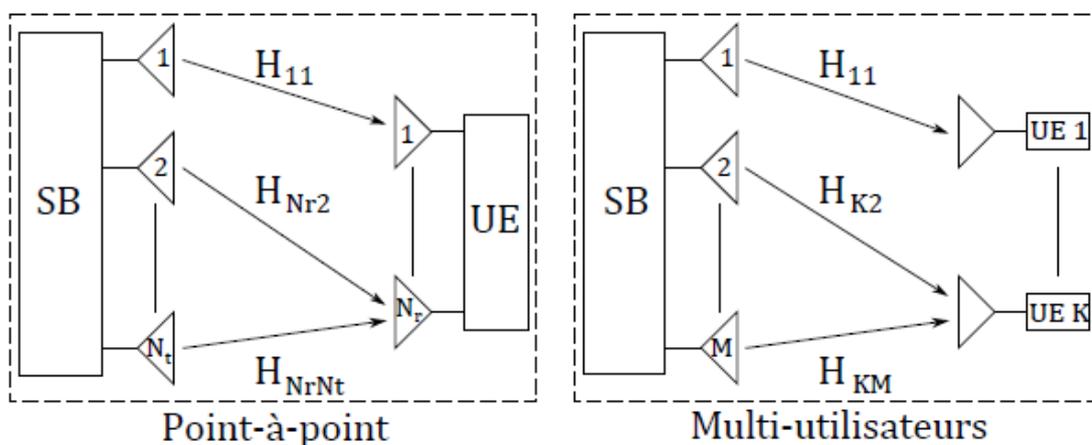


Figure III- 1: présentation des canaux en MIMO point-à-point et multi-utilisateurs.

### III.1.3 Antennes et propagation

Dans un premier temps nous allons résumer les principes fondamentaux de ces réseaux d'antennes afin de percevoir les possibilités offertes par l'exploitation de très nombreux

éléments rayonnants. Dans un second temps sans parlera succinctement des réseaux appelés *Smart antennas* pour introduire le terme de beamforming dynamique (formation de faisceau), terme largement exploité dans la littérature et dont le sens diffère selon le domaine d'utilisation.

### III.1.3.1 Réseaux d'antennes

#### ▪ Définition

On appelle réseau d'antennes un dispositif regroupant plusieurs éléments rayonnants, chaque élément se voyant alimenté différemment en amplitude et en phase. Un réseau d'antenne classique non reconfigurable possède une architecture fixe qui lui permet d'alimenter chaque antenne avec un certain déphasage (dépendant de la longueur des lignes) et une certaine intensité. La figure III.2 montre en noir un réseau classique et si un contrôle dynamique est ajouté(bleu) on parle alors de *Smart antennas*.

Les deux principaux objectifs d'une telle association sont :

- Obtenir de meilleures performances radio qu'avec un élément unique en permettant la recombinaison constructive de sondes rayonnées par chaque antenne dans une direction particulière.

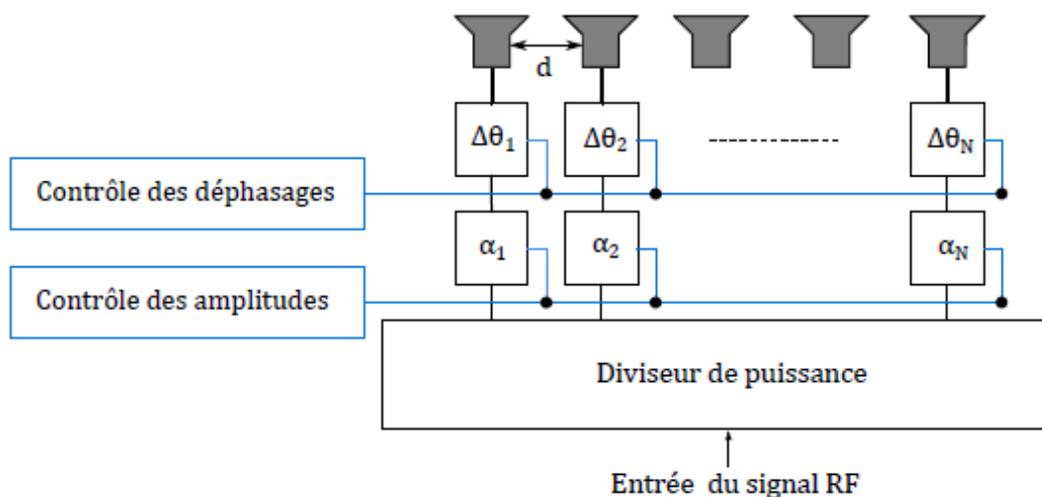


Figure III- 2: Structure d'un réseau d'antennes, chaque chaîne RF subissant un déphasage et/ou une atténuation nécessaire à l'obtention du diagramme de rayonnement désiré. Si un contrôle dynamique est implémenté (blocs bleu), on appelle ces systèmes des Smart Antenna

- Créer des rayonnements de formes complexes et surtout reconfigurables dans le cas où chaque alimentation est contrôlée indépendamment (en module et en phase).

#### III.1.3.1.1 Facteur de réseau et diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes est par définition la représentation de son rayonnement électromagnétique dans toutes.

Les directions de l'espace. Il correspond au produit d'un facteur décrivant le gain du réseau d'antennes dans une direction particulière, appelé facteur de réseau  $F$ , et de leur rayonnement propre (e.g. figure III.2). On peut donc exprimer les champs électrique  $\vec{E}^{res}$  et

magnétique  $\vec{H}^{res}$  rayonnés par le réseau, en fonction des rayonnements électriques  $\vec{E}^{ele}$  et magnétiques  $\vec{H}^{ele}$  des éléments rayonnant individuels, de la manière suivante:

$$\vec{E}^{res}(\vec{r}) = F(\theta, \varphi) \cdot \vec{E}^{ele}(\vec{r}) \quad (\text{III.3})$$

$$\vec{H}^{res}(\vec{r}) = F(\theta, \varphi) \cdot \vec{H}^{ele}(\vec{r}) \quad (\text{III.4})$$

Avec  $r, \theta, \varphi$  respectivement le rayon, l'angle en élévation et l'angle en azimut.

- **Facteur de réseau F** : ce facteur est calculé à partir des éléments suivants :
  - L'amplitude du signal d'alimentation de l'antenne ( $\alpha$ ) ;
  - La phase du signal d'alimentation de l'antenne ( $\phi(\theta; \varphi)$ ) ;
  - La distance entre 2 antennes (d).

Cette distance (d) va agir directement sur la directivité du diagramme de rayonnement. Elle doit respecter  $d \geq \frac{\lambda}{2}$  pour permettre au système d'exploiter la diversité spatiale et être la plus élevée possible (plus de directivité) tout en étant suffisamment faible pour éviter le phénomène dit de recouvrement spectral. Ce phénomène se traduit par l'apparition de maximums de rayonnement dans des directions différentes de la direction d'intérêt, ce qui provoque donc de fortes interférences et réduit sensiblement l'efficacité énergétique du système. Dans la grande majorité des études sur les systèmes Massive MIMO, la distance entre antennes est fixée à  $d = \frac{\lambda}{2}$  car il s'agit de la valeur permettant d'éviter ce phénomène dès lors que l'on souhaite dépointer le faisceau entre  $-90^\circ$  et  $90^\circ$ . Une distance plus élevée serait intéressante pour accroître les performances d'un système Massive MIMO si la Mass-BS doit couvrir un secteur angulaire plus étroit. Aucun autre paramètre n'intervient dans le calcul du facteur de réseau.

La figure III.3 montre l'impact de l'augmentation du nombre d'antennes sur le facteur de réseau. Ce paramètre permet d'illustrer la capacité du réseau à focaliser l'énergie dans une direction particulière. On voit par exemple qu'en doublant le nombre d'antennes, on double également la quantité d'énergie rayonnée dans la direction choisie (ici à la perpendiculaire du réseau). On appelle ce gain le **gain de beamforming**.

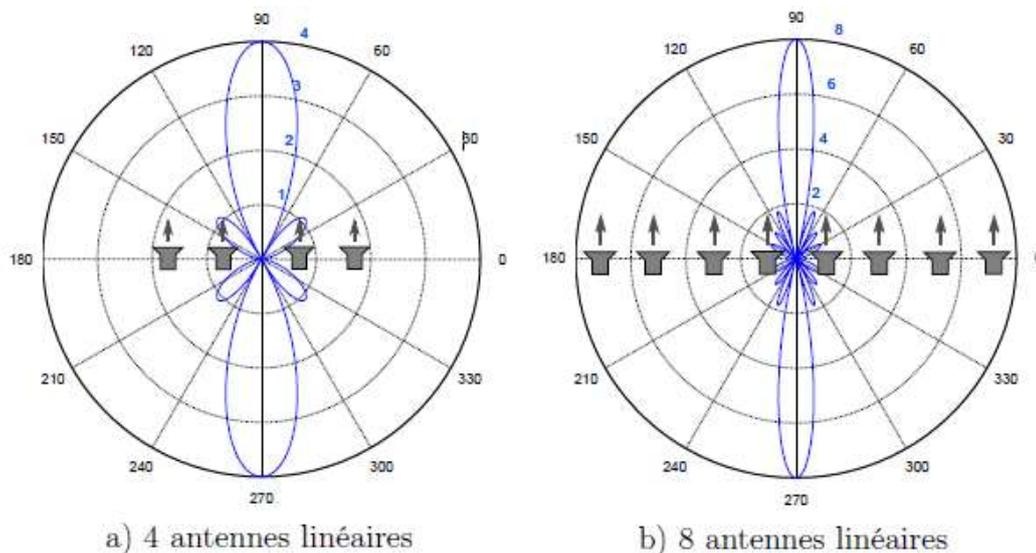
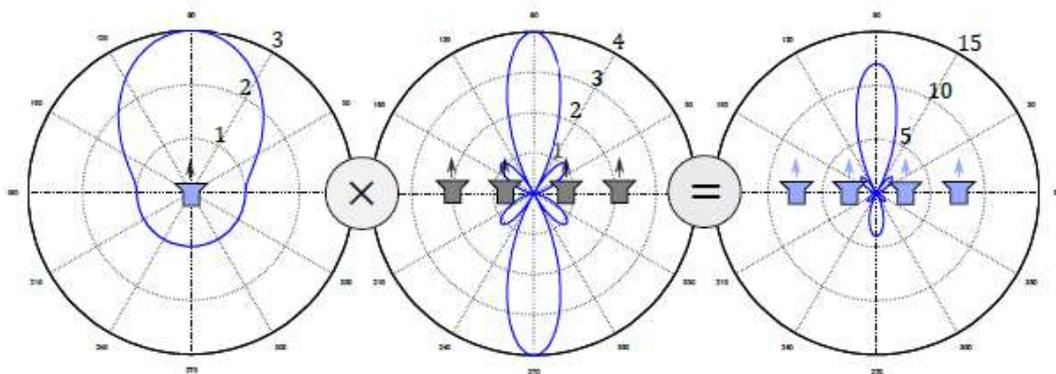


Figure III- 3: Facteur d'un réseau linéaire uniforme a) 4 éléments , b) 8 éléments

**Remarque :** la puissance d'émission totale du système ne change pas, ce gain provient du fait que plus il y a d'antennes plus le faisceau d'énergie est étroit et moins l'énergie est dispersée dans des directions indésirables.

- **Diagramme de rayonnement:** le diagramme de rayonnement d'une antenne est lié à sa technologie et il représente la manière dont un élément va rayonner dans l'espace. De la même manière, on parle de diagramme de rayonnement du réseau d'antennes lorsqu'on considère le rayonnement global correspondant à la somme des rayonnements de chaque élément le constituant.

Par exemple si l'on utilise des antennes isotropes (qui rayonnent uniformément dans toutes les directions de l'espace) disposées de la même manière que dans l'exemple de la Figure III.3, le diagramme résultant serait identique à celui obtenu en calculant le facteur de réseau. En revanche si l'on sélectionne des éléments directifs tels que des antennes cornet son atténuer a fortement le rayonnement parasite généré par la symétrie du plan du réseau (rayonnement vers l'arrière) un gain sera apporté dans la direction à 90°. Sur la Figure III.4, la figure de gauche représente le diagramme d'une antenne cornet et la figure du milieu le diagramme résultant du facteur de réseau d'un réseau uniforme linéaire à 4 éléments, nous obtiendrons alors le diagramme de rayonnement du système global, à savoir 4 antennes cornet espacées de  $\frac{\lambda}{2}$ , représenté sur la figure de droite [59].



**Figure III- 4:** Illustration du diagramme de rayonnement résultant du produit de 2 diagrammes, celui du facteur de réseau et celui de l'élément rayonnant individuel.

### III.1.3.1.2 Couplage

Ce phénomène apparaît lorsque deux sources élémentaires rayonnantes sont proches :

- **Déformation du diagramme de rayonnement**

Si les antennes sont trop proches le rayonnement de l'une va parvenir à l'autre qui va jouer le rôle de réflecteur. Cette énergie réfléchi par les antennes adjacentes va alors globalement modifier le diagramme de rayonnement de l'ensemble.

- **Désadaptation des antennes**

Les antennes n'étant pas des réflecteurs parfaits une partie de l'onde provenant du rayonnement voisin va être absorbée, provoquant leur désadaptation. Une perte d'énergie va ainsi être observée et cet effet va bien entendu augmenter avec le rapprochement des

éléments du réseau. Ce couplage peut être pris en compte lors de simulations en le représentant sous forme de matrice d'impédance.

**Remarque 1 :** l'utilisation d'antennes directives dans un réseau d'antennes plan va permettre de réduire fortement les effets de couplage.

**Remarque 2 :** dans un système mmWave, les lignes de transmission étant extrêmement fines, elles sont très susceptibles de rayonner et de faire apparaître du couplage avec les lignes adjacentes. Bien que cet aspect doive impérativement être pris en compte lors de la conception d'un réseau d'antennes [50,51], nous allons considérer dans la suite de cette mémoire un système sans couplage afin de mettre en valeur l'impact des traitements numériques à base d'angles. Une approche plus détaillée du phénomène de couplage en Massive MIMO est réalisée dans [52].

### ***III.1.3.2 Antennes Intelligentes et formation du faisceau (beamforming)***

Le terme *Smart antennas* englobe de nombreuses techniques, la caractéristique commune étant la capacité à faire évoluer dynamiquement le diagramme de rayonnement (cf. Figure III.2 pour la structure de réseau d'antennes). Les avantages de tels systèmes sont connus depuis déjà de nombreuses années mais la complexité de ces systèmes ne rendait pas de telles technologies commercialisables. Dans [53], les avantages de ces réseaux intelligents énoncés sont :

- Une meilleure efficacité spectrale permettant d'accroître la capacité de la cellule ;
- Une réduction de l'étalement des retards et des évanouissements liés aux multi-trajets vus de la Mass-BS, du brouillage, du BER et de la probabilité de coupure de la transmission.
- Les gains retenus proviennent de la capacité de ces réseaux d'antennes à former un faisceau et à le diriger vers un utilisateur de la cellule en suivant son déplacement. On voit sur la figure III.5 que chaque trajet indirect ou signal provenant d'un autre utilisateur est automatiquement atténué et le gain obtenu dans la direction d'intérêt, qu'on appelle gain de beamforming, va permettre d'augmenter grandement le bilan de liaison [54].

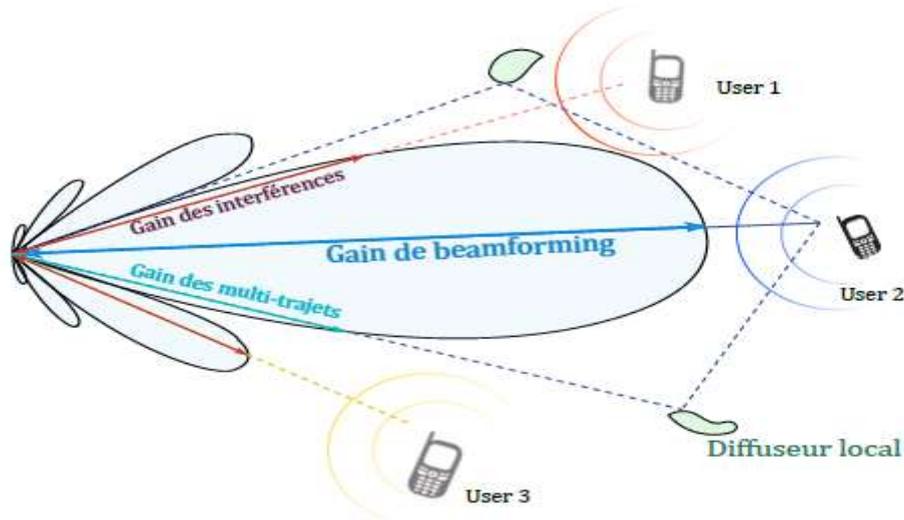


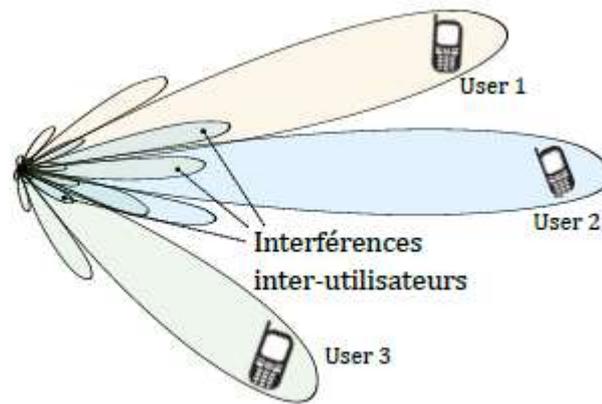
Figure III- 5: Beamforming analogique.

Cette modification du diagramme de rayonnement étant réalisée en analogique, il n'est pas possible de créer plusieurs faisceaux RF portant des données différentes. Cela rend donc le système incompatible avec un fonctionnement multi-utilisateurs où l'accès se fait via un multiplexage spatial (MU-MIMO). Nous allons développer dans la section suivante en quoi le passage au numérique va permettre de mettre en œuvre ce multiplexage spatial [55].

- **MIMO multi-utilisateurs (MU-MIMO)**

En MIMO multi-utilisateurs, la SB doit estimer le canal entre ses  $M$  antennes et le différent utilisateur sa fin de générer les coefficients d'antennes propres à former un faisceau, celui-ci dirigeant l'énergie de sorte à ce que chaque utilisateur reçoive ses données brutes. Les diagrammes sont alors sommés après avoir été pondérés par le symbole à leur transmettre. Il en résulte un rayonnement global constitué des faisceaux portant les informations différentes à destination de chaque utilisateur (cf. Figure III.6).

**Remarque :** les illustrations représentant des faisceaux dirigés vers les utilisateurs correspondent au cas particulier d'un scénario purement LOS car seul le trajet direct est utilisé pour transmettre l'énergie. Dans un cana à multiples réflexions, le faisceau formé peut être beaucoup plus complexe si le système s'en sert pour accroître les performances. Cela revient à effectuer un multiplexage spatial qu'on appelle aussi SDMA, principe sur lequel se base tout système MU-MIMO. Les interférences inter utilisateurs proviennent des recouvrements des diagrammes de rayonnement, autrement dit certains lobes secondaires se retrouvent dans le lobe principal d'un autre utilisateur ce qui peut provoquer de fortes interférences si le phénomène n'est pas contrôlé.



*Figure III- 6: Technique d'accès SDMA-beamforming multi-utilisateurs*

### **III.1.4 Précodage et Formation du faisceau**

La notion de précodage [56,57,58,59,60,61] apparaît dès lors que l'on effectue un traitement numérique à l'émission codant puis répartissant les données sur chacune des antennes, à l'aide d'une connaissance plus ou moins parfaite du canal de transmission. Il s'agira toujours de codes usant de la dimension spatiale car c'est là tout l'intérêt du MIMO. Cependant ce terme est générique et peut prendre en compte des traitements exploitant d'autres ressources comme, par exemple, la ressource temporelle pour des codes spatio-temporels.

- **Aspect propagation** :le pré codage va permettre de focaliser l'énergie dans une direction ou une zone particulière (respectivement pour une communication en LOS).
- **Transmissions multi-porteuses** :En OFDM,ou pour toute autre forme d'onde multi-porteuses, le précodage est effectué sur chaque sous- porteuse indépendamment, le canal y étant plat [58].

**Remarque :** Les performances des différents pré codeurs vont être étroitement liées à la qualité de l'estimation du canal, celle-ci impactant directement la focalisation de l'énergie. On peut imaginer à l'extrême que si l'estimation est très mauvaise, le faisceau va être trop décalé et l'utilisateur ne recevra plus du tout d'information. De sur croit, un autre utilisateur pourrait se trouver dans cette direction (en prenant l'exemple d'un environnement LOS) et l'interférence qu'il subirait serait alors extrêmement forte

#### **III.1.4.1 Les différents précodeurs linéaires**

Dans cette partie nous allons énumérer les différents précodeurs linéaires que nous avons jugés pertinents pour cette étude [56,62, 61]. S'agissant d'un système MU-MIMO, seule la dimension spatiale est exploitée par le précodage et la structure du système est illustrée figure III.7.

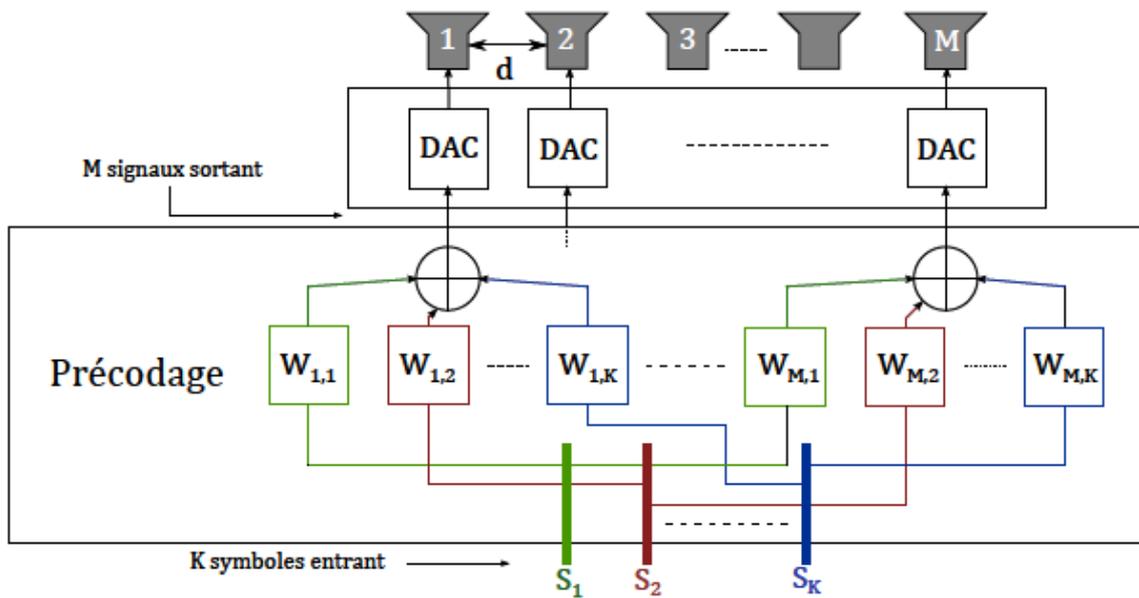


Figure III- 7: Structure d'un réseau d'antennes avec précodage.

#### III.1.4.1.1 Notations

On considère un système multi-utilisateur avec M antennes à l'émission (Mass-BS) et K utilisateurs dans la cellule.

Soit  $s = [S_1, S_2, \dots, S_k]^T \in \mathcal{C}^{K \times 1}$  le vecteur contenant les données (symboles) à destination de chaque utilisateur, on appelle  $W \in \mathcal{C}^{M \times K}$  la matrice de précodage permettant de répartir les données sur chaque antenne émettrice tel que l'on obtienne le vecteur émis  $x = [X_1, X_2, \dots, x_M]^T \in \mathcal{C}^{M \times 1}$ . En d'autres termes, chaque antenne va ainsi émettre une combinaison linéaire des K symboles du vecteur entrant [62].

$$x = \sqrt{\eta} W_s$$

Où  $\sqrt{\eta}$  est le facteur de normalisation permettant de s'assurer que la puissance émise sur le canal reste inchangée par le pré codage et ce, quel que soit M.

#### III.1.4.1.2 Formation de faisceaux conjuguée (CB)

Le Conjugate Beamforming, également appelé **retournement temporel** lorsque appliqué dans le domaine temporel, vise à maximiser le SNR. En effet, un tel précodeur va offrir un gain de beamforming maximal à chaque utilisateur mais va générer une certaine quantité d'interférences sur les autres.

**Remarque :** notons qu'il est possible d'utiliser la matrice de canal générale  $G$ , la normalisation par  $\eta$  assurant la conservation d'une puissance d'émission constante. En revanche le fait d'exploiter  $G$  et non pas  $H$  va résulter en une allocation de puissance implicite dépendant des pertes en espace libre subies par chaque utilisateur. En effet,  $\eta$  normalise la puissance par la somme des atténuations et non pas par lien utilisateur -Mass-BS. Il en résulte qu'un utilisateur proche de la Mass-BS se verra allouer plus de puissance qu'un utilisateur plus éloigné [50][62].

Intérêt du Conjugate Beamforming: est une somme constructive de combinaisons linéaires du signal utile qui va croître proportionnellement avec le nombre d'antennes  $M$ .

#### III.1.4.1.3 Minimum de l'erreur des moindres carrés (MMSE) :

Le pré codeur MMSE est un compromis entre annulation d'interférences et puissance de bruit ce qui en fait un pré codeur à bas SNR. Il vise donc à maximiser le SNR.

$$W^{(MMSE)} = H^H(HH^H + \sigma^2 + I_K)^{-1} \quad (\text{III.5})$$

Il est d'une grande complexité à cause de l'inversion matricielle nécessaire au calcul de la matrice de pré codage. Il permet de limiter l'impact du bruit à faible SNR.

#### III.1.4.1.4 Beamsteering numérique (DBS)

L'opération de Beamsteering vise à compenser le déphasage que subit l'onde plane sur chaque antenne en appliquant le retard ou avance de phase adaptée et ainsi permettre un rephasage des différentes composantes de l'onde produite ou captées par chaque antenne du réseau. Comme son nom l'indique il s'agit de former un faisceau dont on contrôle la direction [63].

### III.1.5 Capacité

Nous allons tout d'abord introduire les formules générales de capacité pour ensuite les appliquer aux systèmes point-à-point et multi-utilisateurs. Dans un second temps, nous verrons l'impact de l'augmentation du nombre d'antennes sur leurs performances.

#### III.1.5.1 Formule générale

On rappelle que dans le cas général (MIMO point-à-point) on a  $N_t$  antennes d'émission et  $N_r$  antennes de réception. Soit  $\mathbf{x} = [X_1, X_2, \dots, X_{N_t}]^T \in \mathcal{C}^{N_t \times 1}$  le vecteur transmis comprenant les données utiles,  $\mathbf{r} = [R_1, R_2, \dots, R_{N_t}]^T \in \mathcal{C}^{N_r \times 1}$  le vecteur reçu et  $\mathbf{n} \in \mathcal{C}^{N_r \times 1}$  le vecteur de bruits indépendants de variance  $\sigma^2$ , l'équation du canal s'écrit:

$$\mathbf{r} = \mathbf{G}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (\text{III.6})$$

Avec ici  $\mathbf{G} \in \mathcal{C}^{N_r \times N_t}$

La capacité MIMO s'écrit alors:

$$G_{MIMO} = B \log_2 \left( \det \left( I_{\min(N_r, N_t)} + \frac{1}{\sigma^2} Q \right) \right) \quad (\text{III.7})$$

$$\text{Avec : } Q = \begin{cases} \mathbf{G}\mathbf{T}_e\mathbf{C}^H & N_r < N_t \\ \mathbf{C}^H\mathbf{T}_e\mathbf{G} & N_r \geq N_t \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Où  $\mathbf{T}_e = E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H]$  est la matrice de covariance du signal émis comprenant éventuellement une étape d'allocation de puissance.

### III.1.5.2 MU-MIMO versus MIMO point-à-point :

Un système MIMO peut être utilisé de deux manières différentes [64] :

- Un système **MIMO point-à-point** met en œuvre une communication entre un émetteur et un récepteur, chacun ayant un nombre d'antennes supérieur à 1. On parle de point-à-point car, à un instant  $t$  et à une fréquence donnée, il n'y a qu'un seul utilisateur concerné par la transmission. En d'autres termes la BS rayonne dans toute la cellule et alloue à chaque utilisateur une plage temporelle (TDMA) ou fréquentielle (FDMA) sur laquelle toutes les informations transportées par cette ressource leur sont destinées. Une répartition en code (CDMA) est également possible et vise à séparer les différents utilisateurs en leur appliquant à chacun une séquence orthogonale [64].

La figure (III.8 a) illustre une répartition en temps ou en fréquence (la ressource exploitée étant représentée par les différentes couleurs).

- En **MIMO multi-utilisateurs**, les traitements réalisés à la Mass-BS permettent de séparer spatialement les utilisateurs afin de leur allouer toute la bande passante. En d'autres termes cela revient à ouvrir un lien RF entre la Mass-BS et chaque utilisateur. On voit en effet que sur la figure III.8b) les utilisateurs sont visés individuellement ce qui permet d'éviter tout rayonnement inutile dans des directions indésirables. Il en résulte une plus grande efficacité énergétique et une capacité améliorée grâce à la possibilité d'allouer la totalité de la bande, sur tous les temps symboles, à chaque utilisateur selon le principe du SDMA [64].

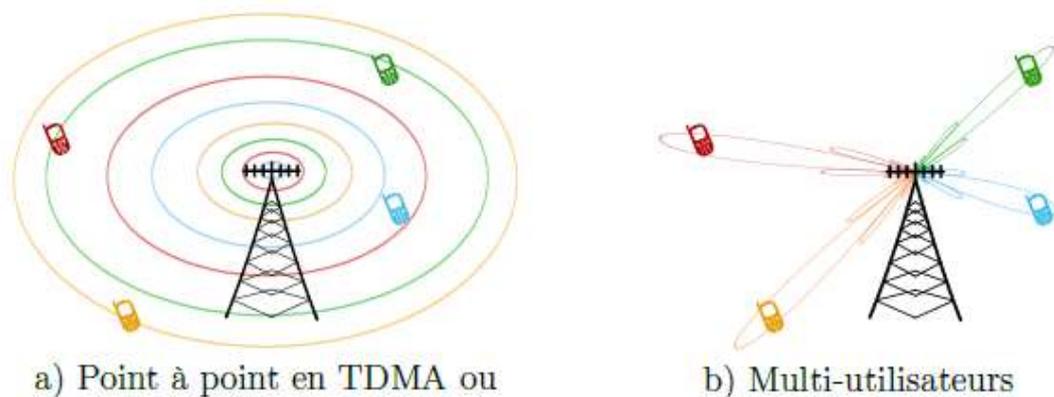


Figure III- 8: Illustration du rayonnement d'un système point-à-point et d'un système multi-utilisateur.

**Remarque :** En point-à-point chaque utilisateur est muni de multiples antennes 28 alors qu'on considère souvent une seule antenne par terminal en multi utilisateur. Dans ce dernier cas, on parle bien toujours de MIMO car on considère que l'antenne de réception (envoi descendant) est constituée de l'ensemble des antennes des différents utilisateurs, formant ainsi un réseau de multiples antennes virtuelles.

- **MIMO point-à-point :**  
Les antennes étant toutes Co-localisées, les pertes sont considérées identiques pour chaque couple antenne d'émission-réception :

$$G = \sqrt{\beta} H \text{ (III.9)}$$

Avec  $\beta$  le facteur d'atténuation moyen lié aux pertes en espace libre et au masquage. On peut alors écrire l'équation de canal (III.10) de telle sorte à faire apparaître ces deux éléments.

$$r = \sqrt{\beta} H_x + n \text{ (III.10)}$$

La matrice du canal  $H \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$  est représentée comme suit :

$$H = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{1N_t} \\ H_{21} & H_{22} & H_{2N_t} \\ H_{Nr1} & H_{Nr2} & H_{NrN_t} \end{pmatrix} \quad \text{(III.11)}$$

Si l'on prend comme hypothèse  $N_t \geq N_r$ , la capacité du système s'écrit alors :

$$G_{P2P} = B \log_2 \left( \det \left( I_{N_r} + \beta \frac{H T_e H^H}{\sigma^2} \right) \right) \quad \text{(III.12)}$$

#### ▪ MU-MIMO :

Un système multi-utilisateur vise à transmettre simultanément leurs données à plusieurs terminaux en exploitant la diversité spatiale. En effet la Mass- BS va utiliser ses nombreuses antennes pour effectuer un filtrage spatial et ainsi séparer spatialement les différents UE présents dans la cellule afin qu'ils puissent bénéficier de la totalité de la ressource temps/fréquence disponible.

En LOS cette séparation spatiale va s'illustrer par la formation de faisceaux en direction des terminaux (cf. Fig. III.9a)), alors qu'en NLOS le système forme une tâche focale autour de l'UE, tâche résultant de la recombinaison constructive des multi-trajets (cf. Fig. III.9b)). Nous allons considérer par la suite que chaque terminal n'est composé que d'une antenne et que K utilisateurs se trouvent dans la cellule. Contrairement au système point à point le facteur d'atténuation en espace libre  $\beta$  va varier.

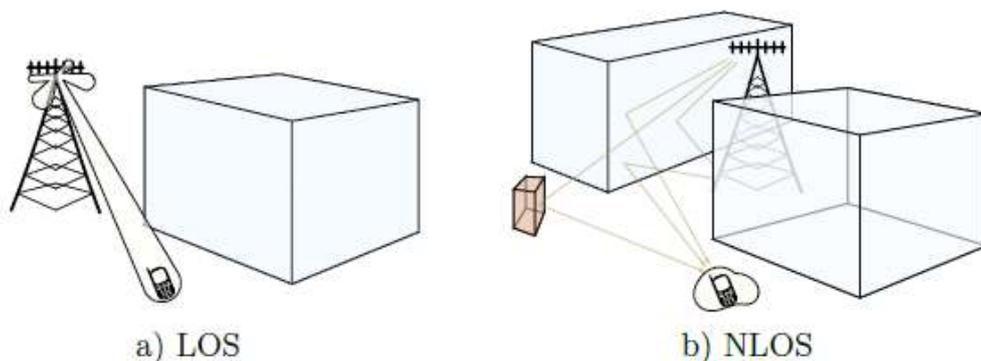


Figure III- 9: Illustration de l'impact du précodeurs sur le rayonnement du réseau d'antenne.

En fonction de l'utilisateur visé et nous allons utiliser  $D_\beta$  On a donc :

$$G = D_{\beta}^{\frac{1}{2}} H \quad (\text{III.13})$$

Et (III.13) devient alors :

$$r = D_{\beta}^{\frac{1}{2}} H_x + n \quad (\text{III.14})$$

Par la suite nous allons toujours considérer  $M > K^{31}$  est donc la capacité devient :

$$G_{MU} = B \log_2 \left( \det \left( I_k + D_{\beta}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{HT_e H^H}{\sigma^2} \cdot D_{\beta}^{\frac{1}{2}} \right) \right) \quad (\text{III.15})$$

Ou plus précisément, en prenant en compte le précodage  $W$  et le coefficient de normalisation  $\eta$  :

$$G_{MU} = B \log_2 \left( \det \left( I_k + \eta D_{\beta}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{HWE[SS^H] W^H H^H}{\sigma^2} \cdot D_{\beta}^{\frac{1}{2}} \right) \right) \quad (\text{III.16})$$

#### ▪ **Comparaison**

Corrélation et couplage :

- **Point-à-point** : Antennes proches (au niveau de la Mass-BS comme du terminal) donc potentiellement beaucoup de corrélation et de couplage.
- **Multi-utilisateurs** : Utilisateurs considérés suffisamment distants par rapport à la longueur d'onde donc corrélation et couplage entre UE considérés nuls .Il reste néanmoins le couplage à gérer à la Mass-BS.

#### ▪ Pré codage ou recombinaison de signaux :

- **Point-à-point** : Au niveau de l'utilisateur les antennes sont co localisées donc il est possible d'appliquer des traitements combinant les signaux reçus sur chaque antenne pour améliorer les performances du système beamforming.
- **Multi-utilisateurs** : Les antennes appartiennent à des utilisateurs différents et donc, les UE ne communiquant pas entre eux, il est impossible de recombinaison les signaux. Pour pallier à cela on applique alors un pré codage au niveau de la Mass-BS permettant de compenser au mieux la dégradation du canal. Plus le nombre d'antennes augmente et plus la Mass-BS est capable de discriminer spatialement les différents utilisateurs, c'est pour- quoi les systèmes Massive MIMO, dont le nombre d'antennes est supposé élevé, va très bien se prêter à ces techniques.

#### **III.1.5.3 Impact du pré codage sur la capacité**

Appliquer un précodage va permettre de former un diagramme de rayonnement avec une forme bien particulière. Ce dernier, résultant de la combinaison du précodage, de l'allocation de puissance et du canal, qu'on appelle  $D_{\theta}$  , va représenter la quantité d'énergie émise dans chaque direction pour un précodage donné. Plus particulièrement,  $(D_{\theta})_{k,i}$  est la quantité d'énergie émise vers l'utilisateur  $k$ , provenant de la transmission destinée.

A l'utilisateur  $i$ , comme illustré Figure III.10 ( $D_\theta$ )  $\in \mathbb{C}^{K \times k}$  est la matrice contenant tous ces coefficients et on peut donc exprimer l'ensemble des signaux reçus de la manière suivante.

$$R = D_\beta^{\frac{1}{2}} D_\theta s + n \quad (\text{III.17})$$

$$\text{Avec : } D_\theta = \sqrt{\eta} H W D_\gamma^{\frac{1}{2}}$$

$D_\theta \in \mathbb{C}^{K \times k}$  Est la matrice diagonale d'allocation de puissance par utilisateur.

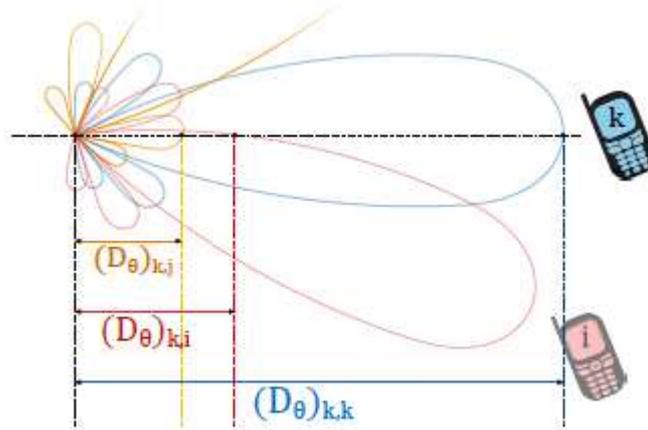


Figure III- 10: Impact du diagramme de rayonnement sur les performances de chaque utilisateur dans un exemple de canal purement LOS

## Partie 2 : Massive MIMO versus Hybride Numérique et Analogique

Afin de pouvoir répondre à la future demande en termes de débit très élevé, les transmissions mmWave sont extrêmement intéressantes car de très larges bandes sont encore non utilisées. De nombreuses questions se posent donc sur la manière de les exploiter et les systèmes Massive MIMO font partie des solutions jugées intéressantes. L'avantage majeur d'une telle technologie est la possibilité de focaliser l'énergie et donc de combattre les très fortes pertes en espace libre que les transmissions à de telles fréquences vont subir. Outre cette capacité de focalisation, l'implémentation d'un tel système en mmWave est un sujet d'étude très prisé pour les principales raisons suivantes : la taille des antennes est de plus en plus réduite et donc le réseau d'antennes à un faible encombrement, les bandes sont larges et le spectre fréquentiel y est pour l'instant très peu utilisé. Malheureusement, à de telles fréquences, de nombreux problèmes de conception apparaissent et intégrer un grand nombre de chaînes RF en parallèle devient très complexe. Des designs commencent à voir le jour pour rendre possible l'intégration de nombreuses chaînes RF parallèles mais l'actualité est à l'étude des systèmes dits *hybrides numériques et analogiques*, identifiés comme des solutions naturelles pour contourner cette complexité [65].

Ces systèmes vont donc permettre de réduire le nombre de chaînes RF, diminuant ainsi la complexité de conception, tout en conservant le même nombre élevé d'antennes nécessaire à l'obtention d'un gain de beamforming élevé. L'analyse système qui va être présentée dans ce

chapitre est née d'une approche similaire visant à réduire le nombre de chaînes RF tout en conservant un maximum de flexibilité pour l'usage d'une transmission multi-utilisateurs. Cette approche est basée, à la fois sur la compréhension que plus la fréquence porteuse est élevée, plus la géométrie de l'environnement de propagation transparait dans la réponse du canal [65] (par exemple la structure angulaire du canal de propagation entre l'émetteur et le récepteur), et à la fois sur le fait que l'implémentation de techniques de formation de faisceau va contribuer à réduire la diversité de ce canal de transmission.

### **III.2.1 Beamforming Hybride Numérique et Analogique**

Dans cette partie nous allons décrire les systèmes Hybrides de manière générale puis la structure choisie afin de pouvoir mettre en œuvre des techniques MU-MIMO.

#### **III.2.1.1 Modèle du système**

Plusieurs structures de systèmes hybrides sont présentées dans [65] [66] et chacune possède des avantages et inconvénients mais peu sont capables de permettre une transmission multi-utilisateur. L'une d'elles est illustrée sur la Figure III.11 où l'on voit le processus de précodage séparé en deux parties :

- Une partie numérique ( $W_D \in \mathbb{C}^{N_D \times K}$ ) où  $N_D$  est le nombre de chaînes (RF) qui se charge d'effectuer le multiplexage spatial (SDMA).
- Une partie analogique ( $W_A \in \mathbb{C}^{M \times N_D}$ ) dont le rôle est de former un faisceau dont le lobe principal englobe tous les utilisateurs à adresser simultanément. Chaque étage analogique, placé en aval d'une chaîne RF, est constitué de  $N_A$  antennes, chacune étant reliée à un déphaseur analogique contrôlé par le système. Ces déphaseurs permettent de contrôler la direction du faisceau formé par les  $N_A$  antennes. Cet étage permet donc d'obtenir un gain de beamforming plus important sans accroître le nombre de chaînes RF. A contrario, plus on souhaite augmenter le gain de beamforming de cette manière plus le faisceau formé est fin et donc moins le lobe principal englobe d'utilisateurs.

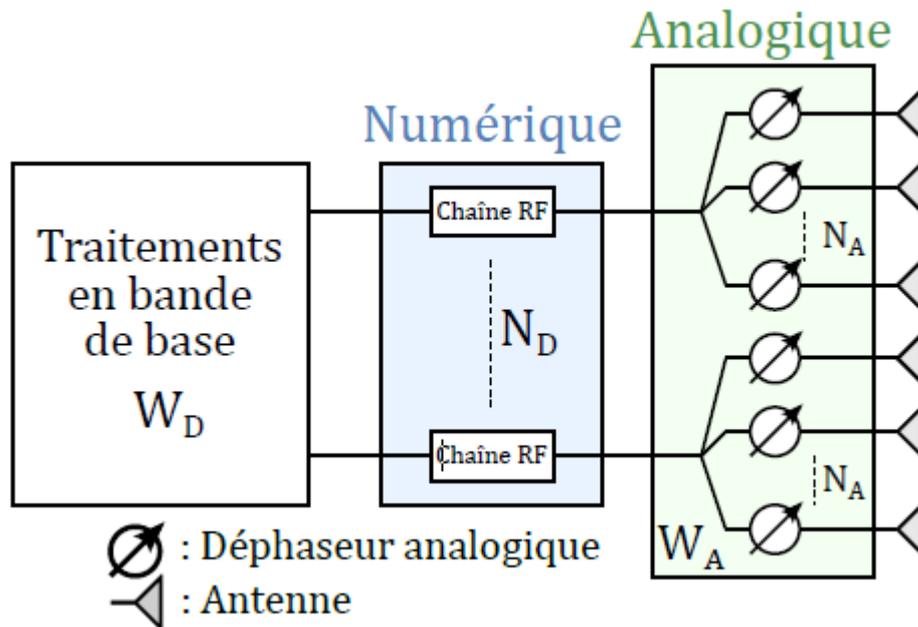


Figure III- 11: Système Hybride Numérique et Analogique.

Avec :

- $N_D$  : le nombre de chaîne RF.
- $N_A$  : est le nombre d'antennes de chaque réseau d'antennes post chaîne RF, chaque antenne étant contrôlée en phase via un déphaseur analogique

### III.2.1.2 Performances d'un système hybride

La Figure III.12 montre comment l'intégration d'un étage analogique derrière chaque chaîne RF agit sur les performances d'un système à grand nombre d'antennes. Les courbes en pointillés correspondent à un système Massive MIMO entièrement numérique et les courbes pleines proviennent de l'implémentation d'un étage analogique. Les réseaux d'antennes analogiques utilisés sont de structure carrée ( $N_A = 4$  sans marqueurs et  $N_A = 16$  avec des marqueurs étoiles). Les courbes bleues proviennent de l'application des précodeurs CB et les vertes proviennent de l'application du DBS [67].

Un premier résultat visible est que le CB reste plus performant, quel que soit le système hybride utilisé, surtout lorsque le nombre d'utilisateurs dans la cellule est élevé. Cela provient de la nature de l'information servant à générer les précodeurs. En effet, le CB permet de compenser le canal de transmission, et cela se traduit par la formation d'un faisceau exploitant tous les trajets du canal. Le DBS, quant à lui, ne s'appuie que sur le trajet direct pour transmettre les données utiles et donc, dès lors que les UE se rapprochent, la corrélation de leurs canaux augmente et l'interférence est plus forte. Dans le cas du CB, la prise en compte des réflexions dans le précodage permet d'obtenir des canaux plus décorrélés et donc les UE sont plus facilement discriminées, et les performances observées meilleures.

En ce qui concerne l'implémentation d'un étage analogique, il est clair que les performances du système sont meilleures, quel que soit le précodeur sélectionné. En revanche, passer de  $N_A = 4$  à  $N_A = 16$  n'accroît que très peu les performances (beaucoup moins que

passer de  $NA = 1$  à  $NA = 4$ ). En effet, plus le nombre d'antennes de l'étage analogique est élevé, plus le faisceau est étroit et donc moins  $K$  regroupe d'utilisateurs.

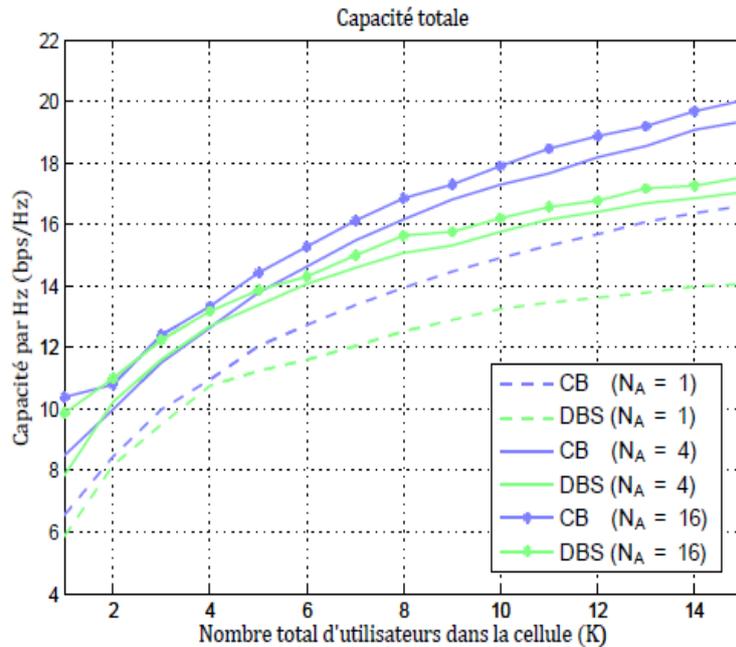


Figure III- 12: Comparaison des performances entre un système hybride à :

$NA = 1$ ,  $NA = 4$  et  $NA = 16$  antennes par étage analogique rattaché à chaque chaîne RF. Les UE sont des terminaux à antenne unique et la Mass- BS possède  $ND = 16$  chaînes RF. Les résultats proviennent d'une moyenne sur 600 positions aléatoires des UE dans la cellule.

### III.2.2 Massive MIMO avec terminaux directifs

Un système Massive MIMO tel que décrit dans cette mémoire considère les UEs comme des terminaux à antenne unique. En effet, chaque UE reçoit l'information directement sans avoir besoin de connaître le canal de transmission, contrairement à de nombreuses techniques MIMO en point-à-point. En MU-MIMO, l'appellation *single antenna terminal* traduit en réalité la présence d'une unique chaîne RF [68]. En effet, si l'on considère un réseau d'antennes analogique derrière cette chaîne RF, le terminal est toujours considéré comme ayant une antenne unique, à la différence presque cette antenne possède un rayonnement directif particulier, et potentiellement contrôlable. En effet, grâce à la présence de déphaseurs analogiques on peut alors obtenir un terminal *single antenna* dont on contrôle la direction du maximum de rayonnement de l'antenne [68].

L'idée principale est de déporter le réseau d'antennes analogiques de la station de base hybride. La section qui suit va donc décrire comment un terminal peut ajuster la direction de son faisceau en temps réel afin qu'il puisse viser la Mass-BS en permanence avec son lobe principal de rayonnement.

### III.2.2.1 Description

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que l'UE possède un réseau d'antennes dont la direction du faisceau puisse être contrôlée de manière analogique 1 ou numérique 2. L'objet de celle-ci est d'adapter la direction du lobe principal de rayonnement de l'UE en fonction de son mouvement (inclinaison et déplacement).

### III.2.2.2 Généralisation à tous réseaux d'antennes 3D

Dans le cas d'un réseau d'antennes 3D, ou multicouches, il convient d'appliquer à la direction du faisceau est déterminée par rapport à un réseau plan et la Figures III.13 illustre les coordonnées des antennes en coupe verticale perpendiculaire au plan, et les coordonnées des antennes en projection sur ce plan par rapport à une antenne de référence, choisie arbitrairement et ayant les coordonnées (0,0) dans le plan [69].

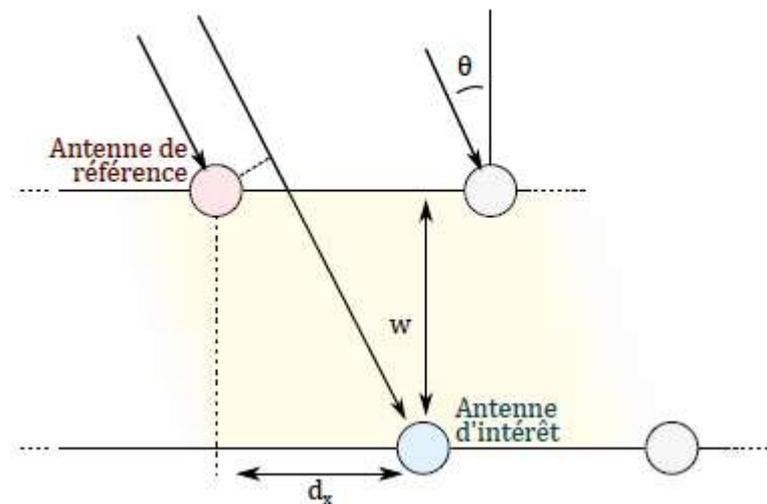


Figure III- 13: Structure d'un réseau d'antennes multicouches chaque antenne un déphasage adapté

### III.2.3 Comparaison entre systèmes Hybride et Massive MIMO avec terminaux directs

Avec un système hybride, nous avons vu qu'accroître le nombre d'antennes contrôlées de manière analogique a ses limites. Dans un scénario, la seule solution efficace pour accroître la capacité de la cellule repose dans l'addition de nouvelles chaînes RF. Il est important de souligner que cela est à l'opposé de l'objectif premier d'un système Hybride, conçu pour diminuer ce nombre.

De plus, le fait qu'une solution hybride requiert des UE suffisamment proches pour pouvoir mettre en œuvre une technique d'accès SDMA réduit les bénéfices d'une transmission multi-utilisateurs.

En effet, le principe fondamental d'un système MU-MIMO est le suivant: Moins les canaux des utilisateurs sont corrélés, moins l'interférence inter-utilisateurs est forte et donc plus la capacité de la cellule est élevée. Dans un environnement LOS, cela se traduit par le besoin de mettre le plus de distance possible entre les utilisateurs de la cellule afin d'obtenir le moins d'interférences possible. En réalité les positions idéales des utilisateurs peuvent être déterminées pour que chacun se trouve dans les nuls de rayonnement de tous les autres UE

Cela n'est en revanche pas très réaliste pour un scénario de small cell similaire à celui présenté dans cette thèse car les UE ont un mouvement aléatoire. Cependant, certains scénarios ayant des terminaux placés à des endroits bien Particuliers.

#### **III.2.4 Conclusion**

Les systèmes Massive MIMO aux longueurs d'onde millimétriques sont des solutions prometteuses, principalement car ils offrent de forts gains de beamforming permettant de contrecarrer les fortes pertes en espace libre. Le fait que le temps de cohérence soit inversement proportionnel à la fréquence porteuse ne facilite pas l'implémentation de techniques basées sur la connaissance des réponses impulsionnelle ou fréquentielles du canal. L'utilisation de terminaux directifs, bénéficiant d'un gain de beamforming complétant celui de la Mass-BS, va alors rapidement compenser la restriction du nombre d'antennes de la Mass-BS, et leurs réseaux d'antennes peuvent être entièrement analogiques sans que cela ne dégrade les performances.

Un système Massive MIMO permet d'atteindre des débits très élevés, ce qui est d'autant plus vrai en multi-utilisateurs, car les terminaux sont généralement considérés comme décorrélés de par l'espacement inter utilisateur excédant grandement la longueur d'onde du système. Cela permet donc de s'approcher plus facilement des bornes supérieures de la capacité.

## Chapitre IV : Simulation et résultats

### **III.1 Introduction**

Après avoir finalisé la partie théorique, nous passons dans ce chapitre à l'implémentation de notre application.

Dans ce chapitre, pour la première étape, nous commencerons par l'étude de la première antenne qui est une antenne imprimée micro ruban à patch unique. Nous mettrons l'accent sur la conception en se basant sur une petite taille à une fréquence de résonance de 28GHz. Ensuite, nous allons faire une simulation pour trouver des paramètres internes (paramètres S..., bande passante) et des caractéristiques externes (gain, directivité et modèle de rayonnement) en utilisant l'environnement Simulink/MATLAB 2019b. Pour augmenter le gain total de l'antenne et avoir une bande passante plus large et en profitant de la fonctionnalité de la superposition de rayonnement de plusieurs éléments rayonnants dans une même direction, nous suggérons la deuxième étape, qui est la plus importante afin de concevoir un réseau d'antennes regroupant des patchs identiques à notre première antenne patch proposée à la première étape.

Après nous allons modéliser une chaîne de transmission MIMO basée sur la technologie mmWave, à savoir l'étude de la chaîne de transmission dans la bande des 28 GHz.

### **IV.2 Conception et Simulation du Réseau d'antennes pour la Bande des 28 GHz**

Le développement et la simulation de réseaux d'antennes pour la bande des 28 GHz peuvent être divisés en deux aspects généraux :

- 1/ Conception d'une antenne résonante à 28 GHz
- 2/ Mise en place de réseaux d'antennes pour la bande des 28 GHz à partir de l'élément antennaire précédemment conçu.

Chacun de ces aspects à ses propres caractéristiques et, en même temps, ils doivent être décomposés en autres étapes de conception.

#### **IV.2.1 Conception de l'antenne patch résonante à 28 GHz**

##### **IV.2.1.1 Structure de l'antenne**

La structure de l'antenne proposée comme, et montre la figure IV.1, présente deux fentes en forme de U gravées sur un patch rectangulaire. Le plan inférieur est le plan de masse sont composés avec un matériau PEC (Perfect electric Conductor).

1. Dans notre étude, nous avons opté pour une utilisation d'une antenne patch micro ruban rectangulaire. Nous avons choisi de concevoir notre antenne pour la fréquence de 28 GHz et nous l'avons simulée avec le Toolbox Antenna de Matlab. Le patch a une structure compacte de 6.285 mm × 7.235 mm × 0,5 mm.
2. L'antenne proposée résonne à 28.5 GHz avec une perte de retour de -13,48 dB, bande passante de 847 MHz, gain de 6,63 dB et efficacité de 70,18%. Une ligne de transmission d'alimentation en médaillon.
3. La technique est utilisée pour faire correspondre le patch rayonnant et le 50 Ω ligne d'alimentation micro ruban. Dans la conception, un Roger RT Duroid 5880 substrat qui a

une constante diélectrique de 2,2 et une tangente de perte de 0,0009 avec une hauteur de 0,5 mm a été utilisé.

- Après avoir choisi la fréquence de fonctionnement (28 GHz) et diélectrique constante du substrat (RT Duroid 5880), le principal les paramètres sont la longueur L, la largeur W et l'épaisseur h, du substrat comme indiqué sur la figure :

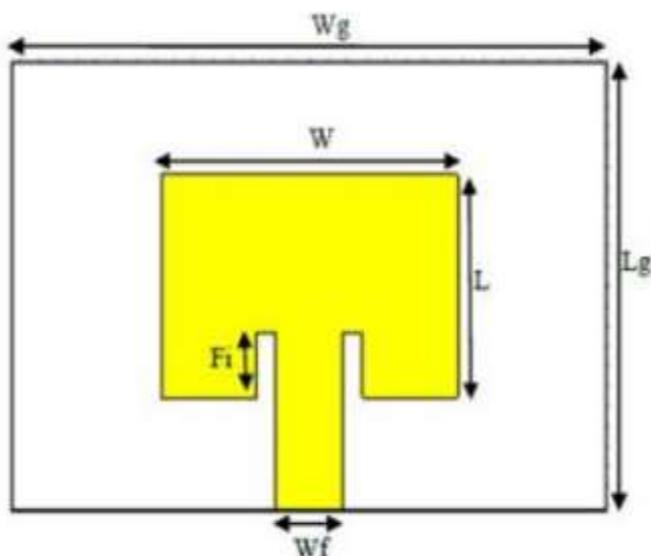


Figure IV- 1: Un patch Micro -ruban

Les dimensions sont optimisées de l'antenne proposée en les résumant dans le tableau IV.1:

Paramètres	Dimensions (mm)
Longueur du plan au sol, Lg	3.285
Largeur du plan au so, Wg	7.235
Longueur du patch, L	3.4
Largeur du patch, W	4.1
Hauteur du substrat, h	0.5
Largueur de la ligne d'alimentation, Wf	1.25
Insertion de la ligne d'alimentation, Fi	1.25
Epaisseur du sol, t	0.035

Tableau IV- 1: Dimensions de l'antenne patch

Comme la fréquence de fonctionnement est élevée, il doit être conçu avec une structure simple ; donc, le patch est alimenté par une ligne micro ruban avec une impédance d'entrée de 50Ω, sa largeur est de Wf = 1.25 mm.

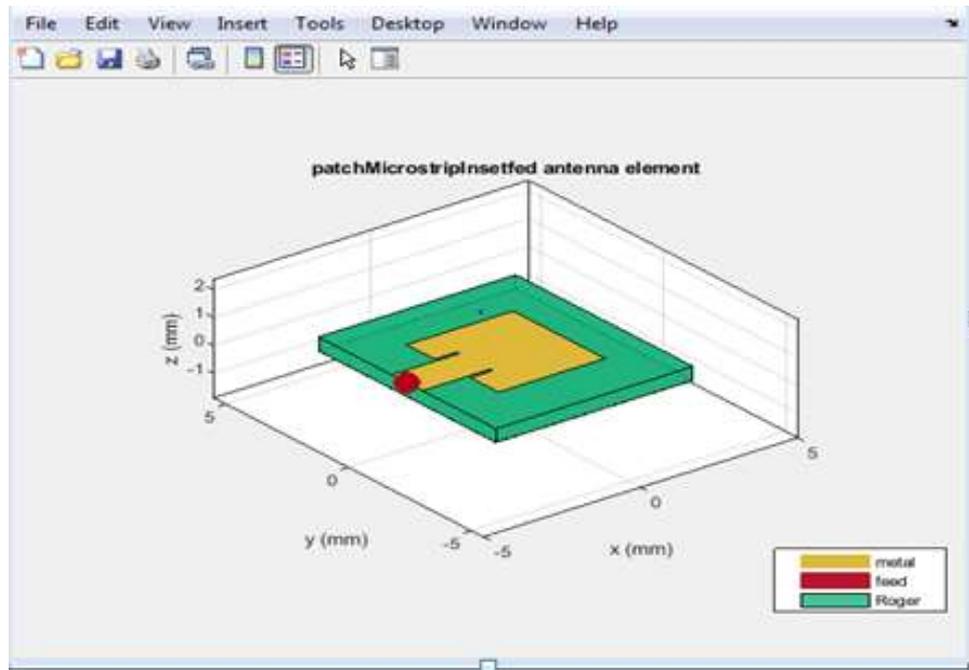


Figure IV- 2: le modèle de l'antenne patch

#### IV.2.1.2 Conception de l'alimentation

L'impédance de cette antenne calculée en utilisant :

$$h_s = \frac{W_f}{\frac{377}{\sqrt{\epsilon_r}} Z_0} - 2 \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Alors :} \quad W_f = \left( \frac{377}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} - 2 \right) h_s (\text{IV.2})$$

Avec :

$W_f$  : Largeur de la ligne à partir de l'alimentation.

$\epsilon_r$ : Constante diélectrique de la surface diélectrique couvrant le plan de masse.

$Z_0$  : Impédance caractéristique de la ligne de transmission d'entrée.

#### IV.2.1.3 Résultats et discussions

En utilisant les paramètres mentionnés ci-dessus, il est possible de simuler des paramètres S et même le diagramme de directivité tridimensionnel du patch à élément unique via Simulink/ MATLAB 2019 en utilisant la fenêtre Antenna Objects. Les résultats de simulation pour les valeurs S11, les diagrammes de directivité 3D, et le VSWR sont illustrés sur les figures IV.3 Jusqu'à figure IV.9.

##### IV.2.1.3.1 Coefficient de réflexion (S11)

Le paramètre de dispersion (S11) de l'antenne patch présente un comportement adéquat, comme le montre la figure IV.3. L'antenne résonne à 28,5GHz, répondant ainsi à cette exigence de conception.

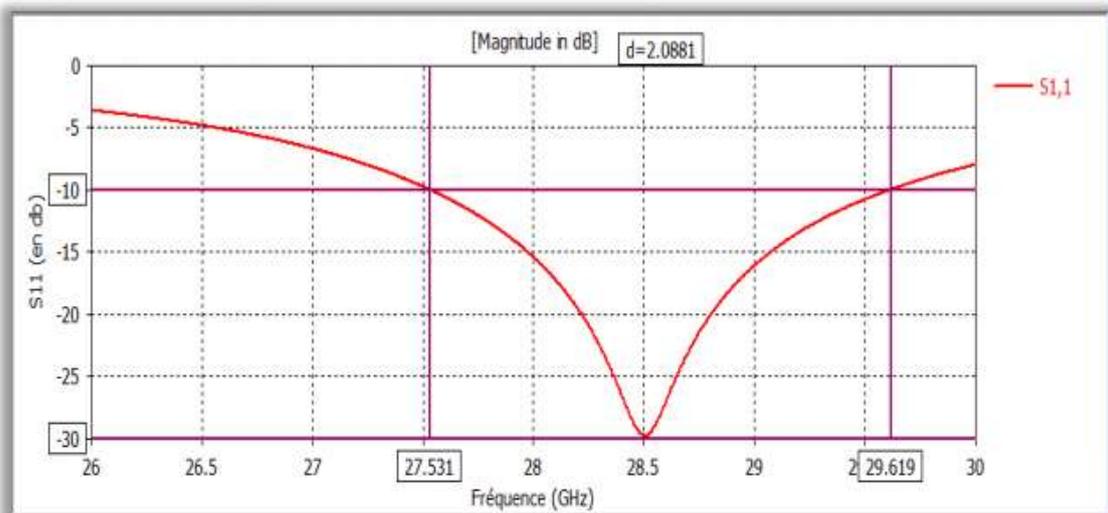


Figure IV- 3: Variation de  $S_{11}$  en (dB) en fonction de la fréquence

On peut visualiser que l'antenne a une largeur de bande maximale de 2.088 GHz autour de la fréquence de résonance (28.5GHz) dans l'intervalle (27.531 - 29.619) GHz.

#### IV.2.1.3.2 Taux d'onde stationnaire (VSWR)

La figure IV.4 montre variation du VSWR.

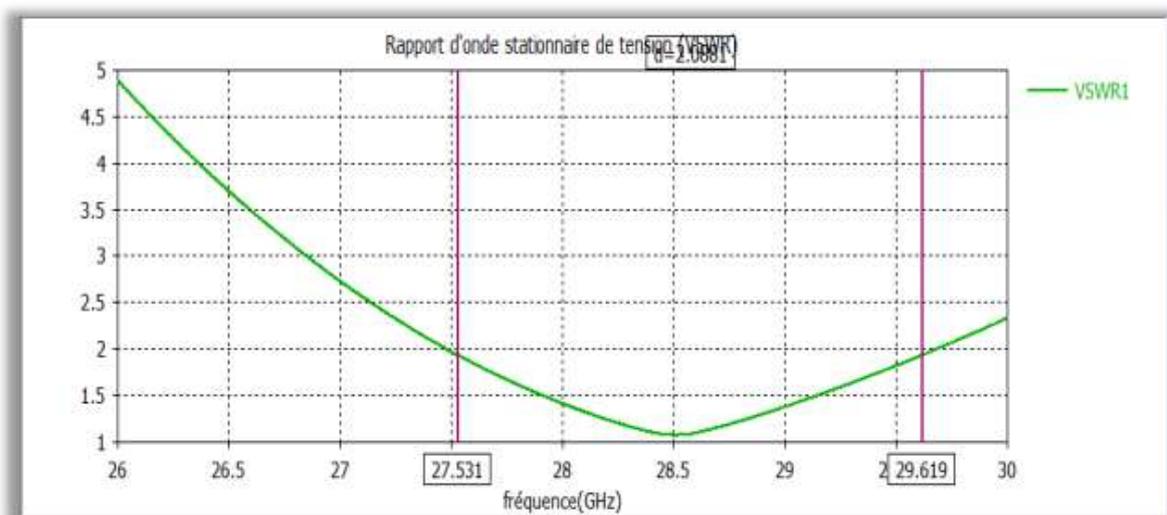


Figure IV- 4: VSWR en fonction de la fréquence.

Comme le paramètre  $S_{11}$ , le taux d'onde stationnaire nous donne également l'appréciation de l'adaptation. Pour la fréquence 28.5 GHz, nous avons relevé un TOS  $< 2$  est dans la bande passante. Ce qui confirme que notre antenne est adaptée très proche à la fréquence de résonance.

IV.2.1.3.3 Diagrammes de rayonnement

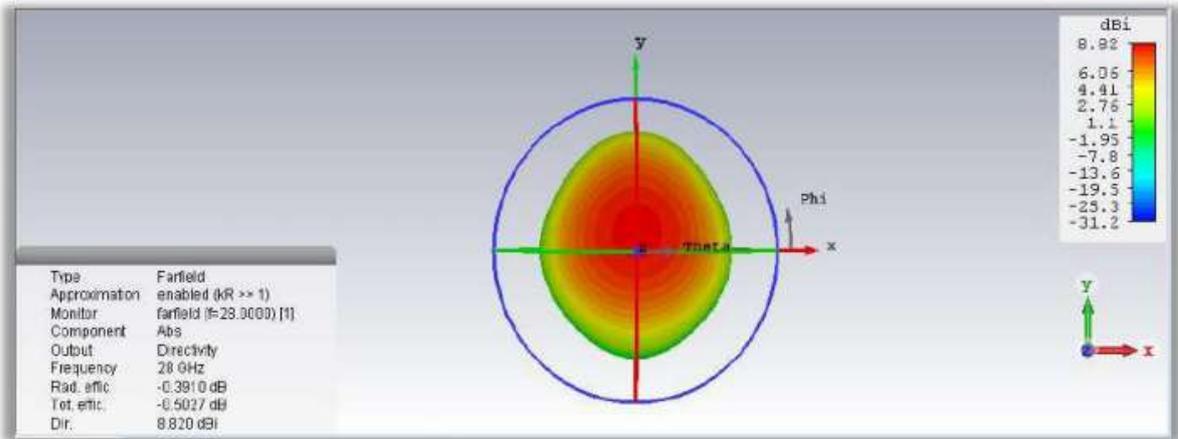


Figure IV- 5: Diagramme de rayonnement (Gain réalisé) de l'antenne patch.

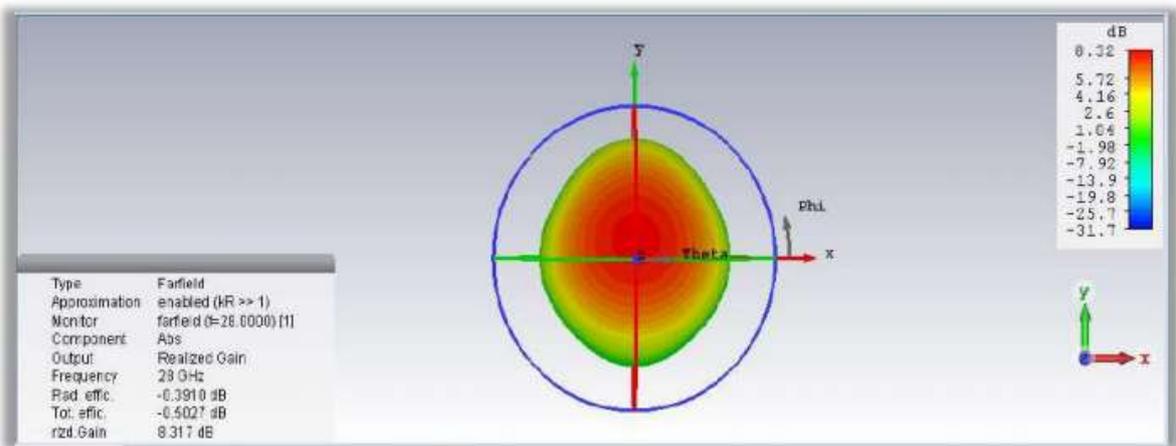


Figure IV- 6: Diagramme de rayonnement (directivité) de l'antenne patch

Le diagramme de rayonnement de l'antenne a une forme appropriée comme le montre les figures IV.4 et IV.5 parce que le rayonnement est concentré dans la partie supérieure de l'antenne. Bien sûr ceci qu'il doit être normalement pour ce type d'antennes.

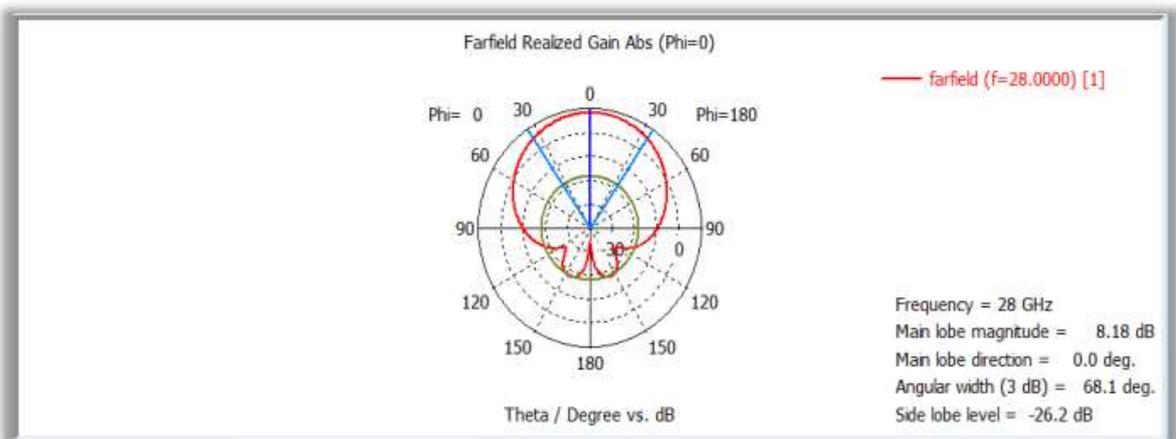
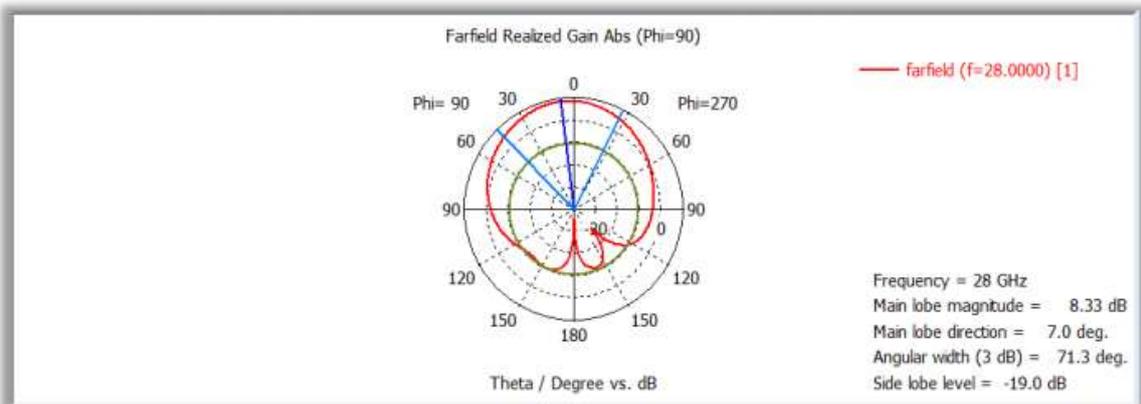


Figure IV- 7: Diagramme de rayonnement en 2D (phi=0°) de l'antenne patch.



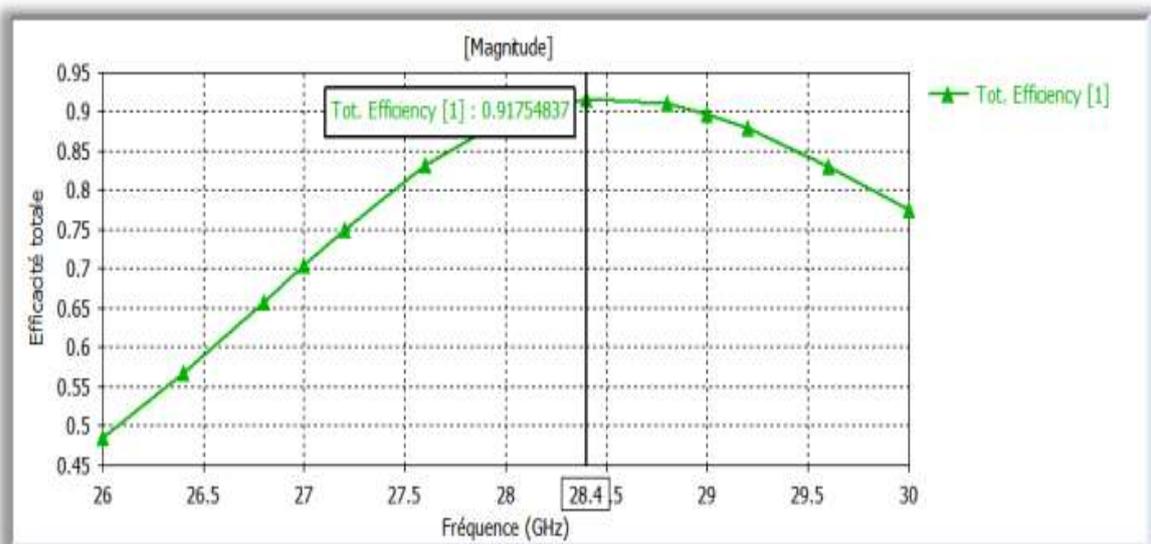
**Figure IV- 8: Diagramme de rayonnement en 2D (phi=90°) de l'antenne patch.**

Le tracé bidimensionnel du diagramme de rayonnement de cette antenne permet de visualiser ses composants notamment ses lobes dans deux plan vertical et horizontal. Les deux figures ci-dessus montre que, soit pour phi=0° ou soit pour phi=90°, le diagramme est principalement composé d'un lobe plus important. En observant le diagramme de rayonnement 3D, on peut constater que la plupart du rayonnement se trouve dans la direction verticale suivant z.

Cette antenne est directive, et elle a un gain important dont son maximum est de 8.40dB.

#### **IV.2.1.3.4 Le Rendement**

Notez que la valeur du rendement fourni par cette antenne est très élevée (0.92 dans la bande de fréquence 28.4GHz) et cela signifie qu'il est très approprié pour atteindre ce que nous voulons.



**Figure IV- 9: Efficacité totale de l'antenne patch.**

Nous pouvons également calculer le rendement en utilisant le gain et la directivité :

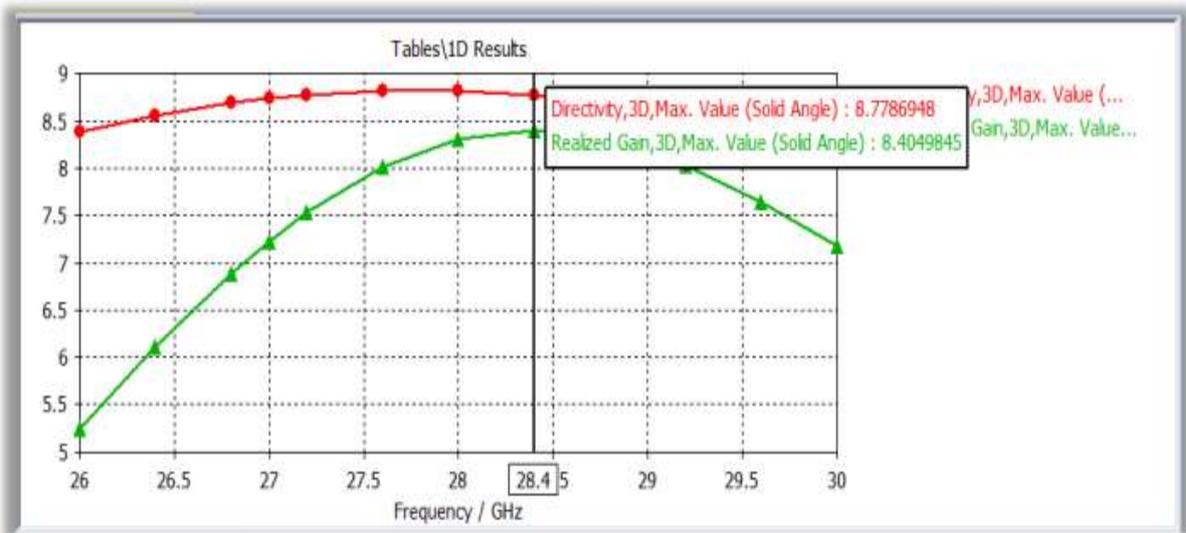


Figure IV- 10: (Gain- Directivité) (dB) de l'antenne patch.

#### IV.2.1.3.5 Courant de surface (Surface current)

Notez que le rayonnement (rayonnement rouge) est concentré aux ouvertures et au début de la ligne et sur le patch cela indique que cette antenne envoie un rayonnement d'une manière excellente.

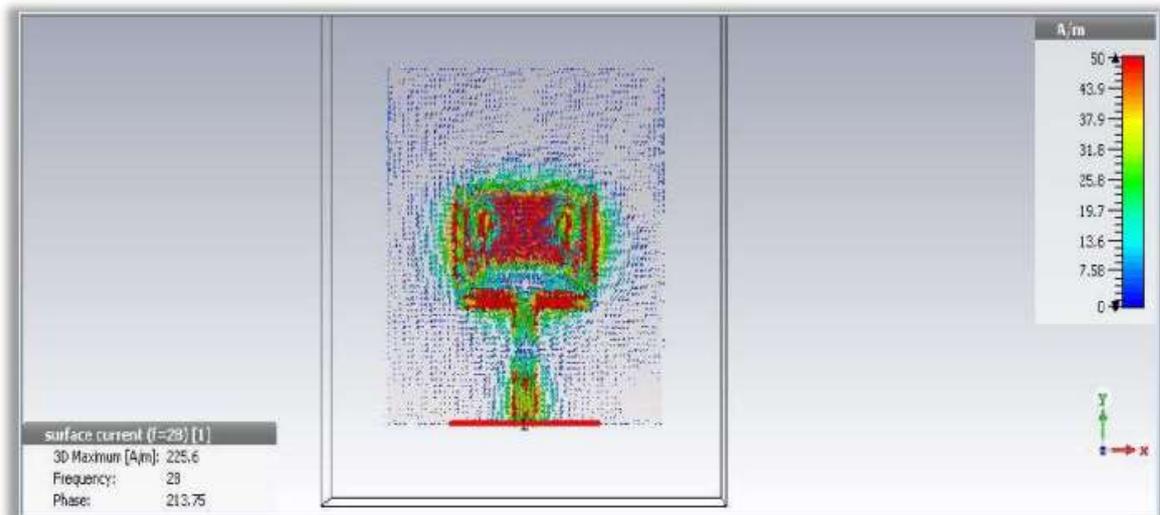


Figure IV- 11: Courant de surface de l'antenne patch.

#### IV.2.1.3.6 Directivité

La valeur max de directivité est (8.81 dB) dans la bande de fréquence est 27.6GHz.

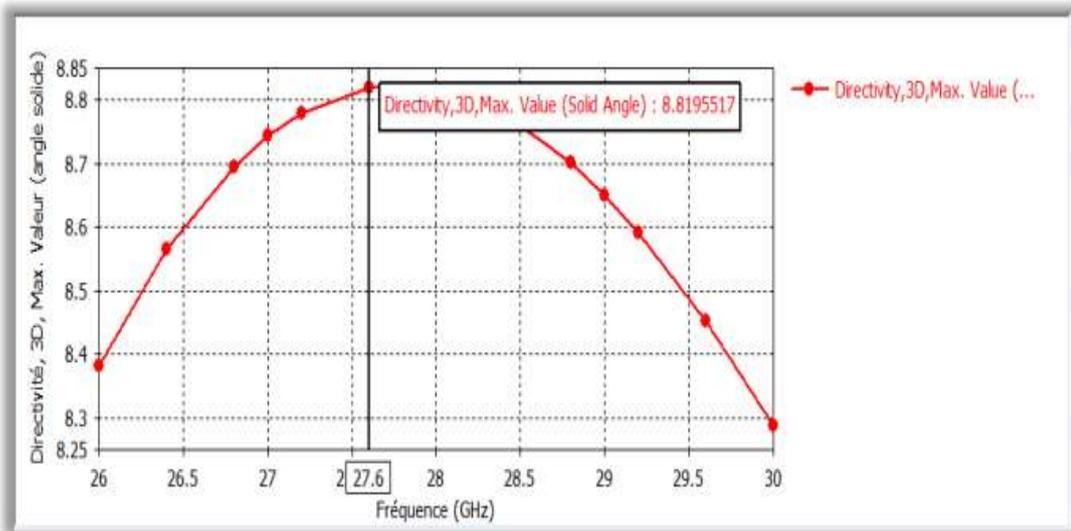


Figure IV- 12: La directivité de l'antenne patch.

#### IV.2.1.3.7 Gain

La valeur Le gain fort 8.404 dB à la fréquence est de 28.4GHz.. Le gain n'est pas encore suffisamment élevé pour répondre aux spécifications de la 5G mobile. Il sera donc nécessaire d'utiliser un ensemble contenant plus de 2 éléments.

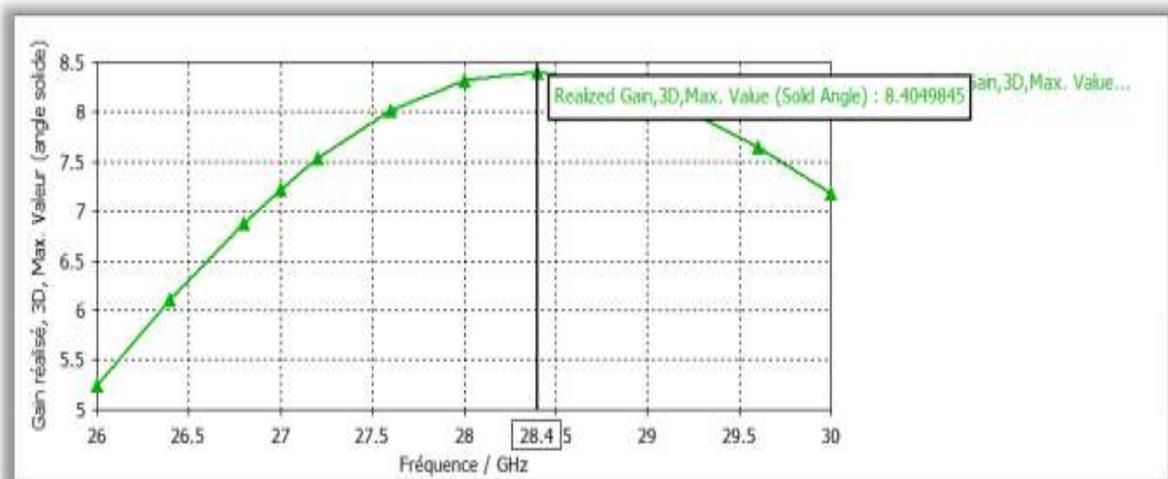


Figure IV- 13: Le gain de l'antenne patch

Paramètres	Valeur
Pertes de retour (S11)	S11 min = -15.41 dB
Directivité	D= 8.819 dB
Gain	G=8.316 dB
Efficacité de rayonnement ( $\eta$ rad)	$\eta$ rad= - 0.390dB
Efficacité totale ( $\eta_T$ )	$\eta_T$ = -0.502 dB
Bande passante (BW)	BW=2.088 GHz A S11= -10 dB
Largeur de faisceau (AW)	AW= 71.3 °

**Tableau IV- 2: Paramètres fondamentaux de l'antenne patch dans la fréquence 28GHz.**

#### IV.2.1.3.8 Le code de la simulation

Après avoir choisi la plateforme Antennas Objects, nous avons sélectionné une antenne patch rectangulaire micro ruban, donc après l'exécution nous avons obtenu ce code qui contient tous les paramètres du patch choisit, il est illustré dans la figure IV.14.

```

1  %% Antenna Properties
2  % Define antenna
3  antennaObject = design(patchMicrostripInsetfed,28000000000);
4  % Properties changed
5  antennaObject.Height = 0.0005;
6  antennaObject.StripLineWidth = 0.00125;
7  antennaObject.NotchWidth = 0.00145;
8  antennaObject.Length = 0.0034;
9  antennaObject.Width = 0.00375;
10 antennaObject.GroundPlaneLength = 0.006285;
11 antennaObject.GroundPlaneWidth = 0.007235;
12 antennaObject.FeedOffset = [-0.0031425 0];
13 % Update substrate properties
14 antennaObject.Substrate.Name = 'Roger';
15 antennaObject.Substrate.EpsilonR = 2.2;
16 antennaObject.Substrate.LossTangent = 0.0009;
17 antennaObject.Substrate.Thickness = 0.0005;
18 % show for patchMicrostripInsetfed
19 figure;
20 show(antennaObject)
21
22
    
```

**Figure IV- 14 Le code du patch rectangulaire**

#### IV.2.2 Mise en place de réseaux d'antennes pour la bande des 28 GHz à partir de l'élément précédemment conçu

Une fois l'antenne patch simple résonante à 28 GHz réalisée, le processus de mise en place de réseau d'antennes pour cette bande de fréquences peut être initié. Le réseau

d'antennes qui sera conçu à une forme rectangulaire. Cette configuration est choisie parce qu'elle est facile à modéliser et à fabriquer, elle est donc parmi les plus préférées pour fabriquer des réseaux d'antennes patch.

**IV.2.2.1 Structure de réseau d'antenne 2x1**

Une antenne patch micro ruban à matrice d'éléments 2x1 est illustrée sur la figure III.13. Ce modèle est introduit dans le but d'améliorer les performances de l'antenne à un seul élément qui sont difficilement améliorables dans le cas d'un seul élément.

Dans le cadre de ce travail, un réseau d'antenne patch rectangulaire 2x1 avec substrat RT / duroid5880 a été conçu et simulée à une fréquence de 26-30 GHz. Le RT / duroid5880 utilisé pour concevoir l'antenne simple ainsi que le réseau d'antennes 2 x 1 ayant une constante de diélectrique ( $\epsilon_r$ ) égale à 2,2. La hauteur du substrat diélectrique est  $h = 0,508$  mm.

Les éléments de patch micro ruban sont disposés avec un espacement égal de  $2\lambda$  pour concevoir un réseau d'antennes de  $2 \times 1$ . Les réseaux d'entreprise sont développés pour alimenter chaque élément de la bande de microbandes.

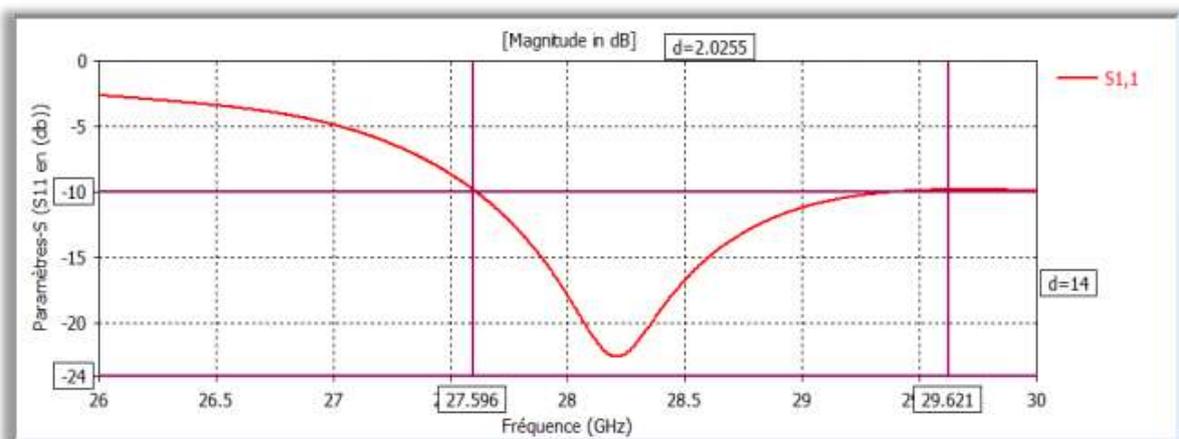
Le tableau IV.3 résume les valeurs des principaux paramètres suivis dans la conception de notre réseau antennaire proposé.

Paramètres	Lr (longueur du substrat et du plan de masse)	Wr (largueur du substrat et du plan de masse)	Hs (Epaisseur de substrat)	$2\lambda$ (l'espace entre les 2 éléments (2 patches))	Wfr
Valeur (mm)	22	16	0.508	12	( $100 \Omega = 0.42\text{mm}$ ) ( $75 \Omega = 0.78\text{mm}$ )

**Tableau IV- 3: paramètres du réseau d'antennes patch2x1.**

**IV.2.2.2.1 Coefficient de réflexion ( S11 )**

Ce graphique montre S11 en fonction de la fréquence indiquant la fréquence de résonance fondamentale de 28,208 GHz.



**Figure IV- 15: S11 en (dB) en fonction de la fréquence.**

On peut voir que l'antenne a une largeur de bande maximale de 2.0255 GHz autour de la fréquence de résonance (28.208GHz) dans l'intervalle (27.596 - 29.621) GHz.

#### IV.2.2.2 Taux d'onde stationnaire (VSWR)

Le graphe du rapport d'onde stationnaire (VSWR) de l'antenne est présenté à la figure IV.4. Le niveau acceptable de VSWR pour la plupart des applications sans fil ne devrait pas dépasser 2,5 et idéalement 1. La valeur de VSWR obtenue à la fréquence de résonance de 28,208 GHz est de 1,161 et ce qui est acceptable.

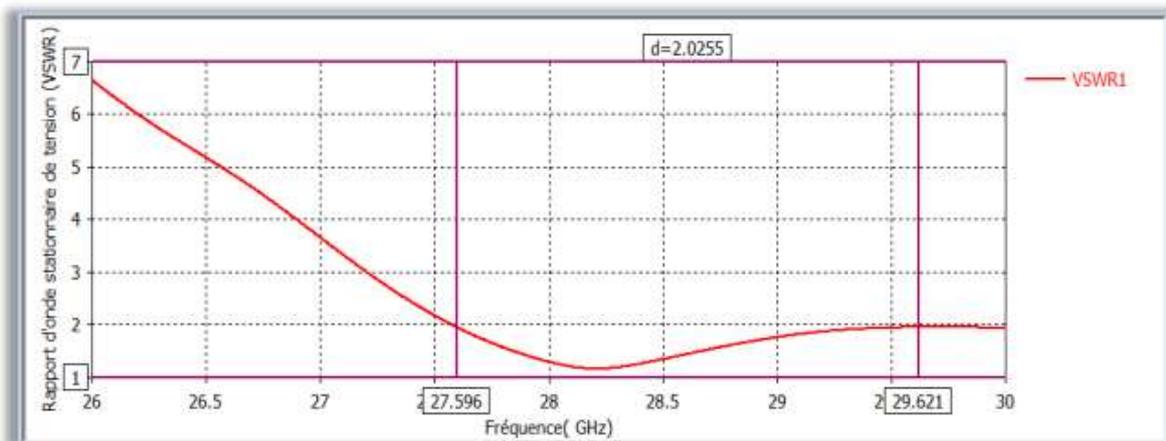


Figure IV- 16: Rapport d'onde stationnaire en fonction de la fréquence.

#### IV.2.2.3 Diagramme de rayonnement

En utilisant les paramètres de conception précédemment cités, le modèle du diagramme de directivité en 3D du réseau antennaire est prédit comme montre les figures suivantes :

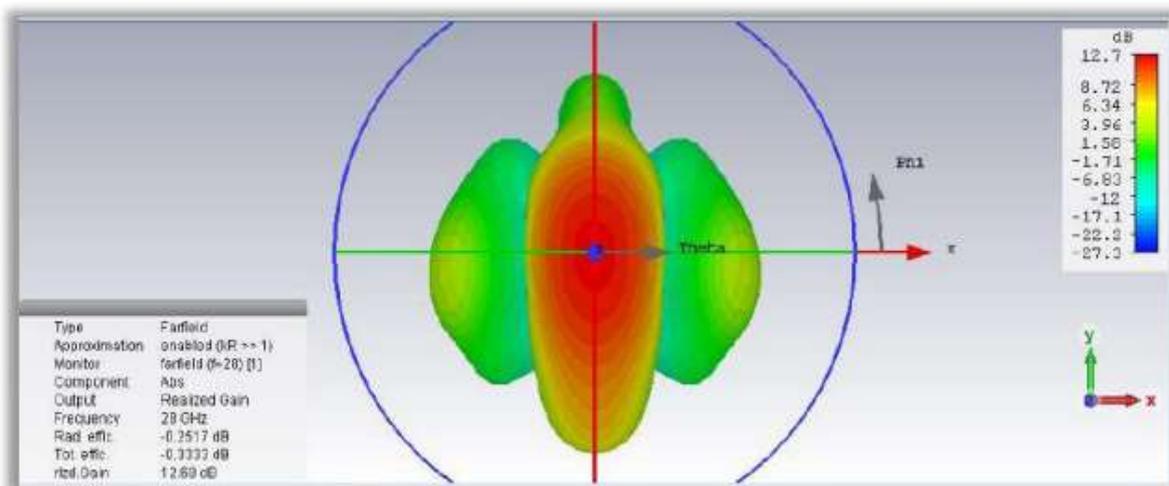


Figure IV- 17: Diagramme de rayonnement (Gain réalisé) de réseau d'antenne 2x1.

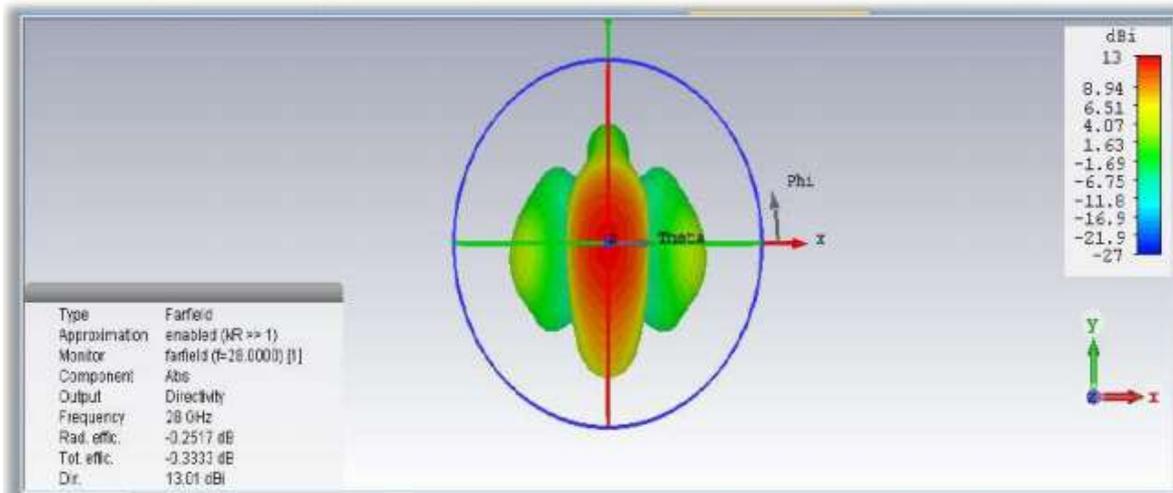


Figure IV- 18: Diagramme de rayonnement (directivité) de réseau d'antenne 2x1.

Le diagramme de rayonnement de l'antenne réseau a une forme appropriée, comme le montre la figure IV. (18,19), puisque le rayonnement est concentré dans le plan supérieure de l'antenne, comme il se doit normalement dans le cas de ce type de réseaux.

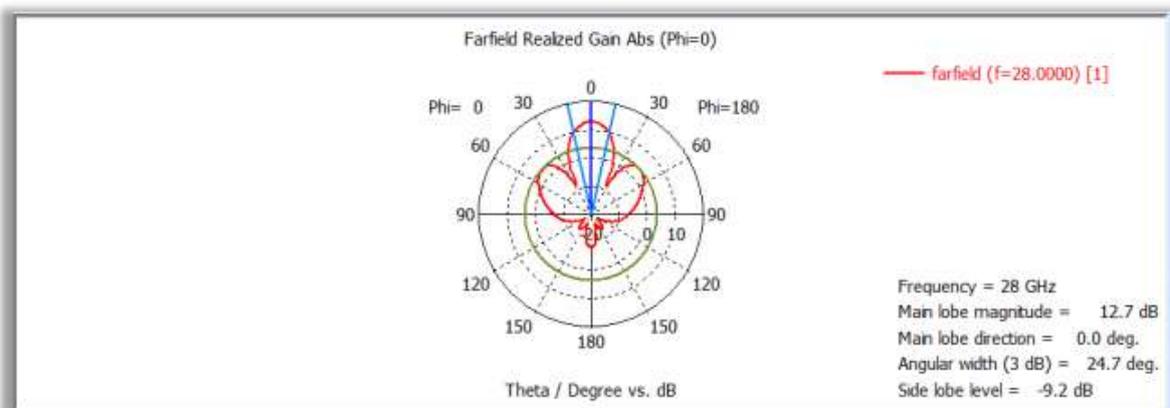


Figure IV- 19: Diagramme de rayonnement (phi=0°) de réseau d'antenne 2x1.

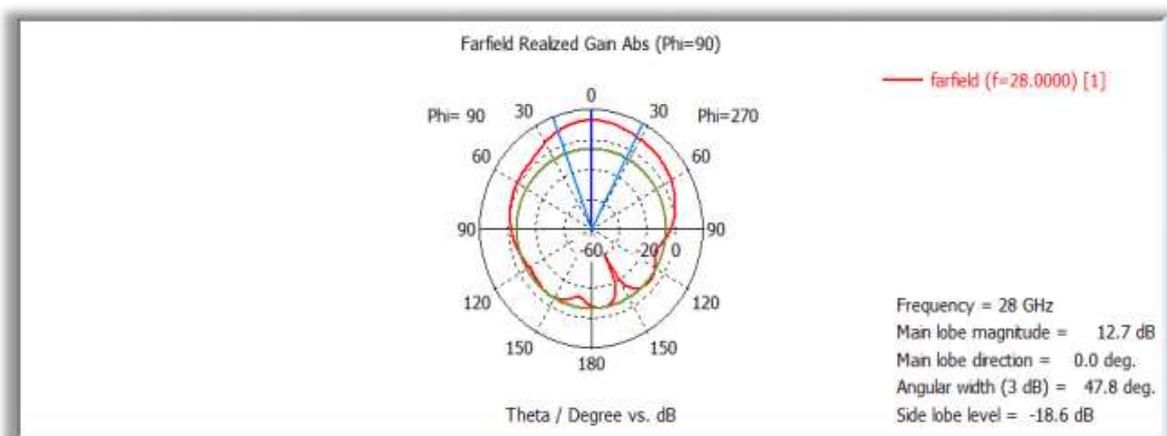


Figure IV- 20: Diagramme de rayonnement (phi=90°) de réseau d'antenne 2x1.

La courbe polaire 2D du diagramme de rayonnement (à  $\phi = 0^\circ$ ) est illustrée sur la figure IV.21 et (à  $\phi = 90^\circ$ ) est illustrée sur la figure IV.20 pour l'antenne examinée.

**IV.2.2.2.4 Le Rendement**

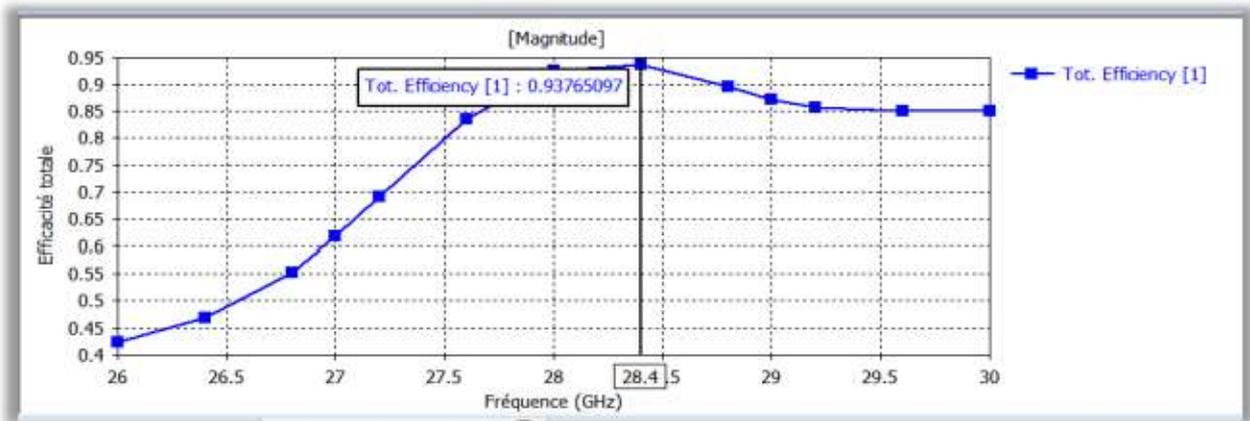


Figure IV- 21: Efficacité totale de réseau d'antenne 2\*1

Nous pouvons également calculer le rendement en utilisant le gain et la directivité avec la même relation précédente :

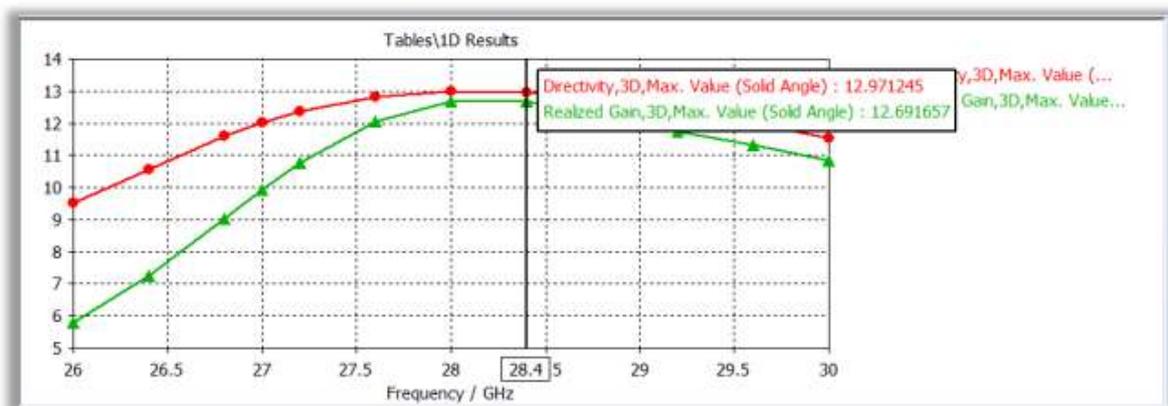


Figure IV- 22: Efficacité totale de réseau d'antennes 2x1.

Figure IV.23: (Gain- Directivité (dB)) de réseau d’antennes 2x1.

**IV.2.2.2.5 Courant de surface**

Nous observons que le rayonnement est répandu dans les zones les plus importantes de l'antenne. Cela indique que cela fonctionne parfaitement.

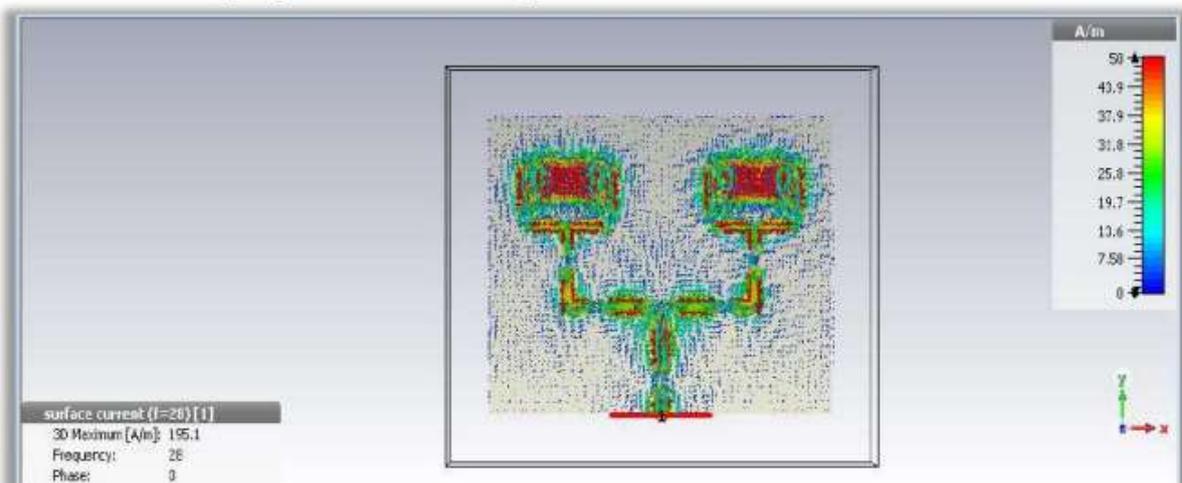


Figure IV- 23: Courant de surface de réseau d'antenne 2x1.

#### IV.2.2.2.6 Directivité

La figure IV.25 montre l'augmentation de la directivité avec un maximum 13.01 dB pour  $f=28$  GHz en comparant par rapport à l'antenne patch simulée à notre première phase de simulation.

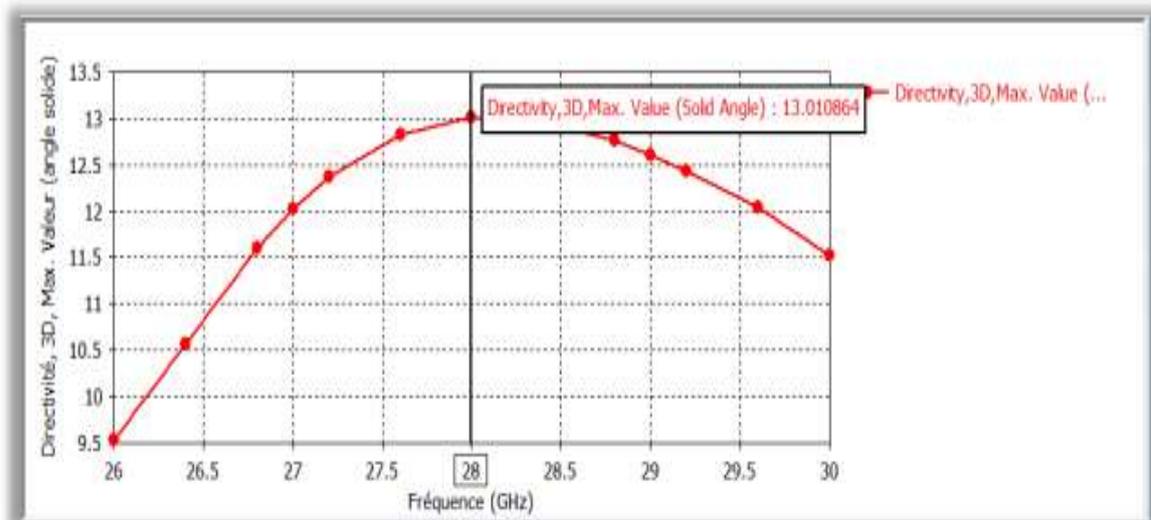


Figure IV- 24: La directivité de réseau d'antennes 2x1

#### IV.2.2.2.7 Gain

La figure IV.26 montre l'augmentation du Gain avec un maximum 12.69 dB pour  $f=28.4$  GHz.



Figure IV- 25: Le gain de réseau d'antenne 2x1.

Cela montre que cette antenne a satisfait les exigences et les exigences de 5G (gain supérieur à 12db). Les paramètres précédemment analysés du réseau d'antennes proposé pour la bande des 28 GHz sont résumés dans le tableau IV.4.

Tableau IV 4: Paramètres fondamentaux de réseau d'antennes 2x1 (à 28GHz)

Paramètres	Valeur
Pertes de retour (S11)	S11 min = -17.894 dB
Directivité	D= 13.010 dB
Gain	G=12.677 dB
Efficacité de rayonnement ( $\eta$ rad)	$\eta$ rad= - 0.251dB
Efficacité totale ( $\eta_T$ )	$\eta_T$ = -0.333 dB
Bande passante (BW)	BW=2.025 GHz A S11= -10 dB
Largeur de faisceau (AW)	AW= 47.8 °

**Tableau IV- 4: Paramètres fondamentaux de réseau d'antennes 2x1.**

A travers les résultats ci-dessus, nous notons que les paramètres S11 du réseau proposé sont différents à ceux de l'antenne unique. Malgré ces différences, le comportement de ce paramètre dans les dispositions proposées est acceptable, car il reste dans la gamme souhaitée. Il est proche de 28.208 GHz avec des valeurs inférieures à -25 dB. Lorsque la valeur de  $S_{11} \leq -10$  dB, la bande passante de réflexion dans est d'environ 2.0255 GHz, en tenant compte d'un ROS  $\leq 2$ . Le diagramme de rayonnement du réseau analysé est un facteur qui présente un changement significatif par rapport à la première antenne de conception individuelle. En l'analysant, on peut observer qu'à mesure que le nombre d'éléments dans le réseau augmente, le réseau devient plus directif, les gains augmentent et le faisceau de rayonnement diminue.

### **IV.3 Modélisation de la chaîne de transmission mmWave**

Cette chaîne illustre une méthodologie pour la modélisation et la simulation au niveau du système d'un système d'émission et de réception RF QPSK 28 GHz avec une antenne de formation de faisceau hybride à 32 éléments. Le système comprend des imperfections RF, des effets de rayonnement de réseau de transmission, un réseau de réception à bande étroite et un récepteur en bande de base avec des corrections pour les dégradations du système et le décodage des messages. La direction de formation du faisceau de l'antenne est définie en utilisant les angles d'azimut et d'élévation et elle est estimée dans l'antenne de réception RF.

#### **IV.3.1 Description du modèle**

Le niveau supérieur de cet exemple se compose de cinq blocs de sous-système, d'un bloc pour contrôler l'angle relatif entre l'émetteur et le récepteur et de 2 affichages :

- Un émetteur en bande de base QPSK encode le message « Hello world ### »
- Un émetteur RF avec modulation IQ, mixage, amplification et formation de faisceaux hybride avec circuit de commande. Le modèle d'émetteur RF comprend des imperfections RF telles que le bruit, les effets non linéaires et le couplage des éléments d'antenne.

- Un canal idéal atténuant le signal transmis avec un modèle de perte de trajet en espace libre.
- Un récepteur RF avec deux antennes réseau de réception à bande étroite, un gain de récepteur et un SNR, un ADC 12 bits avec une plage dynamique finie et deux algorithmes racine pour l'estimation de l'angle d'arrivée le long de l'azimut et de l'élévation.
- Un récepteur QPSK, comprenant la synchronisation des porteuses et des trames, la démodulation et le décodage des données.
- Un bloc dans lequel l'utilisateur définit l'angle relatif entre l'émetteur et le récepteur.
- L'innovation concerne l'analyse du spectre en comparant des signaux normalisés émis et reçus et un affichage pour le message reçu.
- Model = 'simrfv2\_qpsk';
- open\_system(model)
- sim(model)

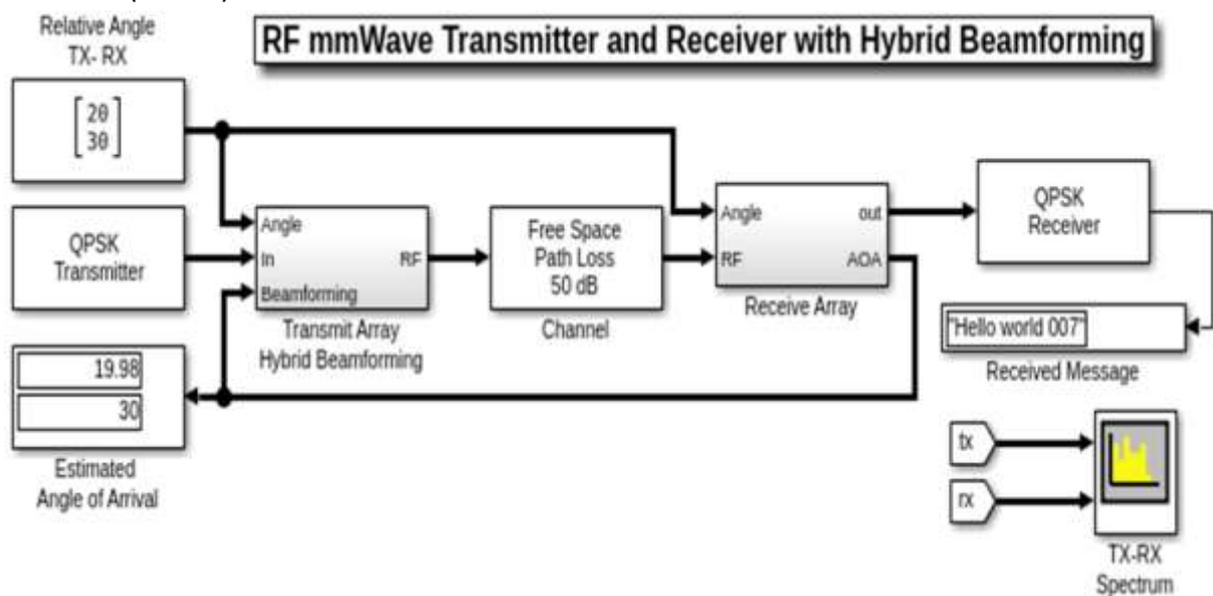


Figure IV- 26: Chaîne de transmission mmWave.

Après avoir lancé la simulation de cette chaîne, le bloc Tx-Rx Spectrum nous génère un spectre des signaux de l'entrée et de sortie de cette chaîne qui est présenté dans la figure IV.27 :

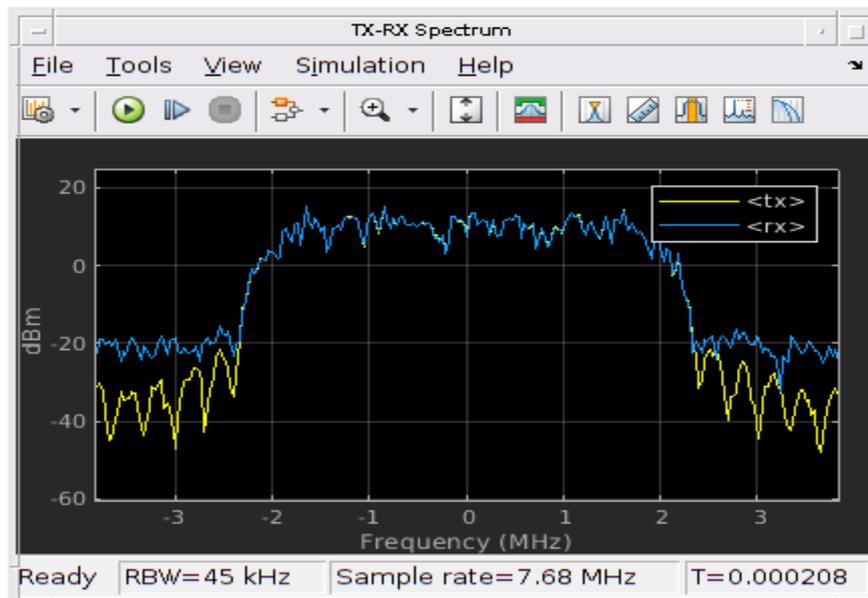


Figure IV- 27: Spectre des signaux d'entrée et de sortie de la chaine.

### IV.3.1.1 QPSK Transmitter

L'émetteur QPSK comprend un sous-système de génération des données binaires, un bloc de modulateur QPSK, un bloc de filtre d'émission en cosinus surélevé pour la mise en forme d'impulsions et un bloc de gain. Le sous-système Bit Generation génère des trames, contenant 26 bits d'en-tête suivis d'une charge utile de 174 bits, 105 bits pour le message « Hello world ### » et 69 bits aléatoires. La charge utile est brouillée pour garantir une distribution équilibrée des « 0 » et des « 1 » pour l'opération de récupération de synchronisation dans le modèle de récepteur.

```
open_system(['model '/QPSK TX'],'force')
```

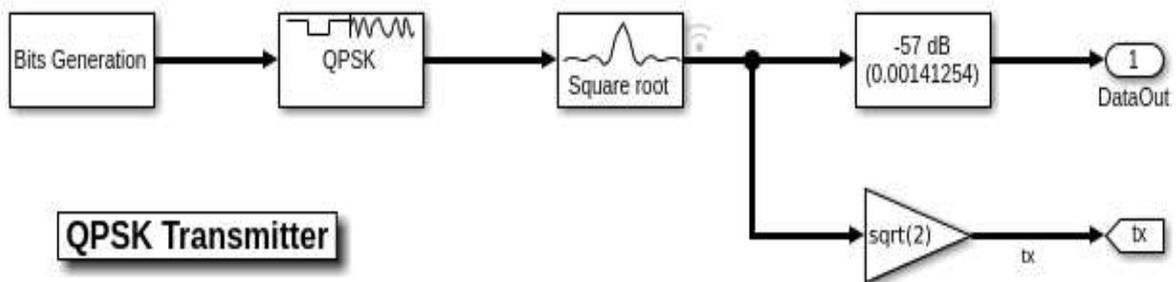


Figure IV- 28: Chaîne de l'émission QPSK.

### IV.3.1.2 RF Transmitter

L'émetteur RF est composé de trois blocs : 1) bloc des formateurs de faisceaux en réseau, une antenne de formation de faisceaux hybride et un bloc modélisant la matrice de Butler (réseau d'émission à bande étroite). L'antenne de formation de faisceau hybride à 32 éléments est divisée en 4 sous-réseaux. Chaque sous-réseau se compose de 8 émetteurs RF fonctionnant à 28 GHz. Les antennes sont des patchs micro rubans. Ces éléments d'antenne et les sous-réseaux ont été conçus et vérifiés avec un script MATLAB qui utilise Antenna Toolbox™.

- Le gain du réseau d'antennes en champ lointain est calculé avec le bloc de transmission à bande étroite. Ce bloc utilise le toolbox Phased Array System Toolbox™. Le

diagramme de rayonnement calculé est la superposition des champs générés par les patches micro ruban isolés.

open\_system([model '/Transmit Array Hybrid Beamforming'])

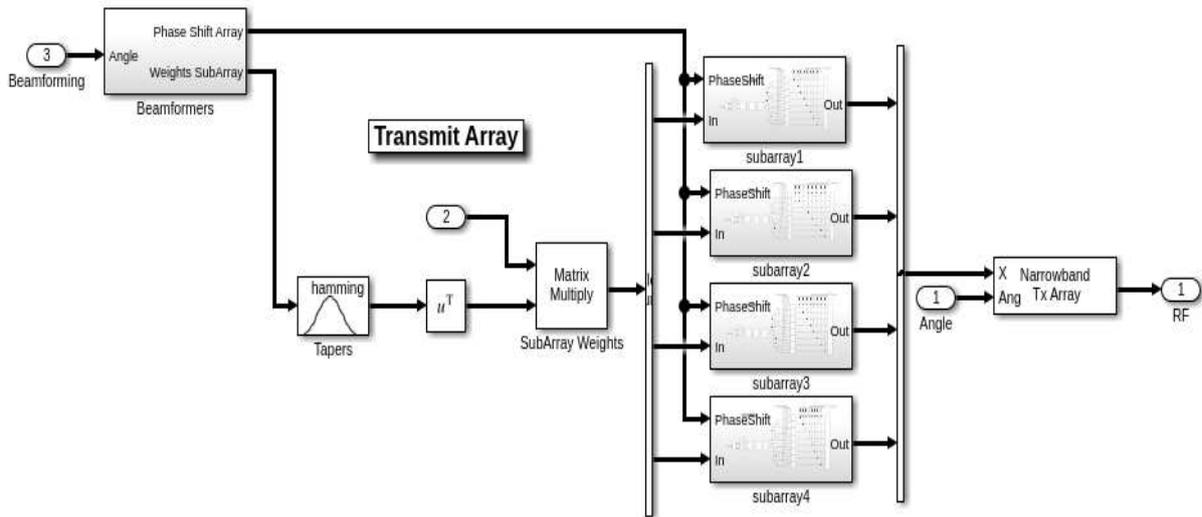


Figure IV- 29: Les blocs de RF Transmitter.

### IV.3.1.3 Transmit Array Beamformers

Le réseau d'émission est orienté vers la direction estimée par le récepteur. À des fins de démonstration, deux algorithmes de formation de faisceaux différents sont utilisés pour calculer les poids appliqués aux quatre sous-réseaux et aux éléments de chaque sous-réseau.

- Les poids des sous-réseaux sont calculés avec un formateur de faisceaux MVDR. Une multiplication complexe dans le formateur de faisceaux MVDR combine le signal transmis et les poids des sous-réseaux, orientant le signal transmis le long de la direction azimutale. Le rétrécissement est utilisé pour réduire les effets des lobes de réseau.
- Les déphasages appliqués aux huit éléments du sous-réseau sont calculés avec un algorithme de formation de faisceau à déphaseur. Les quatre sous-réseaux appliquent les mêmes déphasages qui orientent l'émetteur le long de la direction d'élévation.

open\_system([model '/Transmit Array HybridBeamforming/Beamformers'])

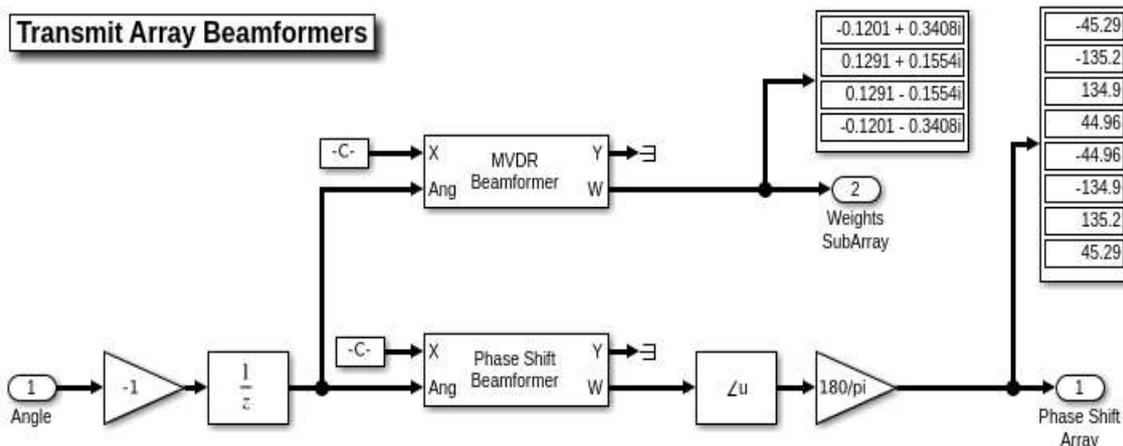


Figure IV- 30: Les blocs de l'émission des faisceaux.

#### IV.3.1.4 Transmit subarray

Les quatre sous-réseaux de transmission sont identiques. Chaque sous-réseau effectue d'abord une conversion ascendante à 5 GHz en utilisant un modulateur en quadrature, puis effectue une conversion ascendante à 28 GHz. Chaque étage introduit des dégradations telles que le bruit, et la non-linéarité. Un amplificateur de puissance non linéaire augmente le gain de l'émetteur et un réseau de diviseurs de puissance pour connecter les 8 antennes. Huit déphaseurs variables sont utilisés pour diriger le faisceau. Le chargement du sous-réseau d'antenne et le couplage entre les éléments d'antenne est modélisé par ses paramètres S (Voir Figure IV.31).

open\_system([model '/Transmit Array Hybrid Beamforming/subarray1'])

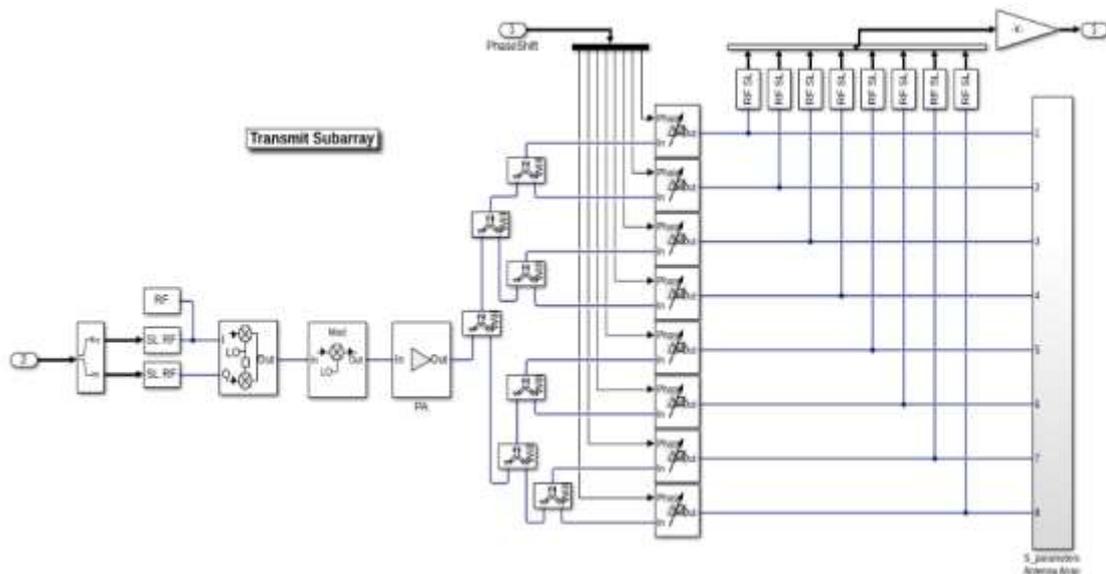


Figure IV- 31: Transmission des sous-porteuses.

#### IV.3.1.5 Receive Array

Le récepteur est modélisé à un niveau d'abstraction supérieur à celui de l'émetteur. Le récepteur utilise deux réseaux linéaires orthogonaux, chacun avec 4 éléments d'antenne isotropes. Les tableaux sont utilisés pour fournir une diversité spatiale pour l'identification de l'angle d'arrivée. Le récepteur n'implémente aucun algorithme de formation de faisceau.

- Le gain et le SNR finis du récepteur sont modélisés pour chacun des signaux reçus suivis d'un CAN 12 bits avec une plage dynamique finie comprenant des effets de saturation et de quantification.
- Deux algorithmes MUSIC racine sont utilisés pour estimer la direction d'arrivée à l'aide des signaux du réseau linéaire. Chaque algorithme fonctionne sur une dimension, donc ensemble peut estimer la position de l'émetteur en termes d'azimut et d'angles d'élévation.

open\_system([model '/Receive Array'])

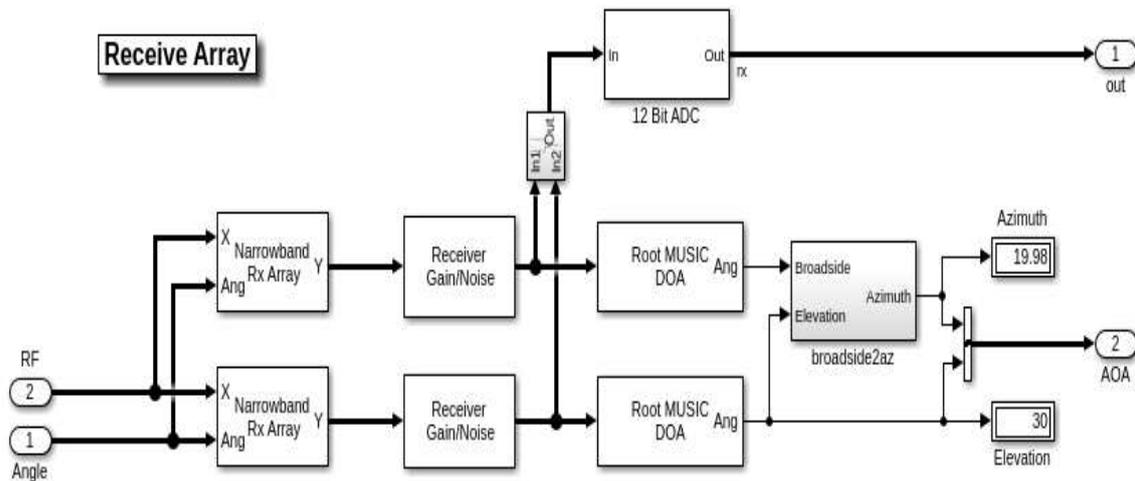


Figure IV- 32: Receive Array.

### IV.3.1.6 QPSK Receiver

Le récepteur QPSK utilisé dans cet exemple (voir figure IV.33) est une version modifiée permettant d'apporter les modifications et supprime les blocs de ce récepteur lorsque les dégradations du signal reçu sont absentes.

- L'AGC contrôle et stabilise l'amplitude du signal reçu, ce qui affecte la précision du synchroniseur de symboles de porteuse.
- Le filtre de réception en cosinus surélevé fournit un filtrage adapté pour la forme d'onde transmise.
- Le bloc de synchronisation de porteuse effectue une compensation de fréquence fine.
- Le bloc de détection de l'en-tête de trame connu (code de Barker modulé par QPSK) pour établir une corrélation avec les symboles QPSK reçus afin de trouver l'emplacement de l'en-tête de trame.
- Le bloc Frame Synchronizer utilise les informations d'emplacement de l'image du détecteur de préambule pour aligner les limites de l'image. La deuxième sortie du bloc est un scalaire booléen indiquant si la première sortie est une trame valide avec l'en-tête souhaité et si c'est le cas, permet au sous-système de décodage de données de s'exécuter.
- Le sous-système activé pour le décodage de données effectue la résolution d'ambiguïté de phase, la démodulation et le décodage des messages texte.

`open_system(['model '/QPSK Receiver'])`

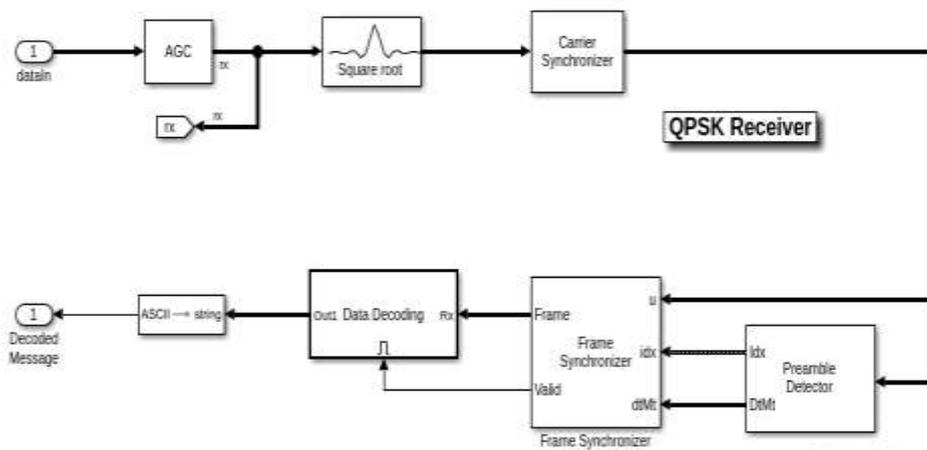


Figure IV- 33: Chaîne de réception QPSK

La constellation du signal d'entrée pour le décodeur de données QPSK Démodulateur est illustré dans la figure IV.34 :

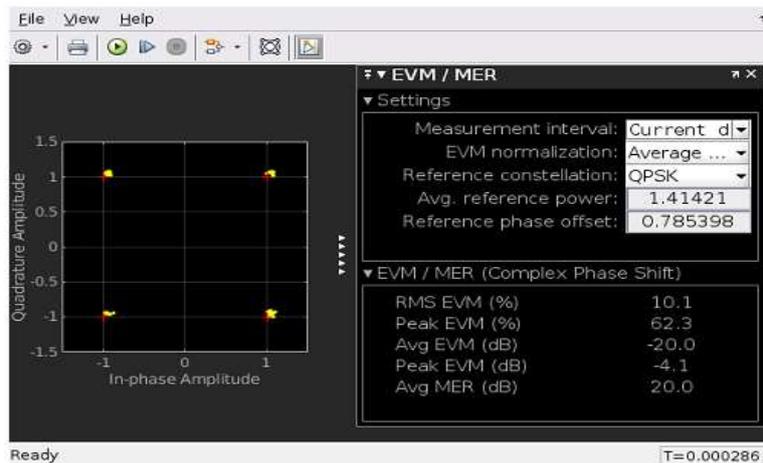


Figure IV- 34: Le signal d'entrée pour le décodeur QPSK.

### IV.3.2 Extension de la chaine de transmission

La figure IV.35 illustre la nouvelle chaine de transmission millimétrique :

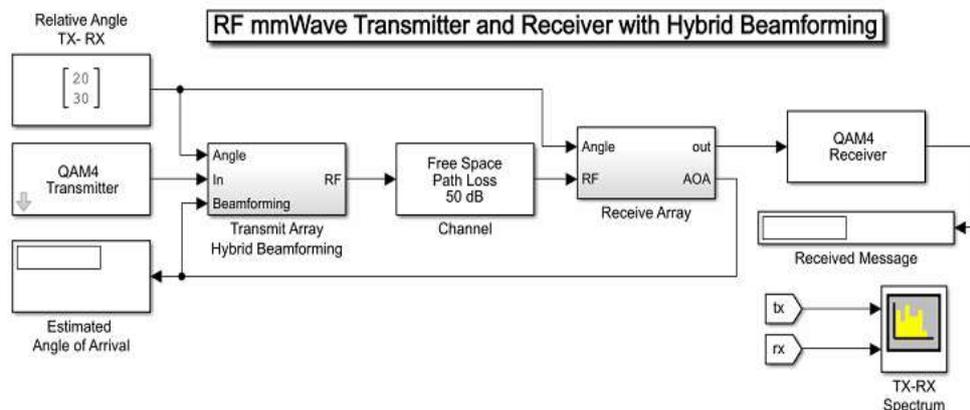


Figure IV- 35: La chaine de transmission millimétrique.

#### IV.3.2.1 QAM-4 Transmitter (1<sup>er</sup> extension )

L'émetteur QAM4 comprend un sous-système de génération des données binaires, un bloc de modulateur QAM4 et un bloc de gain. Le sous-système (Bit Generation) génère des trames, contenant 26 bits d'en-tête suivis d'une charge utile de 174 bits, 105 bits pour le message «Hello world ###» et 69 bits aléatoires. La charge utile est brouillée pour garantir une distribution équilibrée des « 0 » et des « 1 » pour l'opération de récupération de synchronisation dans le modèle de récepteur.

open\_system([model '/QAM4 TX'],'force').

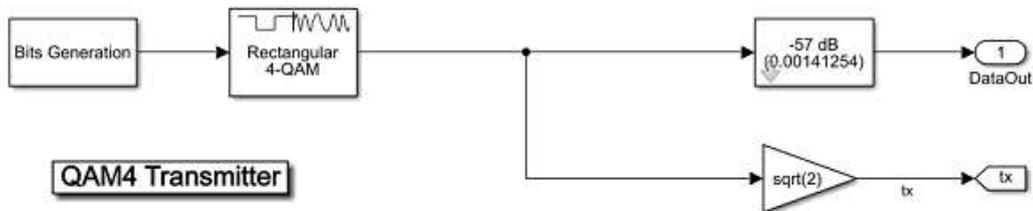


Figure IV- 36: Chaîne de l'émission QAM-4

Dans cette première extension en modifiant le système de communication de base en remplaçant progressivement le modulateur QPSK par un modulateur QAM-4 afin d'avoir une large bande, essayer de réduire la latence de notre système de communication.

**IV.3.2.1 RF Transmitter (2eme extension)**

Au niveau de cette extension on garde la première chaîne avec (QPSK Tx-Rx) et donc on fait une augmentation du nombre d'éléments de L'antenne de formation de faisceau hybride qui sera à 64 éléments, qui sera divisée en 8 sous-réseaux. Chaque sous-réseau se compose de 8 émetteurs RF fonctionnant à 28 GHz. Dans notre simulation nous avons considéré les antennes patches micro rubans. Ces éléments d'antenne et les sous-réseaux ont été conçus et vérifiés avec un script MATLAB qui utilise Antenna Toolbox™.

- Le gain du réseau d'antennes en champ lointain est calculé avec le bloc de transmission à bande étroite. Ce bloc utilise le Toolbox Phased Array System Toolbox™. Le diagramme de rayonnement calculé est la superposition des champs générés par les patches micro ruban isolés.

```
open_system(['model '/Transmit Array Hybrid Beamforming'])
```

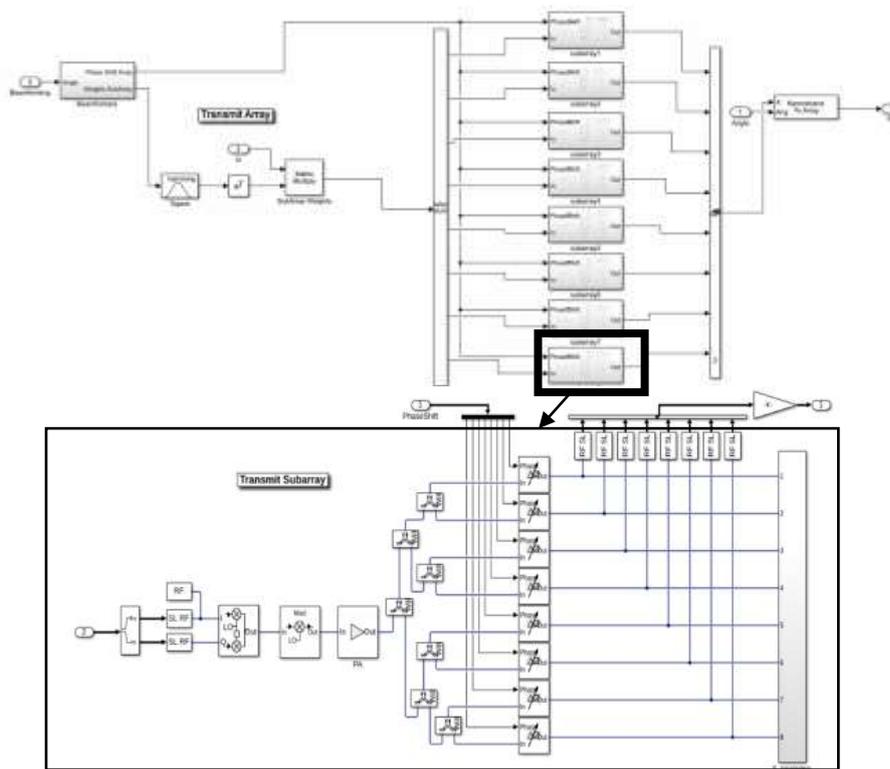
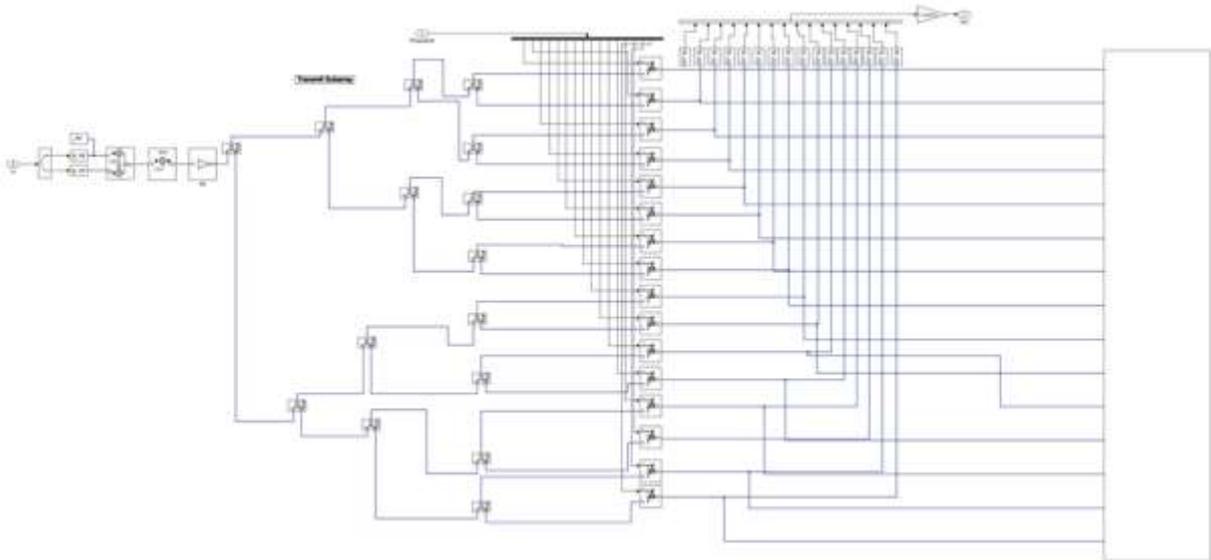


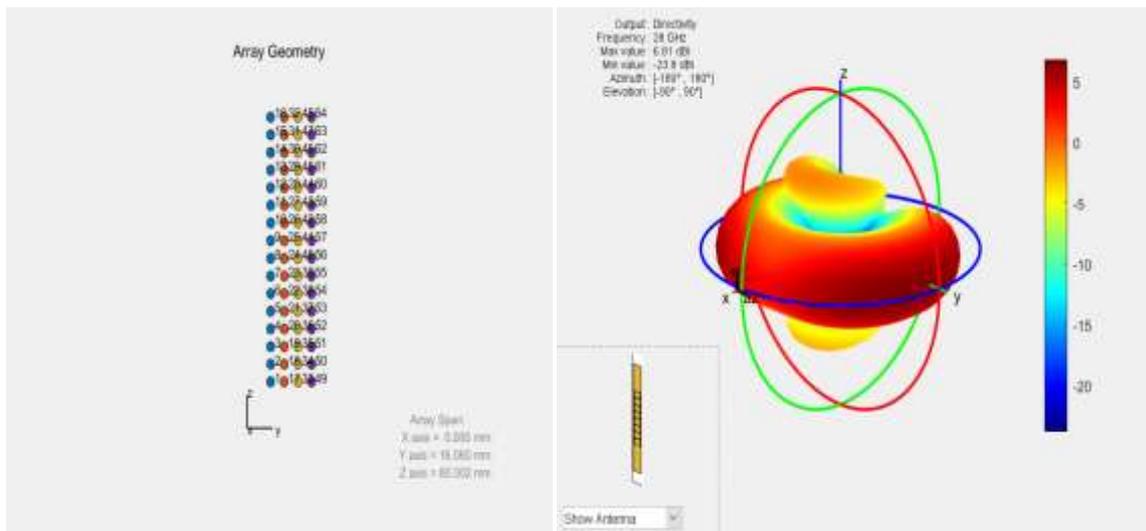
Figure IV- 37: Les blocs de RF Transmitter (8x8)

**IV.3.2.3 Transmit subarray (3 iem extension) (4x16)**

Notre troisième contribution consiste à modifier les sous-réseaux de transmission et les faire évoluer à des sous réseaux de 16 éléments (antennes). Chaque sous-réseau effectue d'abord une conversion ascendante à 5 GHz en utilisant un modulateur en quadrature, puis effectue une conversion ascendante à 28 GHz. Chaque étage introduit des dégradations telles que le bruit, et la non-linéarité. Un amplificateur de puissance non linéaire augmente le gain de l'émetteur et un réseau de diviseurs de puissance connecte l'amplificateur de puissance aux 16 antennes. 16 déphaseurs variables sont utilisés pour diriger le faisceau. Le chargement du sous-réseau d'antenne et le couplage entre les éléments d'antenne est modélisé par ses paramètres S.



a) Sous-réseau à 16 éléments d'antennes



b) Géométrie du réseau d'antenne 4x16 c) diagramme de rayonnement de réseaux 4x16

**Figure IV- 38: Transmission des sous porteuses 4x16.**

## **IV.4 Conclusion**

La technologie de la cinquième génération (5G) a des exigences spéciales parmi lesquelles ses antennes doivent avoir une largeur de bande supérieure à 1GHz et atteindre un gain élevé allant jusqu'à 12dB pour une productivité élevée. L'utilisation de la bande millimétrique dans la 5G est une solution appropriée pour répondre aux exigences de cette technologie de future.

Le système massive MIMO-beamforming permet de minimiser l'erreur quadratique moyenne à la réception, ce qui garantit une robustesse du lien de transmission.

A travers les travaux réalisés et les résultats obtenus, alors le concept de réseau d'antennes patch est utilisé pour améliorer le gain des différentes antennes élémentaires en annulant ou plutôt en réduisant au maximum les lobes secondaires du diagramme de rayonnement.

## *Conclusion générale*

Les travaux réalisés dans le présent mémoire de master s'inscrivent dans le domaine de la conception, la modélisation et la simulation d'une chaîne de transmission millimétrique à l'aide de concept de formation de faisceaux. Le modèle de réseau antennaire à simuler peut-être très utile pour les appareils téléphoniques mobiles de la 5G qui est encore en voie d'étude et de réalisation.

Le modèle proposé est modélisé en utilisant le Simulink/MATLAB2019b, il a été proposé comme une première solution pour les applications 5G. De nombreux outils sont utilisées pour arriver à la phase de conception d'une chaîne de transmission, telle que le calcul théorique des paramètres de l'antenne, des réseaux d'antenne, le choix de la meilleure méthode d'excitation d'antenne, des données et le débit des données à transmettre, la modulation en bande de base, la détection et le décodage de l'information reçu, la déclaration des valeurs des paramètres et l'évaluation des simulations obtenus. Les conclusions suivantes ont été tirées :

1/ L'utilisation d'un réseau d'antenne fonctionnant à la bande millimétrique facilite la réutilisation de l'espace. Elle permet de réduire les interférences et d'augmenter la capacité du système de télécommunications. Cela conduit à la transmission de données à haute vitesse, et peut donc être utilisé pour la 5G.

2/ C'est un concept totalement nouveau qui servira de base à un système fiable, durable et efficace offrant probablement des possibilités illimitées pour le monde numérique.

3/ Dans la bande millimétrique et les fréquences qui montrent des propriétés de propagation suffisantes comme la bande de 28 GHz, la recherche montre que la conception de petites antennes pour une utilisation dans les stations de base et les appareils mobiles est possible pour la future génération 5G. Les antennes à réaliser se basent pour fonctionner efficacement sur des techniques de modulation par formation de faisceau.

Enfin, dans le dernier chapitre du manuscrit nous avons d'abord vérifié la validité de notre modèle d'antenne patch micro ruban, réalisé la chaîne de transmission et nous avons interprété les résultats obtenus.

- [1] <https://www.phonandroid.com/5g-tout-savoir-reseau-futur.html>, consulté le 20/11/2019
- [2] Edward M. Roche, Benjamin H. Dickens-Jr. et Walker Townes, « La prochaine génération ligne », 32-1/2 | 2018, mis en ligne le 18 décembre 2018, consulté le 12 août 2020. URL : <http://journals.openedition.org/netcom/2869> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/netcom.2869>
- [3] <https://mbamci.com/innovations-de-la-technologie-5g/>, consulté le 28/01/2020
- [4] <https://www.frenchweb.fr/les-nombreux-defis-de-la-5g/317383>, consulté le 20/02/2020
- [5] <https://www.bluesoft-group.com/5g-iot-nouvelle-generation/>, consulté le 22/02/2020
- [6] [https://www.frandroid.com/telecom/488716\\_reseau-5g-tout-ce-qui-va-changer-quels-usages-et-pourquoi-la-technologie-est-importante](https://www.frandroid.com/telecom/488716_reseau-5g-tout-ce-qui-va-changer-quels-usages-et-pourquoi-la-technologie-est-importante), consulté le 22/11/2019
- [7] <https://www.usine-digitale.fr/article/5-applications-de-la-5g-au-service-de-la-mobilite-dont-on-ne-parle-jamais.N826915>, consulté le 22/11/2019 (Article)
- [8] <https://cordis.europa.eu/article/id/238330-novel-5g-architecture-based-on-virtual-networks/fr>, consulté le 10/12/2019
- [9] <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/espace/CND/Rapport-ANFR-presentation-generale-5G.pdf>, consulté le 01/02/2020
- [10] <https://www.viavisolutions.com/fr-fr/tests-5g>, consulté le 24/08/2020
- [11] <https://www.sofrecom.com/fr/publications/arrivee-de-la-5g-quel-impact-sur-le-deploiement-de-l-architecture-4g-lte>, consulté le 20/06/2020
- [12] <ftp://ftp.ni.com/evaluation/5g-new-radio-wp-fr.pdf>, consulté le 15/06/2020
- [13] <https://www.club-iot.sia-partners.com/article-5g>, consulté le 15/12/2019
- [14] S. Shi, W. Yang, J. Zhang, and Z. Chang, « Review of key technologies of 5g Wireless communication system, » in MATEC Web of Conferences, vol. 22, p. 01005, EDP Sciences, 2015. (Cité en page 7.)
- [15] Xiang Gao. MIMO massif dans des environnements de propagation réels. Université de Lund, 2016.
- [16] <https://resources.altium.com/fr/p/advantages-of-massive-mimo-for-5g-cellular-infrastructure>, consulté le 05/08/2020
- [17] Y. Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su, and A. V. Vasilakos, « A survey of millimeter wave communications (mmwave) for 5g : opportunities and challenges, » Wireless networks, vol. 21, no. 8, pp. 2657\_2676, 2015. (Cité en page 8.)
- [18] J.-B. Doré, R. Gerzaguet, N. Cassiau, and D. Ktenas, « Waveform contenders for 5g : Description, analysis and comparison, » Physical communication, vol. 24, pp. 46\_61, 2017. (Cité en page 9.)
- [19] [https://www.rtf.be/info/societe/detail\\_la-5g-le-reseau-mobile-ultra-rapide-et-hyper-connecte-de-2020?id=9837725](https://www.rtf.be/info/societe/detail_la-5g-le-reseau-mobile-ultra-rapide-et-hyper-connecte-de-2020?id=9837725), consulté le 25/06/2020
- [20] <https://www.thalesgroup.com/fr/europe/france/dis/mobile/inspiration/5g>, consulté le 25/06/2020
- [21] <https://www.oezratty.net/wordpress/2018/nombreux-defis-5g/>, consulté le 29/06/2020

- [22] [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-d/opb/pref/D-PREF-BB.5G\\_01-2018-PDF-F.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/pref/D-PREF-BB.5G_01-2018-PDF-F.pdf), consulté le 28/06/2020.
- [23] <https://www.rs-online.com/designspark/5g-is-here-but-the-challenges-are-just-beginning-fr>, consulté le 04/07/2020
- [24] <https://www.ibwave.com/fr/5g-networks>, consulté le 05/07/2020.
- [25] <https://trends.levif.be/economie/high-tech/les-debuts-de-la-5g-aux-etats-unis/article-news1235497.html#:~:text=En%202019%2C%201%2C6%20million,et%20133%20millions%20en%202023.&text=%22Les%20op%C3%A9rateurs%20ont%20lanc%C3%A9%20les,applications%20sp%C3%A9cifiques%20pour%20la%205G>, consulté le 06/07/2020.
- [26] <https://reseau.developpez.com/actu/284007/Les-Etats-Unis-la-Chine-le-Japon-et-la-Coree-vont-dominer-la-5G-en-laissant-l-Europe-a-la-traine/#:~:text=La%20Chine%2C%20le%20Japon%2C%20la,proposant%20en%20premier%20la%205G.&text=Selon%20une%20%C3%A9tude%20de%20GSMA,seront%20en%205G%20en%20Cor%C3%A9e>, consulté le 10/07/2020.
- [27] [https://www.francetvinfo.fr/monde/chine/deploiement-de-la-5g-en-europe-la-commission-europeenne-n-ecarte-pas-huawei-mais-etablit-des-regles-claires-a-respecter\\_3804329.html](https://www.francetvinfo.fr/monde/chine/deploiement-de-la-5g-en-europe-la-commission-europeenne-n-ecarte-pas-huawei-mais-etablit-des-regles-claires-a-respecter_3804329.html), consulté le 12/07/2020.
- [28] <https://demarchesadministratives.fr/actualites/les-avantages-et-inconvenients-du-deploiement-de-la-5g>, consulté le 15/01/2020.
- [29] <https://www.spiria.com/fr/blogue/iot-m2m-systemes-embarques/les-futurs-reseaux-cellulaires-5g/>, consulté le 15/03/2020.
- [30] <https://fr.slideshare.net/vincepernoi1/la-modulation-psk>, consulté le 20/03/2020.
- [31] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation\\_par\\_d%C3%A9placement\\_de\\_fr%C3%A9quence](https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation_par_d%C3%A9placement_de_fr%C3%A9quence), consulté le 23/01/2020.
- [32] <http://claude-gimenes.fr/signal/communications-numeriques/-iv-modulation-d-amplitude-en-quadrature-ma-qam>, consulté le 23/01/2020
- [33] [http://arsene.perez-mas.pagesperso-orange.fr/transmission/modulation/modulation\\_QAM\\_numerique.htm](http://arsene.perez-mas.pagesperso-orange.fr/transmission/modulation/modulation_QAM_numerique.htm), consulté le 02/02/2020
- [34] Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., & Kang, C. G. (2010). *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB®*. John Wiley and Sons.
- [35] Hien Quoc Ngo, Erik G. Larsson, Thomas L. Marzetta. Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems. *IEEE Transactions on Communications*. Vol 61, Issue 4, April 2013.
- [36] Fredrik Rusek, Daniel Persson, Buon Kiong Lau, Erik G. Larsson, Thomas L. Marzetta, Ove Edfors, and Fredrik Tufvesson. *Scaling up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Array*. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2012.
- [37] Emil Björnson, Luca Sanguinetti, Jakob Hoydis, and Mérouane Debbah. Designing Multi-User MIMO for Energy Efficiency: When is Massive MIMO the Answer?, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Istanbul, Turkey, Avril 2014.

- [38] Nakamura, Takehiro, Satoshi Nagata, Anass Benjebbour, Yoshihisa Kishiyama, Tang Hai, Xiaodong Shen, Yang Ning and Li Nan. "Trends in small cell enhancements in LTE advanced." *IEEE Communications Magazine* 51 (2013): 98-105.
- [39] H. Leem, S. Y. Baek and D. K. Sung, "The Effects of Cell Size on Energy Saving, System Capacity, and Per-Energy Capacity," *2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, Sydney, NSW, 2010, pp. 1-6, doi: 10.1109/WCNC.2010.5506411.
- [40] Bhushan, N., Li, J., Malladi, D., Gilmore, R., Brenner, D., Damnjanovic, A., Sukhavasi, R., Patel, C., & Geirhofer, S. (2014). Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G. *IEEE Communications Magazine*, 52, 82-89.
- [41] [Boyu Li](#), [Dengkui Zhu](#), [Ping Liang](#), Small Cell In-Band Wireless Backhaul in Massive MIMO Systems: A Cooperation of Next-Generation Techniques, in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 12, pp. 7057-7069, Dec. 2015, doi:10.1109/TWC.2015.2464299.
- [42] Wenjia Liu, Shengqian Han, Chenyang Yang and Chengjun Sun, "Massive MIMO or small cell network: Who is more energy efficient?," *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, Shanghai, 2013
- [43] [Tran, Thien-Toan & Shin, Yoan & Shin, Oh-Soon. \(2012\). Overview of enabling technologies for 3GPP LTE-advanced. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2012. 10.1186/1687-1499-2012-54.](#)
- [44] <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7839266/>, consulté le 06/08/2020
- [45] A. L. Swindlehurst, E. Ayanoglu, P. Heydari and F. Capolino, "Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution?," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 9, pp. 56-62, September 2014.
- [46] <https://oatd.org/oatd/record?record=star-france%3A2019LJL1I043>, consulté le 25/07/2020
- [47] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01496719/document>, consulté le 27/07/2020
- [48] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02865510/document>, consulté le 29/08/2020
- [49] <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02262440>, Diversité spatiale, temporelle et fréquentielle pour la mesure précise de distance et d'angle d'arrivée en ultra large bande, consulté le 03/08/2020.
- [50] F. Rusek, D. Persson, Buon Kiong Lau, E.G. Larsson, T.L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson. Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*, 30(1):40–60, 2013.
- [51] B. Kouassi, I. Ghauri, and L. Deneire. Reciprocity-based cognitive transmissions using a MU massive MIMO approach. In *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 2738–2742, 2013.
- [52] Boris Rodrigue Kouassi. *Stratégies de coopération dans les réseaux radio cognitifs*. PhD thesis, Université Nice Sophia Antipolis, October 2013.
- [53] <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/99/>, consulté le 04/08/2020
- [54] <https://core.ac.uk/download/pdf/33800901.pdf>, consulté le 06/08/2020
- [55] <http://www.reseaux-telecoms.net/actualites/lire-le-beamforming-pour-accelerer-les-communications-sans-fil-27834.html>, consulté le 07/08/2020
- [56] K.T. Truong and R.W. Heath. Effects of channel fading in massive MIMO systems. *Journal of Communications and Networks*, 15(4):338–351, 2013.

- [57] Clayton Shepard , Narendra Anand, and Lin Zhong .Practical performance of MU-MIM Opre coding in many-antenna base stations. In *Proceeding of the 2013 work shop on Cellular networks :operations ,chllenges, and future design*, pages13–18.ACM,2013.
- [58] Sebastian Wagner, Romain Couillet , Merouane Debbah,and Dirk T.M. Slock .Large System Analys is of Linear Precoding in Correlated MISO Broadcast Channel sunder Limited Feedback. *IEEE Transaction son Information Theory*, 58(7):4509–4537,July 2012.arXiv:0906.3682[cs, math].
- [59] J. Hoydis ,S.ten Brink, and M. Debbah. Comparison of linear precoding schemes for downlink massiveMIMO.In *2012 IEEE International Conference on Communications(ICC)*, pages2135–2139,June2012.
- [60] Saif Khan Mohammed and Erik G. Larsson. Constant Envelope Precoding for Power-Efficient Downlink Wireless Communication in Multi- User MIMO Systems Using Large Antenna Arrays. *ArXiv :1111.1191 [cs, math]*, November2011.
- [61] Quoc-Tuong N go, Olivier Berder ,and Pascal Scalart.3-Dminimum Euclidean distance based sub-optimal precoder for MIMO spatial multiplexing systems.In *Communications(ICC),2010IEEEInternational Conferenceon*, pages1–5.IEEE,2010
- [62] T.L. Marzetta .Non cooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas. *IEEE TransactionsonWireless Communications*, 9(11):3590–3600,2010.
- [63] [https://dumas.ccsd.cnrs.fr/IETR\\_SCN/hal-01443715v1](https://dumas.ccsd.cnrs.fr/IETR_SCN/hal-01443715v1), consulté le 14/08/2020
- [64][https://www.researchgate.net/publication/309735128\\_Amelioration\\_de\\_la\\_capacite\\_d'un\\_systeme\\_MIMO\\_a\\_travers\\_l'allocation\\_de\\_different\\_types\\_de\\_puissance](https://www.researchgate.net/publication/309735128_Amelioration_de_la_capacite_d'un_systeme_MIMO_a_travers_l'allocation_de_different_types_de_puissance), consulté le 16/08/2020
- [65] Shuang feng Han ,I.Chih-Lin, Zhikun Xu ,and Corbett Rowell . Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave5g. *CommunicationsMagazine,IEEE*, 53(1):186–194, 2015
- [66] <http://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/tag/beamforming/>, consulté le 18/08/2020
- [67] [https://www.cder.dz/download/jnv2\\_21.pdf](https://www.cder.dz/download/jnv2_21.pdf), consulté le 20/08/2020
- [68] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01496719/document>, consulté le 21/08/2020
- [69] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02492090/document>, consulté le 22/08/2020
- [70] Javier Lorca Hernando. *Method and System for Performing Multiple Access in Wireless OFDM Cellular Systems Considering Both Space and Frequency Domains*. November2014.USPatent20,140,348,255.