



HAL
open science

Étude et conception d'antennes réseaux intelligente 5G pour les 'smal cell'

Meriem Drissi

► **To cite this version:**

Meriem Drissi. Étude et conception d'antennes réseaux intelligente 5G pour les 'smal cell'. Electronique. Normandie Université; Université des sciences, des techniques et de médecine de Tunis, 2023. Français. NNT : 2023NORMC253 . tel-04459284

HAL Id: tel-04459284

<https://theses.hal.science/tel-04459284>

Submitted on 15 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité **ELECTRONIQUE**

Préparée au sein de l'**Université de Caen Normandie**

En cotutelle internationale avec l'**Université de Tunis - Tunisie, TUNISIE**

Etude et conception d'antennes réseaux intelligente 5G pour les "small cells"

Présentée et soutenue par
MERIEM DRISSI

Thèse soutenue le 28/10/2023
devant le jury composé de :

M. DAVID CORDEAU	Maître de conférences HDR - IUT ANGOULEME UNIVERSITE POITIERS	Rapporteur du jury
M. LASSAAD LATRACH	Professeur - Université de la Manouba Tunis - Tunisie	Rapporteur du jury
MME RIM BARRAK	Maître de conférences - Université de Carthage	Membre du jury
M. HICHEM TRABELSI	Professeur - Ecole Nationale d'Ingénieurs de Carthage	Président du jury
M. PHILIPPE DESCAMPS	Professeur des universités - ENSICAEN	Directeur de thèse
M. ALI GHARSALLAH	Professeur - Université de Tunis - Tunisie	Co-directeur de thèse

Thèse dirigée par **PHILIPPE DESCAMPS** (GREYC ALGORITHMIQUE) et **ALI GHARSALLAH** (Université de Tunis - Tunisie)



Remerciements

Remerciements

C'est avec un grand plaisir que je réserve ces lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

J'aimerais exprimer ma plus sincère gratitude envers mes deux directeurs de thèse. Tout d'abord, je tiens à remercier M. Ali GHARSALLAH, non seulement pour ses compétences professionnelles, mais aussi pour ses qualités humaines, sans lesquelles je n'aurais probablement pas été en mesure de relever ce défi. Je souhaite adresser un remerciement particulier à M. Philippe DESCAMPS pour sa foi en mes capacités, pour m'avoir donné l'opportunité de contribuer humblement à la recherche dans ce domaine, et pour son soutien inestimable tout au long de mes années de thèse.

Mes remerciements les plus sincères vont tout particulièrement à M. Nabil BENJELLOUN, mon encadrant, de m'avoir conseillé et fait bénéficier de son expérience au cours de ces années. J'ai pris plaisir à apprendre à ses côtés.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude envers M David CORDEAU , Professeur à l'Université de Poitiers, et Mr. LASSAAD LATRECH, Professeur à l'ENSI d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse et d'avoir consacré leur précieux temps à l'examen attentif de mon manuscrit.

Mes remerciements s'étendent également à Mme. Rim BARRAK, Professeur à SUP'COM d'avoir accepté d'examiner mes travaux de recherche et à M. Hichem TRABELSI qui a accepté de présider le jury.

J'exprime ma gratitude envers toutes les personnes des deux laboratoires qui ont contribué, directement ou indirectement, au succès et à l'achèvement de ces travaux de recherche, notamment Khawla B, Moncef K, Gwenaël F, Niamien C, Vincent G, Faten M, Omayya D et Khawla M .

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à toute ma famille :

À mon cher père, pour avoir contre vents et marées cru en moi. Tu as toujours été là pour moi, quoi qu'il arrive. Merci Papa ! À la plus mignonne des filles, Maram tu es l'angelot de la famille. A la meilleure de toutes les mamans, Merci d'avoir cru en moi, même quand j'en doutais moi-même. À ma sœur, mon frère qui ont toujours veillé sur moi avec bienveillance et tous les membres de ma famille qui ont été présents dans ma vie,

À mon compagnon de ma vie, qui a été à mes côtés tout au long de ce travail. Son soutien et sa compréhension ont été inestimables. Je souhaite dédier l'achèvement de ce travail en signe de mon profond attachement envers lui.

À Mes amis qui ont été présents pour me soutenir moralement au cours de toutes ces années de travail acharné Wafa D, Imen B, Imen D, Houyem C, Mohamed S, Hamdi S, Amèn T Fidaa B, Nedra S, Majdi B, Hamza B, Neila K, Seddik W, Safa F, Maher K, Amin O, Yosra F Ali R et Imed J.

Mes remerciements chaleureux vont à Fawzeyya A et Hammadi B.

Abstract

Résumé

Le besoin croissant de débits de données très élevés, d'efficacité énergétique (EE) et l'apparition de nouveaux utilisateurs posent de nombreux défis pour les réseaux cellulaires de cinquième génération. Pour répondre à ces exigences, une combinaison de conception d'antennes et de traitement numérique du signal est nécessaire. Les antennes intelligentes peuvent considérablement améliorer les performances, la capacité, la largeur de bande, les débits de données et l'efficacité énergétique.

Les antennes intelligentes offrent des performances supérieures en termes de consommation d'énergie, de capacité utilisateur et de rejet de bruit par rapport aux antennes existantes. De plus, elles peuvent orienter le faisceau principal vers l'utilisateur utile. De cette manière, la puissance maximale est rayonnée vers la cible, ce qui entraîne un gain très élevé dans cette direction.

Une antenne intelligente est également utilisée pour augmenter la capacité du réseau, atténuer les interférences, réutiliser la bande passante et réduire le coût global de l'infrastructure. L'idée fondamentale est d'approcher au maximum les nœuds d'accès des utilisateurs finaux. Cette solution prometteuse est obtenue grâce au déploiement intensif de petites cellules appelées "Small Cells" dans des zones à fort trafic, en appliquant la technique de formation de faisceau.

Les "Small Cells" doivent être conçues de manière à améliorer au maximum la réception du signal tout en concentrant la transmission du signal dans les directions utiles, cela se fait en utilisant des réseaux d'antennes adaptatives. Cette approche permet d'éviter l'utilisation inutile de toute la puissance disponible pour transmettre « à l'aveugle » en espérant atteindre le terminal.

Les travaux entrepris dans le cadre de cette thèse sont alignés avec cette problématique. L'objectif principal consiste donc à concevoir et mettre en place un petit réseau d'antennes, ou "Small Cells", opérant dans la bande C, et capable de modifier la direction du faisceau en fonction des besoins des utilisateurs. Pour ce faire, une technique de formation de faisceau numérique a été développée et appliquée à un réseau d'antennes planaires en utilisant une approche basée sur la SDR (Radio Définie par Logiciel).

Abstract

Abstract

The growing need for very high data rates, energy efficiency (EE) and the apparition of new users, pose many challenges for fifth generation cellular networks. To meet these requirements, a combination of antenna design and digital signal processing is needed. Performance, capacity, bandwidth, data rates and energy efficiency can be significantly improved by these smart antennas.

Smart antennas offer superior performance in terms of power consumption, user capacity, and noise rejection compared to existing antennas. Moreover, they can direct the main beam towards the actual user. In this way, the maximum power is radiated towards the target, resulting in very good gain in that direction [3]. A smart antenna can also be used to increase network capacity, mitigate interference, reuse spectrum, and reduce the overall cost of the infrastructure.

The fundamental idea is to bring access nodes as close as possible to end-users. This promising solution is achieved through the intensive deployment of small cells in high-traffic areas, using beamforming techniques.

These small cells must be designed to maximize signal reception while concentrating signal transmission in useful directions. This is accomplished through the use of adaptive antenna arrays. This approach avoids the unnecessary use of all available power to transmit blindly in the hope of reaching the terminal.

The research conducted within the scope of this thesis aligns with this challenge. The primary objective is to design and implement a small antenna network, or "Small Cells," operating in the C band and capable of adjusting the beam direction based on user needs. To achieve this, a digital beamforming technique has been developed and applied to a planar antenna array using a Software-Defined Radio (SDR)-based approach.

Table des Matières

Table des matières

Introduction générale.....	1
1 ^{er} chapitre : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G.....	5
1. Introduction	5
2. Cahier des charges.....	5
3. Les défis de la 5G.....	7
3.1. L'évolution des communications mobiles.....	7
3.2. La 5G.....	10
3.3. Les solutions envisagées pour la 5G.....	11
3.3.1. Les fréquences utilisées.....	11
3.3.2. Modulation	13
3.3.3. Duplexage.....	13
3.4. Différentes exigences de la 5G.....	14
3.4.1. Débits ultra-élevés	15
3.4.2. Efficacité énergétique.....	15
3.4.3. Capacité de trafic par zone.....	16
3.4.4. Efficacité spectrale	16
3.4.5. Mobilité.....	18
3.4.6. Densité de connexion.....	18
3.4.7. Débit moyen par utilisateur.....	19
3.4.8. La latence	19
4. La 5G, les solutions qui font la différence	20
4.1. Massive MIMO.....	20
4.2. Full Duplex	22
4.3. Small cells.....	23
4.4. Beamforming	24
5. Objectif.....	25
Conclusion.....	28
Références bibliographiques.....	29

Table des Matières

Chapitre 2 : Etude des antennes intelligentes pour la 5G.....	32
1. Introduction	32
2. Les Antennes Micro-ruban : Conception et Avantages dans les Systèmes de Communication 5G.....	32
2.1. Avantages des antennes micro ruban.....	33
2.2. Antennes à élément unique.....	34
2.2.1. Définition	34
2.2.2. Conception d'une antenne à élément unique	34
2.2.2.1. Introduction.....	34
2.2.2.2. Conception d'une antenne à élément unique	36
2.3. Réseau d'antennes	39
2.3.1. Définition	39
2.3.2. Principe de fonctionnement	40
2.3.3. Facteur du réseau	41
2.3.3.1. Réseau linéaire uniformément alimenté et régulièrement espacé.....	42
2.3.3.2. Réseau planaire uniformément alimenté et régulièrement espacé.....	42
2.3.3.3. Réseau circulaire	43
2.4. Réseaux d'antennes et antennes intelligentes.....	43
2.4.1. Introduction.....	43
2.4.2. Conception du réseau d'antenne pour la 5G	44
2.5. La nécessité d'un traitement d'antennes	52
2.6. Architecture et fonctionnement de l'antenne intelligente.....	52
2.6.1. La structure d'une antenne intelligente	52
2.6.2. Avantages de l'antenne intelligente.....	54
2.6.3. Types de l'antenne intelligente.....	54
2.6.3.1. Système à commutation du faisceau	55
2.6.3.1.1. Matrice de Butler.....	56
2.6.3.1.2. Matrice de Nolen	57
2.6.3.2. Système à réseau adaptatif	57
2.6.3.2.1. Définition	57
2.6.3.2.2. Comparaison entre les deux types de l'antenne intelligente	59
2.6.4. Domaines d'application de la technologie d'antennes intelligentes	61
3. Techniques avancées des antennes intelligentes	62
3.1. Le beamforming : une avancée révolutionnaire des techniques des antennes intelligentes"	62
3.1.1. Définition et principe du Beamforming	62

Table des Matières

3.1.2. État de l'art du beamforming : les avancées récentes dans la technique de formation de faisceau	63
3.2. Classification des techniques de Beamforming	68
3.2.1. La formation de faisceau numérique (DBF)	69
3.2.2. beamforming analogique (ABF)	70
3.2.3 Beamforming hybride (ABF)	71
Conclusion	73
Références bibliographiques.....	74
Chapitre 3. Validation des systèmes multi antennes	80
1. Introduction	80
2. Les systèmes multi-antennes	81
3. SOFTWARE DEFINED RADIO	83
4. LE PÉRIPHÉRIQUE RADIO LOGICIEL UNIVERSEL	87
4.1. Introduction à l'USRP	87
4.2. Caractéristiques de l' USRP.....	88
4.3. Logiciels Compatibles	92
4.3.1. GNU Radio	92
4.3.2. GNU Radio et le USRP.....	92
4.3.3. Simulink-USRP.....	93
5. Implémentation.....	94
6. Conception du système SISO	97
7. Conception du système MISO 2x1	102
8. Conception du système SIMO 1x2.....	104
9. Conception du système MIMO 2x2	106
10. Résultats.....	109
Conclusion	113
Références bibliographiques.....	115
Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments.....	118
1. Introduction	118
2. Techniques d'estimation de l'angle d'arrivée	119
2.1. Introduction.....	119
2.2. Le principe de fonctionnement	119
3. Comparaison entre différentes méthodes de détection des angles d'arrivés.....	128
4. Conception du système de formation des faisceaux.....	134
5. Implémentation du beamforming	137

Table des Matières

6. Validation expérimentale.....	145
Conclusion.....	152
Références bibliographiques.....	153
Conclusion générale.....	156
Productions scientifiques.....	159

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1. 1: L'évolution des communications mobiles.....	7
Figure 1. 2: L'architecture du réseau 5G.	9
Figure 1. 3: Comparaison entre la 4G et la 5G.....	10
Figure 1. 4 : Les bandes de fréquence 5G identifiées // Source : ANFR	11
Figure 1. 5 : Mode de duplexage.....	14
Figure 1. 6 : Comparaison entre 4G et 5G.	15
Figure 1. 7 : Solutions envisagées pour les réseaux 5G.	20
Figure 1. 8 : Système MIMO.	22
Figure 1. 9 : small cells.	24
Figure 1. 10: Formation de faisceau.....	25
Figure 2. 1 : Géométrie d'une antenne patch a élément unique	34
Figure 2. 2 : Alimentation directe.....	35
Figure 2. 3 : Alimentation à proximité.	35
Figure 2. 4 : conception sous HFSS d'une antenne (a) rectangulaire (b) circulaire.	37
Figure 2. 5 : Comparaison entre antenne patch circulaire et antenne patch rectangulaire : (a)coefficient de réflexion (b) diagramme de rayonnement.	37
Figure 2. 6: Comparaison entre antenne patch circulaire et antenne patch rectangulaire : VSWR	38
Figure 2. 7:Rapport axial simulé (AR).....	39
Figure 2. 8: Réseau d'antennes schématisé avec son alimentation parallèle.	40
Figure 2. 9: Position du problème : N sources indépendantes placées sur une surface.	42
Figure 2. 10: Réseau linéaire.....	42
Figure 2. 11: Réseau planaire.	43
Figure 2. 12: Réseau circulaire.....	43
Figure 2. 13:Antenne de référence 'réseau d'antennes patch rectangulaires 2×2 pour la 5G'. 45	
Figure 2. 14: Conception de notre réseau d'antennes patch circulaire.	45
Figure 2. 15: Adaptation d'impédance.	46
Figure 2. 16 : Comparaison entre les résultats simulés et mesurés du coefficient de réflexion S_{11}	47
Figure 2. 17:Mesure de diagramme de rayonnement.....	48
Figure 2. 18: Comparaison de diagramme de rayonnement simulé et mesuré à 3.48GHz ; (a) $\varphi=90$ (b) $\varphi=0$	48
Figure 2. 19: Configurations multi couches.	49
Figure 2. 20:Analyse comparative des performances de 3 configurations de réseau d'antennes.	50
Figure 2. 21 : Antenne multicouche réalisée	51
Figure 2. 22: Comparaison entre les résultats simulés et mesurés.	51
Figure 2. 23:Architecture et fonctionnement de l'antenne intelligente.....	54
Figure 2. 24: Système à commutation du faisceau.....	56
Figure 2. 25: Schématique de Matrice bulter 4*4.	56
Figure 2. 26: Architecture de la matrice Nolen symétrique 3 × 3 (b) Photographie de la matrice 3 × 3 Nolen fabriquée.....	57

Liste des figures

Figure 2. 27: structure d'une antenne adaptative.	58
Figure 2. 28 : Implémentation du Beamforming.	64
Figure 2. 29 : diagramme d'une application de formation de faisceau en utilisant des cartes USRP.	67
Figure 2. 30: Évaluation expérimentale des capacités de beamforming avec des cartes USRP.	67
Figure 2. 31: Beamforming numérique.	70
Figure 2. 32: La formation de faisceau analogique.	71
Figure 2. 33: La formation de faisceau Hybride.	72
Figure 3. 1 : Schéma global du carte USRP.	89
Figure 3. 2: diagramme fonctionnel général de la carte USRP B210.	90
Figure 3. 3: Schémas bloc de la carte USRP B210.	91
Figure 3. 4: Architecture d'un émetteur.	93
Figure 3. 5: Architecture d'un récepteur.	93
Figure 3. 6 : Schéma de traitement des données avec MATLAB et USRP.	94
Figure 3. 7 : Détection de deux cartes.	95
Figure 3. 8: Diagramme de blocs de base du système de communication 5G.	96
Figure 3. 9 : Implémentation du SISO.	98
Figure 3. 10: Modèle de l'émetteur utilisant Simulink.	99
Figure 3. 11: Programmation du bloc pour transmettre des signaux à l'aide de périphériques SDR.	100
Figure 3. 12: Programmation du bloc "SDRU Receiver" dans Simulink pour recevoir et traiter des signaux radio à l'aide de périphériques SDR.	101
Figure 3. 13: Le modèle de récepteur.	102
Figure 3. 14: La mise en œuvre de l'émetteur dans un système MISO en utilisant Simulink et le périphérique USRP B210.	103
Figure 3. 15: La mise en œuvre du récepteur dans un système MISO en utilisant Simulink et le périphérique USRP B210.	104
Figure 3. 16: Implémentation du MISO.	104
Figure 3. 17: La mise en œuvre de l'émetteur dans un système SIMO en utilisant Simulink et le périphérique USRP B210.	105
Figure 3. 18: La mise en œuvre du récepteur dans un système SIMO en utilisant Simulink et le périphérique USRP B210.	106
Figure 3. 19 : Système MIMO 2X2.	106
Figure 3. 20: Programmation de l'USRP via Simulink.	107
Figure 3. 21: La mise en œuvre de l'émetteur dans un système MIMO en utilisant Simulink et le périphérique USRP B210.	108
Figure 3. 22: Réception simultanée.	109
Figure 3. 23: Le spectre de fréquence du signal modulé.	110
Figure 3. 24: Le spectre de fréquence du signal démodulé.	110
Figure 3. 25: Signal récupéré par (a) le système SISO, (b) le système MISO (c) le système SIMO (d) le système MIMO.	111
Figure 3. 26 : Comparaison de la capacité entre SISO, SIMO, MISO et MIMO.	112
Figure 3. 27: Comparaison du BER entre SISO, SIMO, MISO et MIMO.	Error! Bookmark not defined.

Liste des figures

Figure 4. 1 : Comparaison entre antenne classique et antenne intelligente en se basant sur DOA.	119
Figure 4. 2: Principe de mesure de phase.	120
Figure 4. 3 : Les étapes pour détecter les angles d'arrivées en utilisant Beamscan.	125
Figure 4. 4: Les étapes pour détecter les angles d'arrivées en utilisant MVDR.	126
Figure 4. 5: les étapes pour détecter les angles d'arrivées EN UTILISANT MUSIC.	127
Figure 4. 6: Estimation des angles d'arrivée des deux signaux largement espacés.	128
Figure 4. 7: Diagramme en 3D de détection des angles d'arrivées largement espacés par Beamscan.	129
Figure 4. 8: Diagramme en 3D de détection des angles d'arrivées largement espacés par MVDR.	129
Figure 4. 9: Diagramme en 3D de détection des angles d'arrivées largement espacés par MUSIC.	130
Figure 4. 10: Estimation des angles d'arrivée des deux signaux étroitement espacés.	131
Figure 4. 11: Estimation des angles d'arrivée des deux signaux étroitement espacés.	131
Figure 4. 12: Diagramme en 3D de détection des angles d'arrivées largement espacés par MVDR.	132
Figure 4. 13 : Diagramme en 3D de détection des angles d'arrivées largement espacés par MUSIC.	132
Figure 4. 14: VXG.	135
Figure 4. 15: Architecture à deux volets système de beamforming numérique : Analogique et numérique.	137
Figure 4. 16: Architecture du système DBF.	138
Figure 4. 17 Implémentation du système DBF a 4 éléments	139
Figure 4. 18: Graphique rectangulaire de la magnitude du diagramme de faisceau pour un réseau linéaire à 4 éléments pointant vers 40 degrés.	142
Figure 4. 19: Graphique polaire de la magnitude du diagramme de faisceau pour un réseau linéaire à 4 éléments pointant vers 40 degrés.	142
Figure 4. 20: Graphique polaire de la magnitude du diagramme de faisceau pour un réseau linéaire à 4 éléments avec des zones d'annulations de diagramme de faisceau positionnés à 30°, 60° et 90°.	143
Figure 4. 21: Graphique rectangulaire de la magnitude du diagramme de faisceau pour un réseau linéaire à 4 éléments avec des nuls de diagramme de faisceau positionnés à 30°, 60° et 90°.	144
Figure 4. 24: système de Beamforming a 4 éléments	145
Figure 4. 22: Transmission du signal	146
Figure 4. 23: Programmation du bloc sdr.	147
Figure 4. 25: Implementation du digital Beamforming en utilisant Simulink.	149
Figure 4. 26: signal récupéré : (a) avec DBF (b) sans DBF.	151

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1. 1: Tableau comparatif entre les différentes générations	10
Tableau 1. 2 : Tableau comparatif.....	12
Tableau 2. 1: Dimensions détaillées de l'antenne proposée.	46
Tableau 2. 2: Etude comparative entre les deux types des systèmes intelligentes.....	60
Tableau 2. 3: Tableau comparatif entre les différents types de beamforming.....	72
Tableau 3. 1 : Tableau comparatif entre les différents types des cartes SDR.....	86
Tableau 4. 1 : Comparaison entre les différentes méthodes.....	122
Tableau 4. 2 : Le calcul des poids de pondération.....	141
Tableau 4. 3 : Le calcul des poids de pondération.....	143

Liste des abréviations

Liste des abréviations

CDMA : Code Division Multiple Access

LTE : Long Term Evolution

Massive MIMO: Massive Multi Input Multi Output

mMTC : Massive Machine Type Communications

MU-MIMO: multi-user MIMO

OFDM: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

RAN: Radio access network

SNR: Signal to noise ratio

TDMA: Time Division Multiple Access

UDN: Ultra Dense Network

UIT-R International Telecommunication Union Radiocommunication

uRLLC : Ultra-Reliable and Low Latency

WIMAX: Worldwide interoperability for microwave access

BER : Bit Error Rate (Taux d'Erreur en Bits)

SDR Software-Defined Radio

USRP: Universal Software Radio Peripheral

ULA : Uniform Linear Array (Réseau Linéaire Uniforme)

DBF : Digital Beamforming (Formation de Faisceau Numérique)

ARCEP : Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes

SNR: Signal-to-Noise Ratio

Introduction générale

Introduction générale

Au fil des années récentes, nous avons assisté à une expansion fulgurante des technologies et des applications dans divers secteurs tels que la santé, l'industrie, le transport, les médias et l'énergie. Cette croissance s'accompagne d'une prolifération d'objets connectés et de services novateurs. Ces objets seront interconnectés entre eux, reliés à Internet et en interaction avec des milliards de personnes. Nous sommes témoins d'une numérisation croissante du monde, où tout est de plus en plus interconnecté.

Les avancées rapides de notre époque exigent des améliorations significatives dans les réseaux de télécommunications mobiles. La technologie 4G, basée sur la norme LTE (Long Term Evolution), a apporté des améliorations telles qu'une augmentation du débit et de la bande passante par rapport aux réseaux mobiles précédents. Cependant, elle fait face à une surcharge croissante en raison de la multiplication des objets connectés et de leurs utilisations diverses. Bien qu'elle permette une navigation Internet fluide grâce à la technologie IP, la 4G ne peut plus répondre efficacement aux exigences croissantes imposées par la croissance des objets connectés en raison de la congestion de ses fréquences.

Face à ces défis, une nouvelle révolution se profile avec l'émergence du réseau 5G, un nouveau standard des systèmes de télécommunications mobiles. Ce standard offre des perspectives prometteuses pour répondre aux besoins actuels ainsi qu'à ceux du futur, lorsque nous serons confrontés à des centaines de milliards d'objets connectés. La technologie 5G est conçue pour offrir des améliorations significatives par rapport à la 4G, notamment en termes de vitesse, de capacité, de latence réduite et de connectivité massive des appareils. Elle promet de soutenir de manière efficace et fiable les applications et services émergents, tels que l'Internet des objets (IdO), la réalité virtuelle, les véhicules autonomes et bien d'autres encore. Le déploiement du réseau 5G est donc essentiel pour faire face aux besoins croissants de connectivité de notre société moderne et pour permettre l'émergence de nouvelles innovations technologiques.

La 5G ne se limite pas à résoudre les problèmes de bande passante et d'augmentation du débit, mais vise également à réduire la latence, à offrir une qualité de service omniprésente et à réduire la consommation d'énergie. Pour y parvenir, la présente génération de systèmes de télécommunications mobiles doit combiner diverses technologies, notamment l'utilisation

Introduction générale

d'antennes intelligentes. Ces antennes sont capables de diriger les signaux radiofréquences de manière optimisée pour atteindre les utilisateurs avec une puissance maximale et une qualité de signal optimale, améliorant ainsi l'efficacité de la communication, réduisant les interférences et augmentant la capacité du réseau.

Les systèmes de communication basés sur les antennes intelligentes de la 5G se démarquent des antennes traditionnelles par leur capacité à diriger le signal de manière optimale, à utiliser efficacement le spectre radioélectrique, à réduire la pollution électromagnétique en adaptant leur puissance en fonction de la distance entre l'utilisateur et l'antenne, prolongeant ainsi la durée de vie de la batterie des appareils, à s'adapter à la mobilité des utilisateurs, qu'ils se trouvent à l'intérieur de bâtiments, dans des véhicules ou sur leur lieu de travail. Et à garantir une connectivité sans fil performante qui garantit une communication ininterrompue, quel que soit l'emplacement des utilisateurs.

Les systèmes d'antennes intelligentes de la 5G ont la capacité d'analyser l'environnement électromagnétique et détecter les interférences. Ils peuvent ensuite ajuster automatiquement leur orientation et leur puissance pour optimiser la qualité de la transmission dans la direction souhaitée. Puisqu'ils sont capables de modifier simultanément la phase et l'amplitude des signaux émis par chaque élément d'antenne. Cela entraîne une amélioration significative de la qualité du signal et une réduction des interférences, ce qui augmente la capacité du réseau et offre une meilleure expérience utilisateur. Ces systèmes peuvent et réduisent la pollution électromagnétique dans les directions non souhaitées.

Afin d'améliorer la qualité et la portée des communications sans fil, ainsi que la capacité du réseau à gérer simultanément de nombreux utilisateurs, des outils numériques de synthèse sont employés pour optimiser la transmission via les éléments d'antenne. Cette optimisation résulte en une nette amélioration de la réception du signal. Ces outils font usage de techniques de contrôle préétablies pour ajuster les diagrammes de rayonnement, permettant ainsi aux antennes intelligentes de satisfaire aux exigences spécifiques et d'offrir une expérience de communication globale améliorée.

Le travail présenté dans cette thèse est centré sur les aspects cruciaux du traitement des antennes, avec un intérêt particulier pour leur conception. Cette recherche examine les défis liés à la conception d'antennes et à leur optimisation, en mettant en lumière l'importance des réseaux d'antennes. Une partie significative de l'effort se concentre sur l'estimation précise de la

Introduction générale

direction d'arrivée des signaux, une compétence essentielle pour comprendre l'origine des signaux captés. De plus, la thèse se penche sur la formation de faisceaux, une technique permettant de diriger de manière sélective la puissance du signal dans des directions spécifiques. L'objectif ultime est d'optimiser le diagramme de rayonnement des antennes en améliorant ainsi la qualité du signal, en tenant compte des besoins variés des communications sans fil en afin de garantir des performances optimales dans divers contextes.

Cette thèse se divise en quatre chapitres qui se penchent en profondeur sur les étapes essentielles de la synthèse et de la conception d'un système intelligent adapté à la 5G. Ces chapitres se concentrent également sur la mise en place d'un nouveau système performant, reconfigurable, flexible peu coûteux et adaptable pour répondre aux exigences évolutives de la technologie 5G.

Le premier chapitre de cette thèse se penche sur la 5G, débutant par une mise en perspective des limitations des réseaux de télécommunications précédents face à l'explosion des objets connectés. Il introduit ensuite la 5G en tant que solution révolutionnaire, mettant en avant ses caractéristiques clés. Ce chapitre explore également les avancées technologiques sous-jacentes à la 5G et illustre les diverses méthodes et technologies pour offrir des performances améliorées par rapport à ses prédécesseurs jetant ainsi les bases pour une analyse approfondie des systèmes d'antennes intelligentes de la 5G dans les chapitres suivants.

Le deuxième chapitre de cette thèse se concentre sur une étude théorique des antennes intelligentes, en se penchant sur les concepts liés aux systèmes d'antennes intelligentes, les solutions disponibles actuellement, et les méthodologies de conception couramment utilisées. Il explore également l'état de l'art des antennes dans le contexte de la 5G. Une partie importante de ce chapitre est dédiée à l'examen des différentes techniques de synthèse du diagramme de rayonnement, indispensables pour les systèmes d'antennes intelligentes. Cette section présente les critères de sélection pour choisir efficacement une technique numérique de contrôle du diagramme de rayonnement, ainsi que les concepts fondamentaux, et les mises en œuvre de ces techniques. Dans la deuxième partie du deuxième chapitre de cette thèse, une étude de l'état de l'art des antennes conçues spécifiquement pour la 5G est entreprise. Cette analyse vise à examiner les dernières avancées et tendances dans le domaine des antennes pour la 5G. Parallèlement, une antenne réseau patch est développée et conçue pour la bande C.

Introduction générale

Le troisième chapitre de cette thèse revêt une importance capitale, étant donné qu'il se consacre à une analyse comparative des cartes SDR disponibles sur le marché, afin de sélectionner la plus adaptée à nos besoins. Dans ce contexte, des configurations d'antennes multiples, notamment SISO (Single-Input Single-Output), MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), MISO (Multiple-Input Single-Output) et SIMO (Single-Input Multiple-Output) sont conçues. En parallèle, la programmation sur mesure des cartes SDR sera au cœur de cette étape, garantissant ainsi que ces dispositifs répondent de manière optimale aux exigences de notre antenne intelligente pour la 5G.

Le quatrième chapitre de cette étude est structuré en deux parties distinctes. Dans la première section, une analyse détaillée des différentes méthodes de détection des angles d'arrivée sera entreprise, accompagnée d'une comparaison des résultats issus de la synthèse de ces angles. La seconde partie de ce chapitre introduira un prototype de système de formation de faisceaux numérique (DBF) composé de quatre éléments distincts. Ce système vise principalement à optimiser la qualité de la réception en dirigeant de manière sélective son attention vers les sources de signaux d'intérêt, tout en réduisant la réception de signaux indésirables ou perturbateurs. Pour valider l'efficacité de ce concept, une plateforme spécifique sera développée pour la mise en œuvre d'un tel système intelligent. Cette plateforme sera équipée d'un réseau d'antennes et d'une carte de commande basée sur le kit de développement ETTUS USRP B210.

1^{er} chapitre : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

1. Introduction

La demande croissante de ressources et l'augmentation du nombre de connexions ont généré une utilisation plus exigeante des services, qu'il s'agisse d'utilisateurs ou d'objets interagissant à travers diverses applications [1.1]. La 5G, la dernière génération de communications mobiles, se positionne pour relever ces défis tout en ouvrant de nouvelles perspectives. Elle promet des débits de données plus élevés, une latence réduite, une fiabilité accrue et une densité de connexions supérieure. En outre, elle ouvre la voie à de nouvelles applications telles que la réalité virtuelle et augmentée, les véhicules autonomes, les villes intelligentes et les dispositifs de santé connectée, tout en permettant la création et l'intégration de nouveaux réseaux. La première partie de ce chapitre examinera les objectifs de la 5G par rapport aux générations précédentes de réseaux mobiles, ainsi que les différentes bandes de fréquences associées. Dans la deuxième partie, nous aborderons l'importance cruciale des antennes dans les technologies sans fil et les exigences nécessaires pour garantir le bon fonctionnement d'un système de communication de cette envergure. Enfin, la dernière section se concentrera sur une étude approfondie des différents types d'antennes spécifiquement conçues pour la 5G, visant à répondre aux besoins élevés des utilisateurs.

2. Cahier des charges

Le développement d'un système d'antenne intelligent est essentiel pour répondre à la demande croissante en matière de communications cellulaires et de services à haut débit [1.1]. Ces systèmes offrent de nombreux avantages pour optimiser les réseaux de communication. Tout d'abord, ils augmentent la capacité globale du réseau en améliorant la qualité des communications et en réduisant les interférences [1.1]. Les antennes intelligentes peuvent ajuster dynamiquement la directivité, le gain et le diagramme de rayonnement pour optimiser la couverture et la qualité du signal, exploitant ainsi au mieux les ressources disponibles [1.2].

De plus, ces systèmes sont essentiels pour étendre la portée du réseau dans les zones géographiquement difficiles à desservir ou à faible densité de population, améliorant ainsi la couverture globale. En réduisant les interférences entre les cellules voisines, les antennes intelligentes contribuent également à une meilleure qualité des communications, notamment dans les zones densément peuplées. Enfin, ces systèmes sont indispensables pour répondre aux

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

exigences des services à haut débit, tels que la 5G, en fournissant les débits de données élevés nécessaires pour prendre en charge les applications gourmandes en bande passante [1.3].

Pour concevoir et implémenter des antennes intelligentes de manière efficace, il est important de suivre une approche détaillée en 5 étapes. Cette approche permet de garantir la faisabilité de la conception (le type d'antenne, le nombre d'éléments d'antenne, la disposition des éléments d'antenne et les techniques de traitement du signal) à l'aide d'outils de simulation électromagnétique avancés tels que CST Studio Suite, Ansys HFSS ou MATLAB. Les résultats de simulation doivent ensuite être validés par des mesures expérimentales à l'aide d'équipements de test appropriés tels que des analyseurs de réseau vectoriel (VNA) et cartes SDR (Software-Defined Radio) ou des cartes FPA (Field-Programmable Array) ou bien des microcontrôleurs et des transceivers afin de concevoir un système intelligent, numérique, reconfigurable, à faible coût, à faible latence et à faible taux de bruit (SNR), en temps réel et en plein duplex.

La conception d'une antenne intelligente pour une application de Digital Beamforming (DBF) requiert un ensemble précis de caractéristiques chiffrées pour assurer le bon fonctionnement du système. Parmi ces chiffres clés, nous visons une précision de formation du faisceau de moins de 5 degrés dans chaque direction angulaire, avec un nombre total d'au moins 4 éléments d'antenne pour atteindre cette précision.

La bande C, allant de 3,4 GHz à 3,8 GHz [1.4], représente une portion du spectre radioélectrique réservée pour les services mobiles à large bande. Dans cette plage de fréquence, l'antenne doit garantir une bande passante adéquate pour répondre aux exigences de la 5G, assurant ainsi la transmission efficace de données à haut débit.

La fréquence de fonctionnement s'étend sur une plage de 3,4 GHz à 3,6 GHz [1.5], tandis que la sensibilité de l'antenne est fixée à -100 dBm pour la détection de signaux faibles. Un gain d'au moins 6 dB est spécifié [1.5], soulignant l'importance d'une amplification suffisante pour maximiser la portée et l'efficacité du réseau, une bande passante de 100 MHz est nécessaire, avec une fréquence d'échantillonnage de 10 Msps [1.2] [1.5-1.-6]. Le système doit être capable de traiter les données en temps réel avec une latence maintenue en dessous de 5 millisecondes pour assurer un traitement rapide et en temps réel des données qui est un paramètre critique dans les communications 5G, doit être une consommation d'énergie totale inférieure à 100 watts. Le coût total du projet de conception d'antenne est limité à 4000 euros, un temps de calcul doit être suffisamment court pour permettre une opération en temps réel de l'ordre de quelques

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

millisecondes, une intégration transparente des antennes avec les circuits de traitement du signal numérique est essentielle et un système de synchronisation automatique avec une haute précision est également requis. Enfin, la conception doit être compatible avec les protocoles de communication standard de la bande C définis par l'UIT, avec la possibilité d'ajouter 16 éléments d'antenne supplémentaires pour une extension future. Ces chiffres définissent le cadre nécessaire pour concevoir une antenne intelligente DBF adaptée à une application exigeante et fourniront des directives précises pour le développement du projet.

3. Les défis de la 5G

3.1. L'évolution des communications mobiles

Quand on évoque les communications mobiles, on fait référence à la technologie globale, à la vitesse, à la fréquence et au système en utilisant des générations numériques telles que 3G, 4G ou 5G. Chaque génération est caractérisée par des technologies spécifiques qui lui sont propres. L'évolution des communications mobiles est représentée dans la Figure [1.7] et Tableau [1.7].

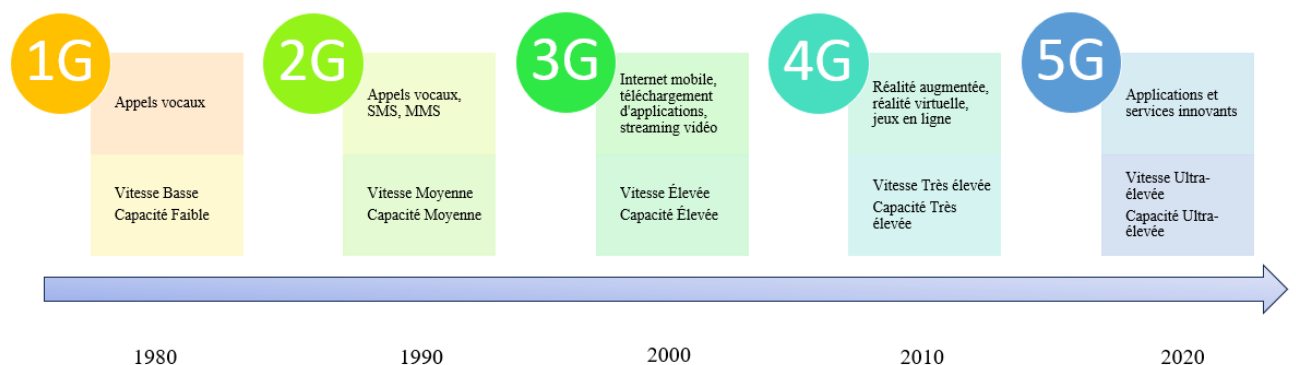


Figure 1. 1: L'évolution des communications mobiles.

La toute première génération d'un réseau cellulaire commercial a été introduite à la fin des années 70, avec des normes entièrement mises en place tout au long des années 80. Les signaux radio utilisés par la 1G étaient des signaux analogiques, ce qui signifie que la voix d'un appel était modulée à une fréquence plus élevée au lieu d'être encodée en signaux numériques. Les signaux analogiques se dégradent avec le temps et l'espace, ce qui signifie que la qualité de la voix manquait souvent au sein d'un appel. En comparaison, pour les communications numériques, une plus grande quantité de données pouvait être transportée efficacement.

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

La deuxième génération a vu l'introduction des technologies GSM (Global System for Mobile Communication) comme norme au début des années 90. Cela a permis l'envoi de voix et de données numériques à travers le réseau et a permis aux utilisateurs de se déplacer pour la première fois. Il a également utilisé la Confidentialité des Signaux et des Données et l'Authentification des Stations Mobiles pour assurer une meilleure sécurité et confidentialité des appels téléphoniques. L'avancée technologique de la 1G à la 2G a introduit de nombreux services fondamentaux encore utilisés aujourd'hui, tels que les SMS, l'itinérance internationale, les appels en conférence, la mise en attente des appels et la facturation basée sur les services, par exemple, les frais basés sur les appels longue distance et la facturation en temps réel.

Entre 2000 et 2003, une mise à niveau des technologies a introduit le réseau de paquets, qui permettait un transfert de données à haute vitesse et Internet, et est devenu connu sous le nom de 2.5G. Les normes comprenaient GPRS (General Packet Radio Service) et EDGE (Enhanced Data Rates in GSM). Le GPRS prenait en charge des taux de transmission de données flexibles et assurait une connexion continue avec le réseau. Il permettait également au fournisseur de services de facturer en fonction de la quantité de données envoyées, plutôt que de leur temps de connexion.

Initiée en 2010, la 4G est un système de réseau entièrement basé sur IP. Son objectif était de fournir une haute vitesse, une haute qualité et une grande capacité aux utilisateurs tout en améliorant la sécurité et en réduisant le coût des services vocaux et de données, du multimédia et de l'Internet sur IP. L'une des principaux avantages d'un réseau basé sur IP était sa capacité à basculer en douceur, pour la voix et les données, vers les technologies GSM, UMTS et CDMA2000 de l'infrastructure de génération précédente. La quatrième génération a introduit la norme LTE, qui ne prenait en charge que la commutation de paquets et un réseau entièrement basé sur IP. Il a fallu apporter un nombre important de modifications à l'infrastructure pour fournir des appels vocaux, car les appels vocaux en GSM, UMTS et CDMA étaient commutés en circuit. Cependant, LTE ne pouvait pas satisfaire aux spécifications, mais son successeur, LTE-Advanced, l'a fait. Les réseaux 4G utilisaient plus de 40 bandes de fréquences dans le monde et fournissaient une transmission de données maximale de 1 Gb/s en utilisant des techniques telles que le MIMO et l'agrégation de porteuses.

La cinquième génération (5G), qui est la génération actuelle de réseau cellulaire commercial, doit augmenter considérablement les vitesses de connexion Internet. Différentes estimations ont été faites pour la date d'introduction commerciale des réseaux 5G, mais elles se

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

situent généralement autour de l'année 2020. L'un des principaux avantages de la connectivité accrue, présenté comme le point de vente sous-jacent de la 5G, est l'IoT (Internet des objets), qui profiterait de la vitesse accrue de la connectivité pour permettre l'intégration transparente d'appareils à une échelle jamais atteinte auparavant. La 5G utilisera également des technologies de beamforming pour améliorer la gestion des signaux, ce qui permettra une couverture plus étendue et une meilleure qualité de service. Elle fonctionnera dans de nouvelles bandes de fréquences sub-6 GHz pour une opération massive MIMO (M-MIMO) ainsi que dans des bandes de fréquences millimétriques pour une augmentation du débit de données et de la capacité. La figure [1.2] illustre l'architecture proposée pour le réseau 5G.

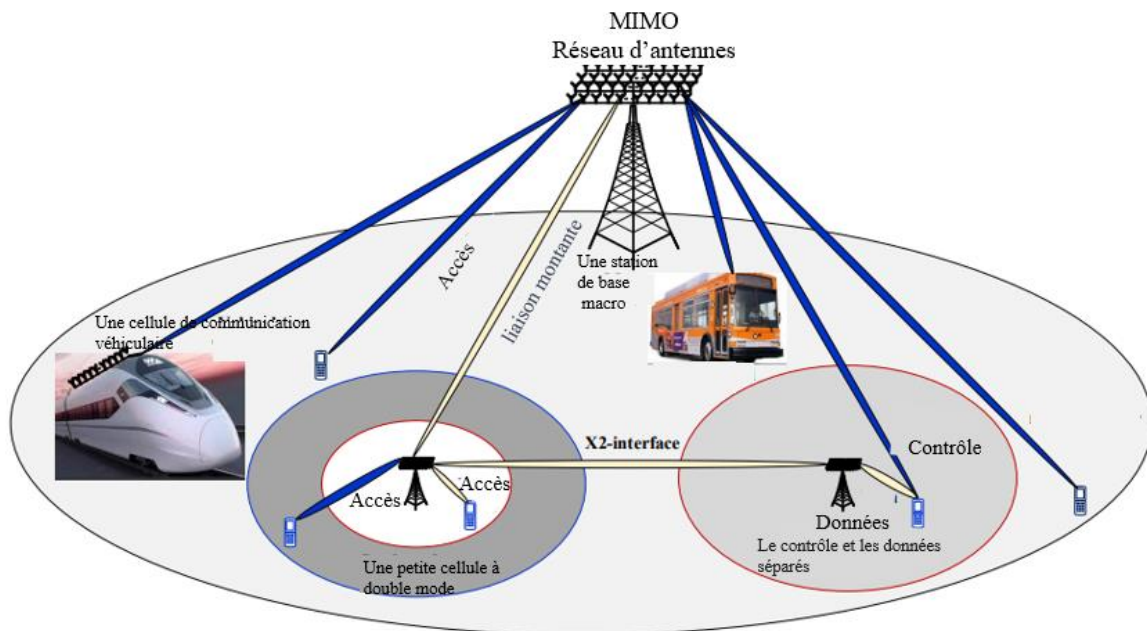


Figure 1. 2: L'architecture du réseau 5G.

Génération	Année de lancement	Technologie	Vitesse de téléchargement maximale	Vitesse de téléchargement réelle	Latence
1G	1980	Analogique	2,4 kbps	0,3 kbps	100 ms
2G	1990	Numérique	14,4 kbps	9,6 kbps	60 ms
2,5G	2000	Numérique	144 kbps	38 kbps	50 ms
3G	2001	Numérique	2 Mbps	300 kbps	40 ms

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

4G	2010	Numérique	1 Gbps	50 Mbps	10 ms
5G	2020	Numérique	10 Gbps	150 Mbps	1 ms

Tableau 1. 1: Tableau comparatif entre les différentes générations

3.2. La 5G

La 5G est au cœur des préoccupations dans un contexte où la demande en ressources et en services mobiles ne cesse de croître. Les générations précédentes de réseaux mobiles se sont principalement concentrées sur l'amélioration de la vitesse de transmission des données. Cependant, avec l'émergence de nouvelles applications, notamment la réalité virtuelle, seule la norme 5G est capable de répondre aux besoins croissants de connectivité entre les individus et les objets au sein d'un environnement intelligent. La technologie 5G apporte des avantages considérables, tels qu'une réduction de la consommation d'énergie, des débits plus élevés, une connectivité améliorée, une optimisation du travail à distance et une prolongation de la durée de vie des appareils. En effet, la 5G offre des débits jusqu'à 10 fois supérieurs à ceux de la 4G, ce qui permet des téléchargements, des éditions et des partages rapides de fichiers volumineux à partir de dispositifs mobiles. De plus, elle assure une transmission de données rapide et sans interruption grâce à une latence réduite (Figure 1.1). Tous ces avantages soulignent la nécessité de technologies de pointe pour répondre aux attentes des consommateurs tout en offrant des solutions rentables sur le plan de l'infrastructure [1.8].

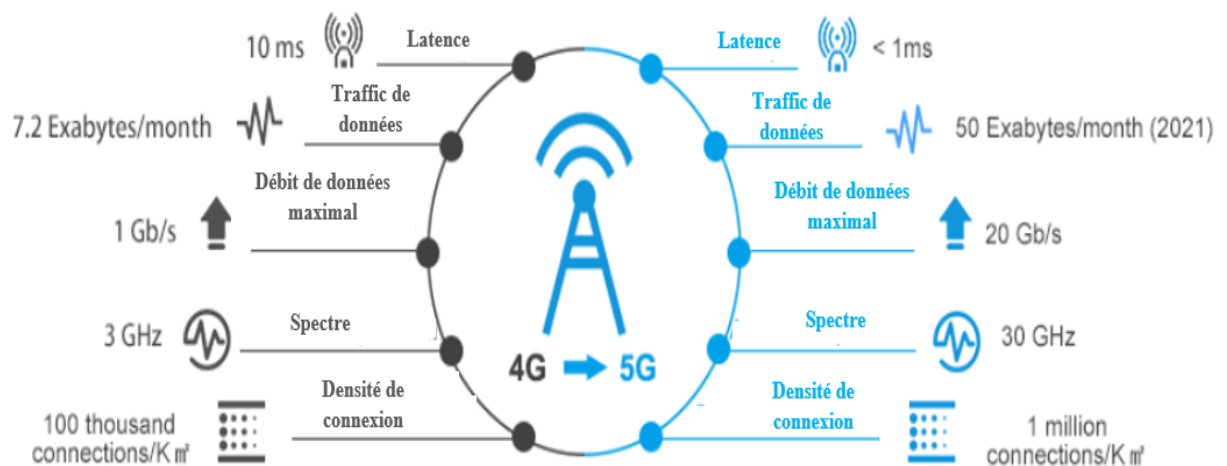


Figure 1. 3: Comparaison entre la 4G et la 5G.

3.3. Les solutions envisagées pour la 5G

L'Arcep perçoit la 5G comme une génération révolutionnaire qui transcende les limites des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles opportunités. Elle offre la capacité d'accueillir une multitude d'applications et d'utilisations variées, toutes convergentes au sein d'une même technologie.

En effet, la 5G se présente comme un moteur clé de la transformation numérique de la société et de l'économie. Elle vise à réaliser une avancée significative en termes de vitesse de transmission des données (en augmentant le débit jusqu'à 1000 fois plus rapide), de réduction des délais de transmission (en les réduisant à 1/45ème), et d'amélioration de la fiabilité des communications [1.9].

3.3.1. Les fréquences utilisées

Le choix de la bande de fréquence pour les réseaux mobiles est un compromis entre la couverture et la capacité. Les fréquences basses sont favorisées pour étendre la couverture, car elles bénéficient de meilleures propriétés de propagation. En revanche, les fréquences élevées sont privilégiées pour augmenter la capacité, grâce à leur largeur de bande généreuse qui permet de gérer des volumes de trafic plus importants. Cependant, il est important de noter que les fréquences élevées présentent des défis en matière de propagation, notamment en milieu clos où les signaux sont fortement affaiblis par les obstacles, ce qui limite la portée. Par conséquent, le choix de la plage de fréquences doit être soigneusement pesé en fonction des besoins particuliers de chaque service et des niveaux de qualité de service visés [1.10].

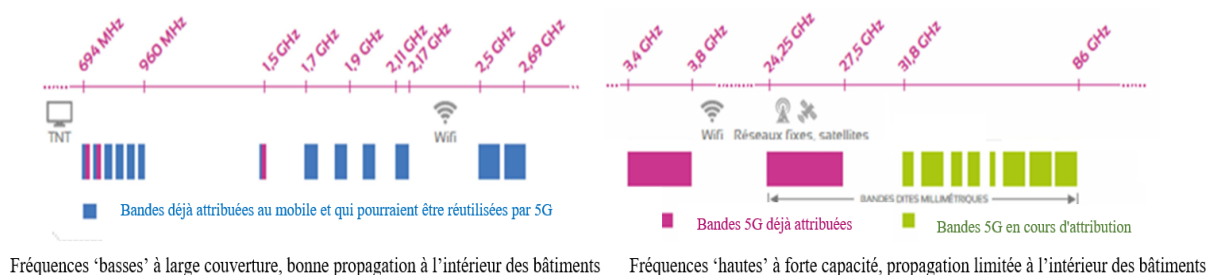


Figure 1. 4 : Les bandes de fréquence 5G identifiées // Source : ANFR

La plage de fréquences située entre 3,4 GHz et 3,8 GHz, couramment désignée comme la bande des 3,5 GHz, est généralement considérée comme la principale plage de fréquences pour la 5G. Elle présente un équilibre optimal entre la couverture et la capacité, offrant ainsi de nombreux avantages. Cette bande offre un compromis judicieux entre la distance que peuvent parcourir les signaux et les débits élevés, tout en disposant d'une largeur de bande suffisante

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

pour prendre en charge des capacités élevées. De plus, cette plage de fréquences est caractérisée par une disponibilité étendue du spectre, ce qui en fait un choix privilégié pour le déploiement des réseaux mobiles 5G. Il est important de noter que, bien que la bande des 3,5 GHz soit largement utilisée pour la 5G, d'autres bandes de fréquences sont également exploitées, notamment les bandes millimétriques, qui offrent des débits encore plus élevés, une capacité de données accrue, bien que leur portée soit limitée. Le choix de la bande de fréquences dépend des objectifs spécifiques de couverture et de capacité de chaque opérateur, ainsi que des contraintes techniques et réglementaires propres à chaque pays. En ce qui concerne la plage de fréquences de 3,5 GHz, elle offre une portée moyenne d'environ 400 mètres en milieu urbain et d'environ 1,2 kilomètres en zone rurale. Cette portée peut varier en fonction des conditions géographiques et des spécificités du déploiement [1.11]. Le tableau [1.8] récapitule différentes bandes de fréquences utilisées dans les communications mobiles, en décrivant leurs caractéristiques telles que la pénétration, la portée, le débit, l'attribution aux opérateurs, et la sensibilité au beamforming.

Fréquence	Pénétration à l'intérieur	Portée	Débit	Attribution aux opérateurs	Sensibilité au Beamforming
700 MHz	Excellente	Excellente	Modéré	Déjà attribuée depuis 2015	Faible
2.1 GHz	Intermédiaire	Appréciable	Satisfaisant	Attribuée à tous les opérateurs mobiles	Modérée
3.5 GHz	Bonne	Moyenne	Elevé	Attribuée à tous les opérateurs mobiles	Élevée
Bandes de fréquences millimétriques 24GHZ 26GHZ				Attribuée à tous les opérateurs mobiles	
47 GHz et 60 GHz	Limitée	Courte	Très élevé	N'a pas encore été attribuée.	

Tableau 1. 2 : Tableau comparatif

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

3.3.2. Modulation

La première génération (1G) des réseaux mobiles était basée sur un système analogique avec une technique de multiplexage fréquentiel (FDMA). Son utilisation était principalement axée sur les services vocaux publics, avec une capacité limitée en termes d'abonnés et de trafic. La deuxième génération (2G) a introduit une technologie entièrement numérique, combinant le multiplexage fréquentiel (FDMA) et le découpage temporel des canaux (TDMA), offrant ainsi une amélioration de la vitesse autour de 64 Kbps. En plus des services de la 1G, la 2G a également permis la prise en charge de la messagerie texte. La troisième génération (3G) a introduit la technologie de commutation de paquets, offrant des débits allant jusqu'à 2 Mbps. La quatrième génération (4G), quant à elle, a introduit les technologies OFDM (Multiplexage par répartition orthogonale de fréquence), un procédé de codage de signaux numériques utilisant des sous-porteuses orthogonales, et CDMA (Accès multiple par répartition de code), un système de codage de transmissions utilisant la technique d'étalement de spectre, permettant ainsi d'atteindre des débits allant jusqu'à 100 Mbps.

La 5G, quant à elle, utilise également l'OFDMA comme la 4G, mais avec une plus grande flexibilité et une plus grande souplesse dans le découpage en temps et en fréquence, afin de répondre aux besoins variés des utilisateurs [1.5] Avec la demande croissante de données pour les smartphones, l'émergence de nouvelles applications et surtout l'introduction de la réalité virtuelle, seul le nouveau standard 5G peut répondre à ce type de connectivité entre les individus et les objets dans un environnement intelligent et connecté.

3.3.3. Duplexage

Le duplexage est le mode de transmission utilisé pour acheminer les données à la fois du côté de l'antenne relais vers l'utilisateur (sens descendant ou downlink) et du côté de l'utilisateur vers l'antenne relais (sens montant ou uplink). Dans les réseaux de téléphonie mobile 2G, 3G et 4G, le duplexage fréquentiel (FDD - Frequency Division Duplexing) est utilisé, ce qui signifie qu'il existe une séparation des bandes de fréquences pour les transmissions en sens descendant et en sens montant. Ainsi, des blocs de fréquences sont spécifiquement alloués pour les transmissions downlink et d'autres blocs pour les transmissions uplink. Dans le contexte de la 5G, qui utilise déjà des bandes de fréquences attribuées à la téléphonie mobile, le duplexage FDD continuera d'être utilisé, permettant une séparation en fréquences des transmissions [1.12].

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

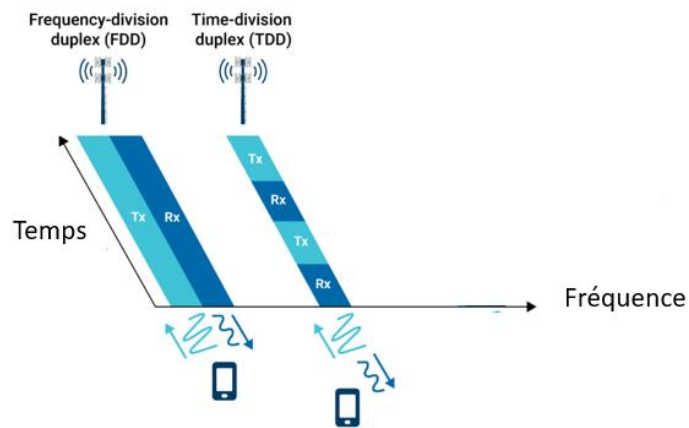


Figure 1. 5 : Mode de duplexage.

3.4. Différentes exigences de la 5G

Dans le cadre du déploiement de la 5G visant à établir un réseau ultra-connecté, les opérateurs s'efforcent de fusionner des technologies existantes avec des innovations pour offrir une couverture et une disponibilité inégalées. Lors de la définition des spécifications de la 5G, diverses capacités ont été identifiées, comme illustré dans la figure basée sur l'UIT-R M.2083-0. La figure ci-dessous synthétise une analyse comparative entre les exigences de la 5G et celles de la 4G, mettant en lumière les distinctions entre ces deux générations de réseaux.

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

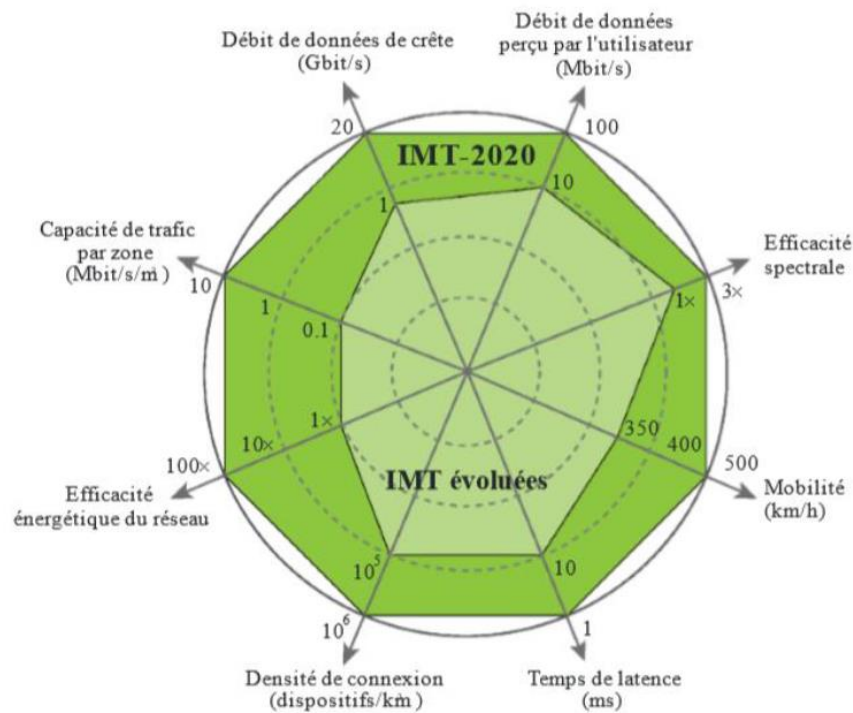


Figure 1. 6 : Comparaison entre 4G et 5G.

3.4.1. Débits ultra-élevés

Les débits ultra-élevés sont des débits de données qui dépassent largement les débits actuels des réseaux mobiles. Le standard IMT-2020, qui définit les spécifications techniques de la 5G, fixe un débit maximal de 10 Gbit/s pour le haut débit mobile amélioré (eMBB). Cependant, il est possible d'atteindre des débits supérieurs dans certaines situations, comme par exemple dans des environnements avec une faible densité d'utilisateurs et une utilisation optimale des fréquences [1.13].

3.4.2. Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique se réfère à la quantité d'informations transmises par unité d'énergie consommée, mesurée en bit/joule. Une plus grande efficacité énergétique signifie que le réseau peut fournir les mêmes services tout en consommant moins d'énergie. Cela peut avoir un impact positif sur l'environnement, car cela réduit les émissions de gaz à effet de serre.

La 5G devrait considérablement améliorer l'efficacité énergétique par rapport à la 4G. Cela est dû à plusieurs facteurs, notamment :

- L'utilisation de bandes de fréquences plus élevées, qui permettent de transmettre plus de données avec moins d'énergie.

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

- L'introduction de nouvelles technologies, telles que beamforming et le MIMO, qui permettent d'améliorer l'efficacité énergétique des réseaux 5G.
- L'utilisation de techniques de veille et de commutation de puissance, qui permettent de réduire la consommation d'énergie lorsque les appareils ne sont pas utilisés.

En améliorant l'efficacité énergétique par rapport à la 4G, les technologies de communication sans fil de nouvelle génération, telles que la 5G, ont le potentiel d'augmenter significativement la durée de vie des batteries des objets connectés (pouvant être jusqu'à 100 fois moins énergivores) et d'offrir une meilleure. Des efforts considérables sont déployés pour optimiser l'efficacité énergétique sans compromettre les performances du réseau et des dispositifs. En effet, selon l'opérateur Huawei et le directeur du domaine de recherche connectivité ambiante d'Orange, la 5G se distingue par sa plus grande efficacité, ce qui signifie qu'elle consomme moins d'énergie pour traiter un volume équivalent de données. Concrètement, grâce à ce nouveau réseau mobile, il sera possible de faire transiter quatre fois plus de données sans que la consommation d'énergie ne soit accrue [1.14].

3.4.3. Capacité de trafic par zone

La capacité de trafic par zone désigne le débit total de trafic desservi dans une zone géographique donnée, exprimé en Mbit/s/m². Les zones urbaines et les endroits très fréquentés tels que les concerts et les stades sont des candidats privilégiés pour une densification du réseau en raison de la concentration élevée d'utilisateurs. Par exemple, la densité d'utilisateurs dans un stade peut atteindre 2 millions/km², soit deux utilisateurs par mètre carré. Même si seulement 10 % des utilisateurs sont actifs, le réseau doit pouvoir prendre en charge 200 000 utilisateurs actifs/km². Pour répondre à cette demande de trafic de manière économiquement viable, la 5G doit fournir des solutions permettant une augmentation de capacité allant de 1 000 à 10 000 fois dans les zones à forte demande. Cette exigence est considérée comme l'une des plus importantes et des plus difficiles à satisfaire pour les réseaux futurs [1.7].

3.4.4. Efficacité spectrale

L'efficacité spectrale est une mesure de la capacité d'un système de communication à transmettre des données sur une bande de fréquence donnée. Elle est définie comme le rapport entre le débit binaire (en bit/s) et la bande passante (en Hz).

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

La 5G a une efficacité spectrale supérieure à la 4G, ce qui lui permet de fournir des débits plus élevés sur une bande de fréquence donnée. Cette amélioration est due à plusieurs facteurs, notamment :

- L'utilisation de la modulation 256-QAM, qui permet de transmettre plus de données sur un symbole radio.
- L'utilisation de la bande passante dynamique, qui permet d'adapter la bande passante utilisée à la demande de chaque utilisateur.
- L'utilisation de la densification des antennes, qui permet de mieux répartir la puissance radio et de réduire les interférences.

Selon le rapport de l'UIT-R sur l'état du spectre radio mondial en 2022, l'efficacité spectrale moyenne de la 5G est d'environ 10 bit/s/Hz, contre 5 bit/s/Hz pour la 4G.

Cette amélioration de l'efficacité spectrale est importante pour plusieurs raisons. Elle permet d'augmenter la capacité des réseaux mobiles, ce qui est nécessaire pour répondre à la demande croissante de données. Elle permet également de réduire l'utilisation du spectre radio, ce qui est important pour préserver une ressource rare.

Voici quelques exemples de l'impact de l'efficacité spectrale de la 5G :

- Les réseaux 5G peuvent fournir des débits de téléchargement allant jusqu'à 10 Gbit/s, ce qui est suffisant pour la diffusion de vidéos en 8K et pour le téléchargement de gros fichiers en quelques secondes.
- La 5G peut supporter un nombre plus élevé d'appareils connectés simultanément, ce qui est nécessaire pour l'Internet des objets (IoT).
- La 5G peut réduire la latence, ce qui est important pour les applications en temps réel telles que la réalité augmentée et la réalité virtuelle.

Bien que l'efficacité spectrale soit un facteur clé de la performance d'un réseau mobile, ce n'est pas le seul élément à prendre en compte. La couverture, la latence et la qualité de service (QoS) sont également importants. Cependant, l'efficacité spectrale est un facteur important pour l'avenir des réseaux mobiles.

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

3.4.5. Mobilité

La mobilité est l'exigence la plus importante et l'une des plus difficiles pour les futurs réseaux. Pour la 5G, il est indispensable de maintenir un très bon niveau de qualité de service dans le contexte d'une mobilité à grande vitesse. Cela est particulièrement important pour le développement des voitures autonomes.

La 5G prend en charge quatre classes de mobilité, définies en fonction de la vitesse maximale à laquelle un utilisateur peut se déplacer tout en conservant une connexion stable.

Les classes de mobilité sont les suivantes :

- Stationnaire : 0 km/h
- Piéton : 0 km/h à 10 km/h
- Véhicule : 10 km/h à 120 km/h
- Véhicule à grande vitesse : de 120 km/h à 500 km/h

La classe 1 est la plus facile à prendre en charge, car les utilisateurs se déplacent lentement et la propagation du signal est relativement stable. Les classes 2 et 3 sont plus difficiles à prendre en charge, car les utilisateurs se déplacent plus rapidement et la propagation du signal est plus volatile. La classe 4 est la plus difficile à prendre en charge, car les utilisateurs se déplacent à des vitesses très élevées et la propagation du signal est très volatile.

La 5G utilise plusieurs technologies pour améliorer la mobilité, notamment le beamforming, le MIMO et la bande passante étendue.

3.4.6. Densité de connexion

La densité de connexion est le nombre de dispositifs connectés et/ou accessibles par unité de surface (par km²). L'IMT-2020, qui définit les spécifications techniques de la 5G, devrait permettre une densité de connexion allant jusqu'à 106/km², par exemple dans les scénarios de communication massive de type machine (mMTC).

La 5G est conçue pour prendre en charge une densité de connexion beaucoup plus élevée que les générations précédentes de réseaux mobiles. Cela est nécessaire pour répondre à la demande croissante de connexions à partir d'appareils connectés, tels que les smartphones, les tablettes, les ordinateurs portables, les voitures autonomes, les capteurs IoT, etc.

La 5G utilise plusieurs technologies pour améliorer la densité de connexion, notamment des améliorations dans les technologies de modulation et de codage, l'utilisation de fréquences plus

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

élevées, le déploiement de petites cellules, la mise en œuvre de techniques de formation de faisceaux (beamforming) pour concentrer la puissance du signal, et l'optimisation des protocoles de communication [1.14].

3.4.7. Débit moyen par utilisateur

Le débit moyen par utilisateur représente le débit de données moyen qu'un utilisateur peut atteindre. C'est-à-dire le nombre de bits correctement reçus par les utilisateurs. Il est important pour les applications qui nécessitent un transfert de données rapide, telles que le streaming vidéo, les jeux en ligne et la réalité virtuelle.

L'IMT-2020, qui définit les spécifications techniques de la 5G, en fonction des zones géographiques, vise à fournir un débit moyen par utilisateur de 100 Mbps dans les environnements urbains et suburbains, et un débit d'au moins 10 Mbps partout.

Pour répondre à ces exigences, différentes technologies ont été développées, notamment des améliorations dans les technologies de modulation et de codage, l'utilisation de fréquences plus élevées, le déploiement de petites cellules, la mise en œuvre de techniques de formation de faisceaux (beamforming) pour concentrer la puissance du signal, et l'optimisation des protocoles de communication.[1.15]

3.4.8. La latence

La latence se réfère au temps de propagation du réseau radio entre l'envoi d'un paquet de données par la source et sa réception par la destination. Elle est exprimée en millisecondes (ms). Une faible latence est importante pour les applications qui nécessitent une réponse en temps réel, telles que la télémédecine, la conduite autonome et la réalité augmentée [1.16].

L'IMT-2020, qui définit les spécifications techniques de la 5G, vise à fournir une latence de 1 ms via les voies hertziennes (OTA).

Pour répondre à cette exigence, différentes technologies ont été développées, notamment :

- Le Full Duplex : Le Full Duplex permet aux stations de base d'émettre et de recevoir des données en même temps, ce qui double la capacité du réseau.
- Le Massive MIMO : Le Massive MIMO utilise de nombreuses antennes pour transmettre et recevoir des données, ce qui permet d'améliorer la qualité du signal et de réduire la latence.

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

- Les Small Cells : Les Small Cells sont de petites stations de base qui sont installées à proximité des utilisateurs, ce qui permet d'améliorer la couverture et la capacité du réseau.

4. La 5G, les solutions qui font la différence

Pour satisfaire aux exigences mentionnées précédemment, des nouvelles technologies ont été identifiées comme ayant le potentiel de contribuer de manière significative à leur réalisation. Ceci est bien présenté dans la figure 1.5.

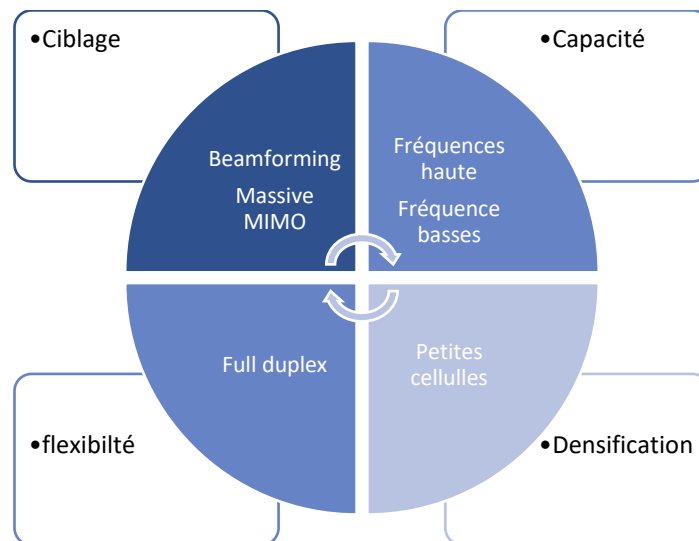


Figure 1. 7 : Solutions envisagées pour les réseaux 5G.

4.1. Massive MIMO

Le concept MIMO (Multiple Input Multiple Output) en tant que technique visant à augmenter la capacité des systèmes sans fil a été exploré pour la première fois dans les années 1990 [1.17-1.18]. Depuis lors, il a fait l'objet de recherches à l'échelle mondiale [1.20-1.21]. En effet, la technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) attire l'attention des chercheurs en raison de sa capacité à offrir une fiabilité de liaison améliorée, améliorer à la fois l'efficacité spectrale et l'efficacité énergétique [1.21-1.122], et une capacité de système accrue sans nécessiter de ressources spectrales supplémentaires [1.21-1.23].

La figure [1.24] présente un schéma illustratif d'un système MIMO générique. Contrairement à un système conventionnel à antenne unique, un système MIMO comporte plusieurs antennes émettrices (M) et plusieurs antennes réceptrices (N). Chaque antenne

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

réceptrice peut recevoir des signaux de toutes les antennes émettrices, créant ainsi $M \times N$ voies de transmission de signaux.

Un système MIMO n'est pas la première utilisation d'antennes multiples dans les communications sans fil. Au départ, des antennes multiples (par exemple, un réseau d'antennes) étaient utilisées pour améliorer le rapport signal/bruit du système grâce à la formation de faisceaux, en concentrant l'énergie de rayonnement des antennes dans une direction spécifique. Par la suite, les antennes multiples ont été utilisées pour fournir une diversité spatiale, permettant de contrer les effets de la propagation multi-trajet. En ayant plusieurs antennes réceptrices espacées les unes des autres, les signaux provenant de différentes trajectoires de propagation pouvaient être reçus indépendamment par les multiples antennes, puis ajoutés de manière constructive. Étant donné que la probabilité que toutes les trajectoires de signal subissent une forte atténuation multi-trajet est beaucoup plus faible, le taux d'erreur binaire (BER) du système est significativement réduit de cette manière. Cependant, la diversité spatiale provenant de plusieurs antennes présente des avantages limités. Ce qui rend les systèmes à antennes multiples puissants et attrayants, c'est le multiplexage spatial supplémentaire qu'ils offrent. Avec de multiples voies de propagation de signal indépendantes entre les multiples antennes émettrices et réceptrices, plusieurs flux de données indépendants peuvent être transmis via ces voies indépendantes. Prenons l'exemple de la figure ci-dessous. En supposant qu'il n'y ait aucune corrélation entre le signal et le bruit des deux côtés, émetteur et récepteur, la capacité du système MIMO augmente linéairement par rapport au nombre minimal d'antennes émettrices/réceptrices ($\min \{M, N\}$) [1.17-1.18], sans coût supplémentaire en termes de puissance ou de ressources spectrales. En raison de cet avantage significatif en termes d'efficacité spectrale par rapport aux systèmes conventionnels à antenne unique, le MIMO est devenu un élément essentiel dans de nombreuses normes de communication sans fil, telles que la 4G LTE, WiMAX et la 5G.

La 5G est une technologie complexe qui nécessite l'utilisation de différentes technologies pour répondre à ses objectifs ambitieux. Le Massive MIMO est l'une de ces technologies, et il est considéré comme une solution prometteuse pour la prochaine génération de réseaux mobiles.

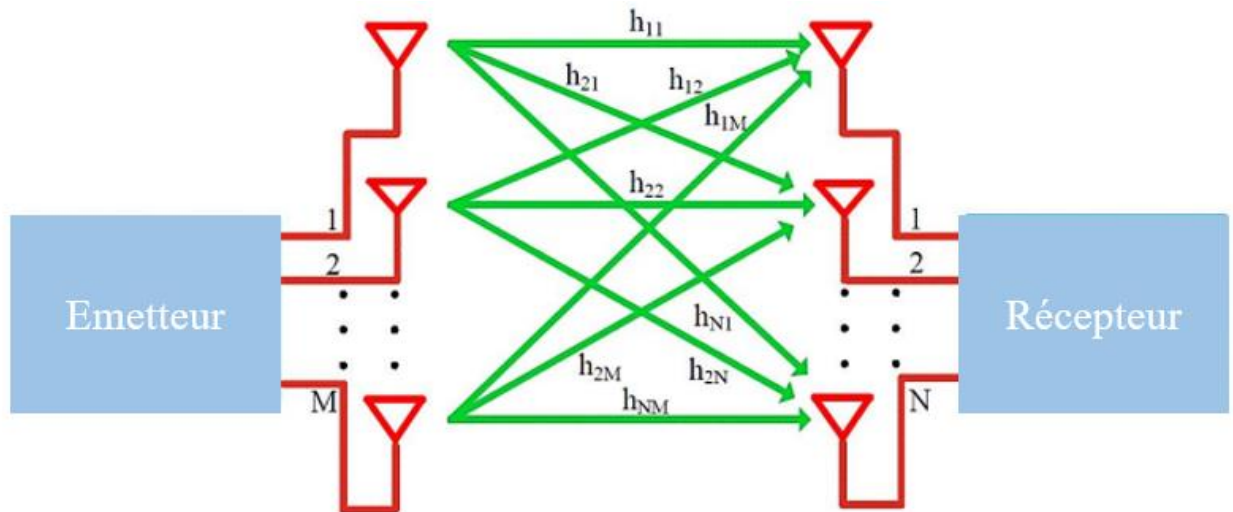


Figure 1. 8 : Système MIMO.

Le Massive MIMO utilise un grand nombre d'antennes (généralement 100 à 1000) pour transmettre et recevoir des données. Cela permet d'améliorer la qualité du signal, de réduire la latence et d'augmenter la capacité du réseau.

Le Massive MIMO présente cependant certains défis, notamment :

- La complexité et les coûts de déploiement
- La consommation d'énergie accrue
- La sensibilité aux interférences

4.2. Full Duplex-

La définition des capacités 5G implique actuellement la transmission sans fil en duplex intégral (full duplex), et des résultats de recherche récents ont démontré sa faisabilité technique [1.21-1.24]. La ressource sans fil dans les systèmes de communication sans fil actuels est généralement partagée et limitée. Le principe de Half-duplex, également appelé demi-duplex, est utilisé par les systèmes de communication sans fil pour continuer à partager des ressources dans le domaine du temps ou de la fréquence [1.28]. Cela signifie que les signaux sont envoyés et reçus à des intervalles de temps ou sur des bandes de fréquences différentes. De plus, il est impossible pour un émetteur et un récepteur de transmettre et de recevoir simultanément des signaux à la même fréquence. Par exemple, pour faciliter la communication entre la station de base et les utilisateurs, LTE utilise des canaux de liaison montante et descendante distincts de la même largeur. Cela limite considérablement la capacité des réseaux cellulaires par rapport à la technologie duplex intégral. La transmission et la réception simultanées sur la même bande

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

de fréquence sont possibles grâce à cette technologie, ce qui, par rapport aux systèmes demi-duplex traditionnels, permet de doubler le débit du système [1.25]. Comme indiqué dans la figure ci-dessous, des systèmes utilisant le même nombre d'antennes ont montré que les systèmes en duplex intégral (FD) offrent un débit supérieur aux systèmes en demi-duplex (HD).

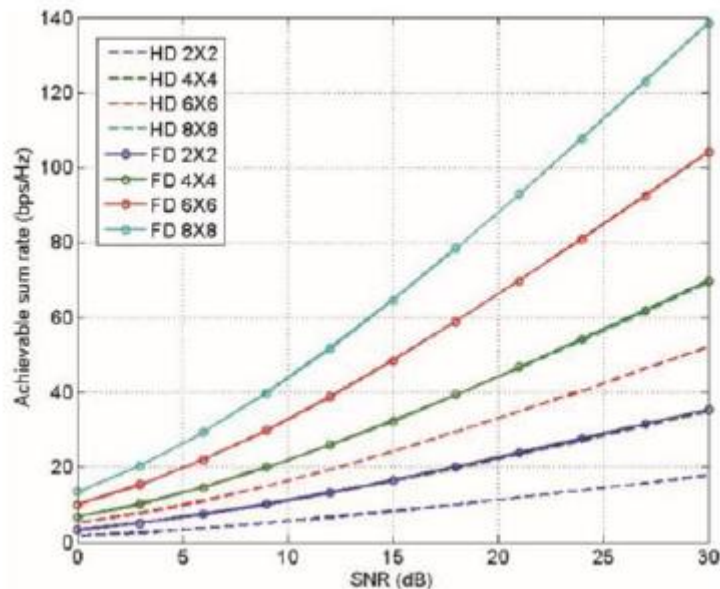


Figure 4.1: Comparaison entre le Half duplex et le Full duplex

4.3. Small cells

La "small cell" de cinquième génération (5G) est prête à ouvrir une ère d'innovation à grande échelle, garantissant une pénétration de signal nettement améliorée et une couverture supérieure. Les petites cellules sont des points d'accès à courte portée et à faible puissance de transmission à un réseau de télécommunications mobiles. Cette technologie pour les réseaux 4G et 5G repose sur l'installation d'un grand nombre de stations de base couvrant de petites zones géographiques et des espaces intérieurs, comme les gares et les centres commerciaux. La norme 5G doit assurer une couverture haut débit à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.

La communauté scientifique a cherché de nouvelles solutions en réponse à cette exigence de gestion de la couverture et de qualité de service. Actuellement, l'approche préférée est l'approximation du réseau, qui consiste à rapprocher les points d'accès du réseau des utilisateurs. La capacité par utilisateur est réduite dans les macrocellules avec un grand nombre d'utilisateurs. La résolution de ce problème implique la création de petites cellules à l'intérieur de ces macrocellules, où les équipements de communication radio 5G seront déployés. Ces cellules sont appelées « petites cellules ».

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

Pour répondre aux exigences de la 5G, l'utilisation de ces petites cellules doit être associée à d'autres techniques avancées, notamment la coexistence de différents types de cellules, la densification du réseau et l'amélioration de l'infrastructure de transmission (backhaul). De plus, l'utilisation des bandes millimétriques dans ces petites cellules jouera un rôle crucial pour fournir des services à haut débit pour la prochaine génération de réseaux sans fil [1.26].

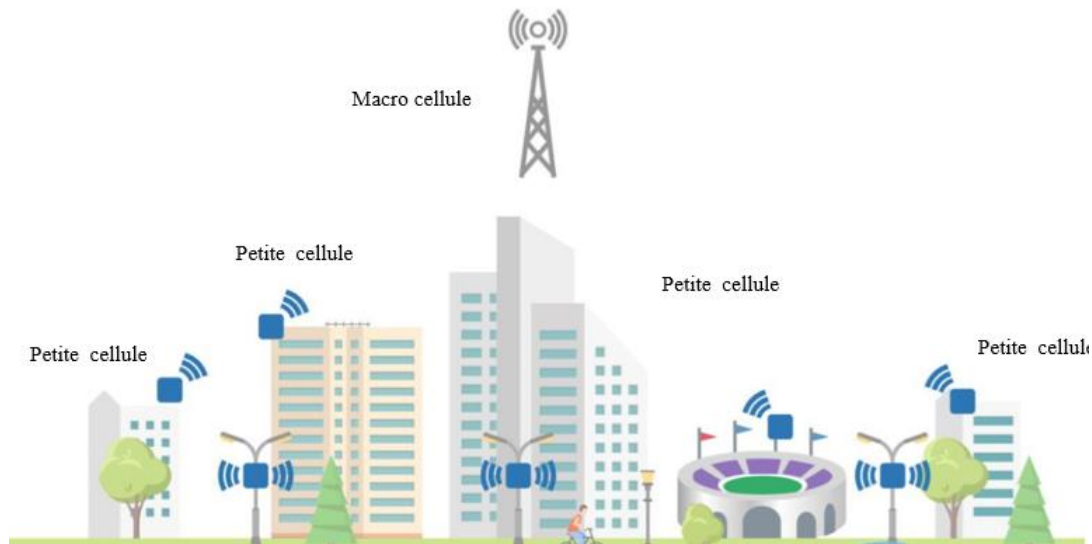


Figure 1. 9 : small cells.

4.4. Beamforming

Les antennes intelligentes, capables de s'adapter aux conditions changeantes de leur environnement et de leur contexte d'utilisation afin d'optimiser leurs performances, seront nécessaires à l'avenir pour la prolifération des systèmes sans fil. La création d'antennes reconfigurables qui peuvent modifier leur diagramme de rayonnement en fonction des besoins est un moyen de résoudre ce problème. En améliorant les débits de transmission, l'autonomie et en réduisant les interférences avec d'autres utilisateurs, les diagrammes de rayonnement diversifiés permettent d'optimiser les performances de liaison. Quelques-uns des facteurs qui affectent la performance de ces antennes incluent l'espacement entre les antennes formant le réseau, la méthode de traitement du signal utilisée, la corrélation des données et les interférences omniprésentes dans les environnements à large bande. La technologie de formation de faisceau, qui consiste à ajuster la transmission des ondes électromagnétiques à un environnement spécifique, résout ces problèmes. La formation de faisceau utilise des algorithmes de traitement du signal pour fournir un signal clair et sans interférence en concentrant précisément le faisceau vers là où les cibles souhaitées, contrairement aux antennes traditionnelles qui diffusent le rayonnement dans toutes les directions. Les technologies actuelles ne sont pas aussi efficaces

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

que cette technologie [1.29]. La formation de faisceau (beamforming) est essentielle pour filtrer l'environnement, se concentrer sur les cibles spécifiques et atténuer les signaux d'interférence provenant du milieu environnant. Les capacités de formation de faisceau, de multifaisceaux, de gain élevé, ainsi que la polyvalence et la reconfigurabilité des antennes sont des aspects importants pour les systèmes 5G modernes. Ces caractéristiques permettent de surmonter les problèmes de propagation rencontrés à des fréquences plus élevées. Ainsi, des systèmes de communication polyvalents et dynamiques sont nécessaires pour s'adapter en permanence aux applications, maximisant ainsi la qualité de la communication. Les antennes adaptatives, dotées d'une capacité de traitement du signal supplémentaire, utilisent de nouvelles architectures numériques pour ajuster dynamiquement le diagramme de rayonnement du réseau en temps réel. Ces systèmes sont capables de percevoir le signal reçu et d'optimiser leur diagramme de rayonnement en modifiant la forme et la direction du faisceau. Ils suppriment les interférences en introduisant des zéros dans les directions des signaux indésirables, modifient le niveau des lobes secondaires, compensent les imperfections matérielles et prennent en compte les effets de couplage mutuel qui peuvent altérer l'amplitude et la phase des signaux transmis [1.30].

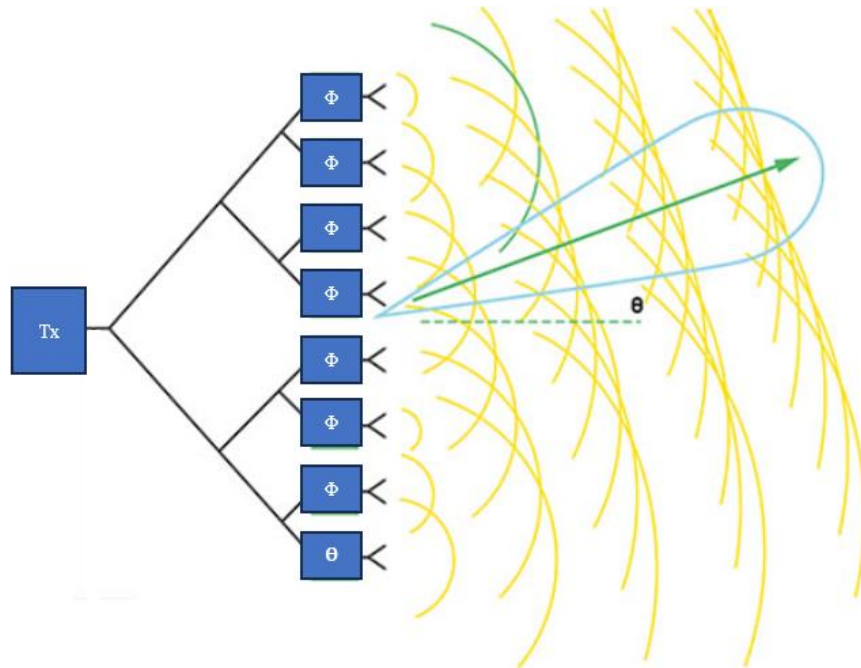


Figure 1. 10: Formation de faisceau.

5. Objectif

Dans cette thèse, l'objectif principal réside dans la conception d'antennes microstrip à polarisation circulaire, présentant un angle d'ouverture étroit et un gain élevé. Ces antennes sont spécialement conçues pour répondre aux exigences fondamentales des systèmes de

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

communication sans fil modernes. Parmi ces exigences figurent la capacité à prendre en charge des configurations MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), le fonctionnement en full-duplex, la mise en œuvre du beamforming.

L'antenne développée est conçue pour opérer dans la bande de fréquence C et est destinée à être utilisée dans deux contextes principaux. Tout d'abord, elle est destinée à être intégrée dans une plateforme connue sous le nom de "système intelligent". De plus, elle est conçue pour être mise en œuvre dans la construction d'une small cell 5G dotée de capacités de formation de faisceaux pour une transmission directionnelle efficace.

Le système doit exercer un contrôle numérique sur les signaux acheminés vers les antennes, permettant ainsi d'effectuer la formation de faisceau. En exploitant les technologies de radio logicielle (SDR), ce système offre la capacité de manipuler électroniquement et numériquement le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes, dans le but d'optimiser des performances telles que la capacité de transmission et l'efficacité globale. De plus, il présente la flexibilité de modifier la fréquence de l'oscillateur local (LO) avec une complexité réduite, facilitant ainsi le prototypage rapide et la mise en place de communications en mode full-duplex.

Ce système intelligent doit intégrer un bloc de détection de direction d'arrivée (DOA) en garantissant une précision de détermination de la direction d'arrivée des signaux ne dépassant pas 5 degrés. Cette précision de ± 5 degrés est essentielle pour optimiser la formation de faisceau, minimiser les interférences et améliorer la résolution spatiale. Grâce au DOA, le système peut diriger précisément les signaux vers leur destination tout en réduisant les perturbations indésirables. De plus, cette détection de haute précision permet au système de s'adapter aux variations du canal et d'assurer une communication fiable, répondant ainsi aux exigences des systèmes de communication sans fil modernes.

L'objectif principal de cette thèse était d'introduire un système de formation de faisceau reconfigurable, programmable en temps réel, et économique, basé sur des antennes intelligentes, en vue de répondre aux exigences du standard 5G. La recherche se concentrait principalement sur la conception, l'optimisation et la caractérisation d'un système d'antennes intelligentes visant à améliorer la qualité de la réception des signaux. En exploitant le beamforming, cette technologie permet de concentrer l'énergie du signal reçu dans une direction spécifique, augmentant ainsi la sensibilité du récepteur dans cette direction et facilitant la détection de signaux faibles ou perturbés. De plus, le beamforming réduit les interférences provenant d'autres directions, améliorant ainsi la qualité globale de la communication en

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

minimisant les signaux indésirables. En réception, le beamforming est utilisé pour augmenter la portée de la communication, suivre des sources mobiles, réduire le bruit, et même augmenter la capacité de transmission. Dans l'ensemble, il représente un outil puissant pour améliorer les performances des systèmes de communication sans fil 5G.

Plus précisément, l'objectif fondamental de notre thèse est de concevoir un système de formation de faisceaux numérique (DBF) capable d'optimiser la réception des signaux sans fil. Ce système permettra une orientation précise et dynamique du diagramme de rayonnement de l'antenne vers la direction souhaitée, éliminant ainsi ou réduisant considérablement les interférences et les distorsions. Notre recherche vise à développer une technologie de pointe pour réduire le bruit, isoler plus efficacement le signal d'intérêt, et garantir une réception de meilleure qualité, une communication plus fiable, ainsi qu'une performance globale améliorée du système.

Plus spécifiquement, notre travail consistera à concevoir, développer et tester ce système DBF dans le but de repousser les limites de la technologie de communication sans fil. Ce faisant, nous aspirons à réduire le bruit, à isoler de manière plus efficace le signal d'intérêt, et à fournir une communication de haute qualité. Ces améliorations contribueront à une performance accrue du système et à une meilleure qualité de service.

En résumé, notre recherche vise à développer un système complet et avancé de formation de faisceaux numérique basé sur les cartes SDR. Ce système englobe les réseaux d'antennes, l'estimation des angles d'arrivée des signaux, ainsi que le calcul et la formation des faisceaux, pour améliorer la réception des signaux sans fil, avec des implications significatives dans les domaines des réseaux 5G, des radars, Internet des Objets (IoT), communication Satellite, applications biomédicales et au-delà.

Conclusion

Aujourd'hui, la prolifération des objets connectés place le réseau mobile devant un défi considérable, nécessitant des changements architecturaux pour améliorer ses performances. Cela représente un véritable enjeu pour la prochaine génération de réseaux. Dans ce chapitre, nous avons examiné les limitations des réseaux mobiles actuels, qui ne sont pas en mesure de répondre à la demande croissante en termes de capacité. Par conséquent, l'introduction de la 5G est devenue plus indispensable que jamais pour répondre aux exigences futures.

Après avoir rappelé les objectifs du standard 5G, ses catégories d'utilisation et ses différentes exigences, nous avons présenté diverses technologies, parfois complémentaires, qui permettent de répondre à certaines de ces exigences. Chacune de ces technologies offre d'importants avantages, mais elles présentent également des limites spécifiques.

Parmi ces technologies, nous avons mentionné le Massive MIMO, qui offre une efficacité spectrale et énergétique accrue. Nous avons également abordé le Full Duplex, qui permet de doubler la capacité du canal par rapport à la technologie Half Duplex de la 4G, ainsi que les Small Cells associées aux ondes millimétriques pour obtenir une large bande passante. Les Small Cells sont essentielles pour réduire la consommation d'énergie et améliorer la latence, mais elles nécessitent l'utilisation d'antennes intelligentes, c'est-à-dire d'antennes dont les diagrammes directionnels peuvent être reconfigurés selon les besoins de l'utilisateur.

Dans le chapitre suivant, nous examinerons les processus de commutation des faisceaux directionnels. Nous étudierons les architectures des réseaux d'antennes ainsi que les techniques de reconfiguration des diagrammes de rayonnement, dans le contexte de la 5G.

Références bibliographiques

[1.1] International Telecommunication Union (ITU). "IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond." ITU-R M.2083-0, 2015.

[1.2] Nokia. "5G Antenna Design. White Paper". 2023.

[1.3] Ericsson. "5G Antenna Design and Deployment. White Paper". 2023.

[1.4] Union internationale des télécommunications. "Conférence mondiale des radiocommunications de 2015 (CMR-15)". Genève, Suisse. 2015.

[1.5] Saman. K.E, Sattar. O.H, Mudhaffer.M. A, "Microstrip patch antenna design, simulation and fabrication for 5G applications, Simulation Modelling Practice and Theory", Volume 116,2022.

[1.6] Vook, F. W., Ghosh, A., & Thomas, T. A. MIMO and beamforming solutions for 5G technology. 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014),2014.

[1.7] PIRINEN, P., "A brief overview of 5G research activities," In Proceedings of the 1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity, IEEE, pp. 17-22,2014.

[1.8] DAI, L., WANG, B., YUAN, Y., et al. "Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends," IEEE Communications Magazine, vol. 53, no 9, 2015, pp. 74-81.

[1.9] ZHANG, P., YANG, X., CHEN, J., et al. "A survey of testing for 5G: Solutions, opportunities, and challenges," China Communications, vol. 16, no 1, 2019, pp. 69-85.

[1.10] SIDDIQUE, U., TABASSUM, H., HOSSAIN, E., et al. "Wireless backhauling of 5G small cells: Challenges and solution approaches," IEEE Wireless Communications, vol. 22, no 5, 2015, pp. 22-31.

[1.11] WANG, W., XU, H., ALAZAB, M., et al. "Blockchain-based reliable and efficient certificateless signature for IIoT devices," IEEE transactions on industrial informatics, vol. 18, no 10, 2021, pp. 7059-7067.

[1.12] AMROUCHE, M. "La 5G pour l'Internet des Objets (IoT) : une révolution pour une nouvelle ère. Défis et challenges," Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2020.

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

[1.13] PRASAD, KNR Surya Vara, HOSSAIN, E., et BHARGAVA, V. K. "Energy efficiency in massive MIMO-based 5G networks: Opportunities and challenges," *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no 3, 2017, pp. 86-94.

[1.14] GE, X., YANG, J., GHARAVI, H., et al. "Energy efficiency challenges of 5G small cell networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no 5, 2017, pp. 184-191.

[1.15] ALVES, H., SOUZA, R. D., et PELLENZ, M. E. "Brief survey on full-duplex relaying and its applications on 5G," In *Proceedings of the 2015 IEEE 20th International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, IEEE, 2015, pp. 17-21.

[1.16] DEBAILLIE, B., et al., "In-band full-duplex transceiver technology for 5G mobile networks," in *Proceedings of the European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC)*, October 2015, pp. 84-87.

[1.17] FOSCHINI, G. J., et GANS, M. J. "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Communications*, vol. 6, no. 3, pp. 311-335.

[1.18] MIETZNER, J., et al., "Multiple antenna techniques for wireless communications: a comprehensive literature survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 2, 2009.

[1.19] JIANG, D. et LIU, G. "An overview of 5G requirements," in *5G Mobile Communications*, 2016, pp. 3-26.

[1.20] LARSSON, E. G., et al., "Massive MIMO for next-generation wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, 2014, pp. 186-195.

[1.21] TSE, D. et VISWANATH, P. "Fundamentals of Wireless Communication," Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2005.

[1.22] RUSEK, F., et al., "Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, no. 1, 2012, pp. 40-60.

[1.23] FOSCHINI, G. J., et GANS, M. J. "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Communications*, vol. 6, no. 3, March 1998, pp. 311-335.

Chapitre 1 : Introduction aux réseaux mobiles de la 5G

[1.24] NGOM, A. "Conception de petits réseaux d'antennes reconfigurables ou 'Small Cells' pour le standard 5G," Thèse de doctorat, COMUE Université Côte d'Azur (2015-2019); Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2019.

[1.25] SCHULZ, B. "MIMO and Beamforming Technologies" in LTE Transmission Modes and Beamforming, Rohde & Schwarz, 2015, pp. 4-5.

[1.26] RAPPAPORT, T. S. et al., "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!," IEEE Access, vol. 1, 2013, pp. 335–349.

[1.27] MARSCH, P., MONSERRAT, F. J., et OSSEIRAN, A. "Beamforming Architectures," in 5G Mobile and Wireless Communications Technology, Cambridge University Press, 2016, pp. 143-144.

[1.28] ALI, E., ISMAIL, M., NORDIN, R., et al., "Beamforming Techniques for Massive MIMO Systems in 5G: Overview, Classification, and Trends for Future Research," Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, vol. 18, 2017, pp. 753-772.

[1.29] BARB, G. et OTESTEANU, M. "4G/5G: A Comparative Study and Overview on What to Expect from 5G," in Proceedings of the 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), IEEE, 2020, pp. 37-40.

[1.30] KIM, D., LEE, H., et HONG, D. "A Survey of In-Band Full-Duplex Transmission: From the Perspective of PHY and MAC Layers," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 4, 2015, pp. 2017–2046.

Chapitre 2 : Etude des antennes intelligentes pour la 5G

1. Introduction

À l'époque actuelle, où la communication revêt une importance capitale, les antennes jouent un rôle crucial en tant que dispositifs électroniques essentiels, ce qui les place au cœur de la technologie de la communication. Les antennes sont souvent considérées comme les "yeux" et les "oreilles" électroniques du monde moderne. Dans ce contexte, l'utilisation des Small-Cells est incontournable pour réduire la consommation énergétique et améliorer la latence. Ces cellules doivent être constituées d'un réseau d'antennes. En effet, l'augmentation du nombre d'éléments rayonnants permet d'obtenir un gain plus élevé, mais cela se fait au détriment de l'angle d'ouverture du faisceau. Par conséquent, les Small Cells doivent avoir la capacité de reconfigurer leur diagramme de rayonnement, notamment en formant un faisceau. Cette capacité à ajuster le faisceau confère aux Small Cells, une forme d'intelligence qui permet d'améliorer l'efficacité énergétique en réduisant le rayonnement inutile des antennes, d'optimiser l'efficacité spectrale en limitant et en atténuant les interférences, et d'augmenter la couverture en adaptant la direction du faisceau. De plus, cette flexibilité de configuration du faisceau contribue également à maintenir un niveau élevé de sécurité en évitant les effets de brouillage [2.1-2.2]. Ce chapitre a pour objectif de présenter une revue de la littérature sur les réseaux d'antennes capables de reconfigurer leur diagramme de rayonnement. Dans un premier temps, nous examinerons les différents types de réseaux d'antennes, en présentant leurs géométries et en fournissant des détails théoriques. Ensuite, nous passerons en revue les techniques de dépointage de faisceau qui ont été identifiées dans la littérature les avantages et les inconvénients de chacune de ces techniques. Enfin, dans la dernière partie une conception des réseaux d'antennes est présentée.

2. Les Antennes Micro-ruban : Conception et Avantages dans les Systèmes de Communication 5G

En raison de leur rôle indéniable dans la technologie de la communication, les antennes sont à juste titre considérées comme les yeux et les oreilles électroniques du monde à l'ère moderne où la communication est devenue indispensable.

L'ingénierie des antennes connaît une révolution majeure, alimentant ainsi la croissance rapide des systèmes de communication. Parmi les développements les plus novateurs dans l'ère de la miniaturisation, les antennes patch micro-ruban se distinguent. Depuis la fin des années

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

1970, la communauté internationale des antennes a consacré des efforts considérables à la recherche théorique et expérimentale sur ces antennes. Elles offrent l'avantage d'un profil bas, ce qui en fait une solution attrayante. Les résultats de ces recherches ont grandement contribué au succès des antennes patch micro-ruban. Elles sont devenues incontournables dans les applications militaires, comme les avions, les radars, les systèmes biomédicaux, les missiles, les hélicoptères et les hélicoptères de combat. De plus, elles ont également trouvé leur place dans des domaines commerciaux tels que les communications mobiles. Ces antennes offrent de nombreux avantages, notamment leur compacité et leur discrétion, grâce à leur faible épaisseur. Elles sont également économiques à produire en masse grâce aux techniques d'impression et de gravure standard. Leur large bande passante les rend polyvalentes, et leur géométrie peut être adaptée pour obtenir une directivité spécifique. En raison de ces caractéristiques, les antennes patch micro-ruban jouent un rôle clé dans les systèmes de communication modernes. Elles sont utilisées dans les réseaux sans fil, les systèmes de surveillance, les satellites, les systèmes de navigation, les dispositifs médicaux, les radars, et bien d'autres applications. La recherche continue dans le domaine vise à améliorer davantage les performances de ces antennes, en termes de gain, de bande passante, d'efficacité et de miniaturisation. Ainsi, de nouvelles possibilités émergent pour les systèmes de communication avancés [2.3-2.4]

2.1. Avantages des antennes micro ruban

En raison de leur légèreté, de leur faible poids, de leur faible volume, de leur faible coût, de leur profil bas, de leur facilité de fabrication, de leur adaptabilité aux supports de montage et de leur capacité à être imprimés directement sur une carte de circuit imprimé, les antennes imprimés pourraient avoir une large application sur les systèmes de communication 5G , Par ailleurs, les deux dernières décennies ont été particulièrement fructueuses en matière de développement d'antennes planaires, principalement pour les communications mobiles. Cette partie est destinée aux antennes planaires, non seulement celles qui sont déjà utilisées mais aussi celles qui proposent d'autres types d'antennes pouvant être appliquées à la 5G. On commence dans un premier lieu par une brève description des antennes planes, de leurs caractéristiques et de leurs applications en tant que réseaux d'antennes. La partie suivante décrira les antennes planaires utilisées dans les systèmes de communication 5G et se terminera par une proposition de nouveaux développements d'antennes planaires qui pourraient être utilisés dans un système MIMO [2.4].

2.2. Antennes à élément unique

2.2.1. Définition

Les antennes à élément unique, également connues sous le nom d'antennes patch à élément unique, sont des antennes qui utilisent un seul élément rayonnant pour la transmission et la réception des signaux. Elles se caractérisent par leur simplicité de conception, leur compacité et leurs performances remarquables. Ces antennes sont généralement de petite taille, ce qui les rend faciles à intégrer dans des dispositifs électroniques tels que les téléphones portables et les ordinateurs portables. Malgré leur structure simple, elles peuvent être conçues pour avoir une directivité spécifique en ajustant la forme et les dimensions de l'élément rayonnant. De plus, les antennes à élément unique offrent une large bande passante, ce qui les rend polyvalentes pour différentes applications de communication. Leur popularité est due à leur facilité de fabrication, leur faible coût et leur adaptabilité à diverses fréquences et systèmes de communication [2.5].

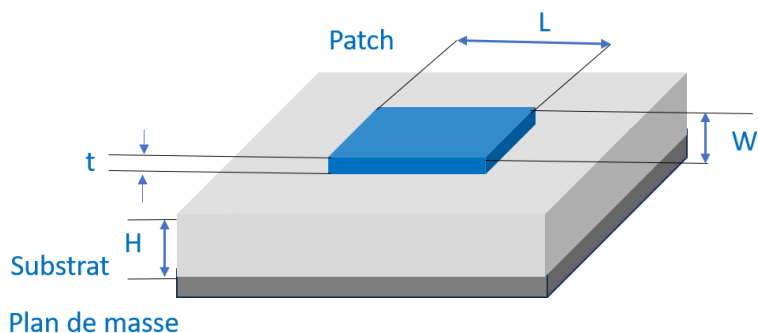


Figure 2. 1 : Géométrie d'une antenne patch à élément unique

2.2.2. Conception d'une antenne à élément unique

2.2.2.1. Introduction

Les antennes planes ont été largement utilisées pour un grand nombre d'applications en raison de leurs nombreux avantages. Légères, peu encombrantes, avec une technologie de fabrication mature, une intégration et un conditionnement faciles, ainsi qu'une flexibilité de conception, la technologie des antennes planes offre plusieurs caractéristiques importantes [2.6]. L'antenne plane, dans sa configuration de base, est composée de deux couches métalliques, à savoir l'élément rayonnant et la masse, et ces couches métalliques sont montées sur un substrat diélectrique utilisé pour un support mécanique et une réduction de taille. L'élément rayonnant peut avoir n'importe quelle forme tant qu'il est conçu pour rayonner le motif de rayonnement requis à la fréquence de fonctionnement. Les experts en antennes préfèrent généralement utiliser des formes géométriques régulières comme des rectangles, des

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

carrés, des cercles, des ellipses, des triangles et des anneaux annulaires. Cette préférence est due à la disponibilité de formulations analytiques pour ces structures, ce qui facilite la conception et l'optimisation des antennes. En utilisant ces formes régulières, il est plus facile d'analyser et de modéliser mathématiquement le comportement des antennes, ce qui simplifie le processus de conception et permet d'obtenir des performances optimales [2.7]. En général, les alimentations des antennes plaqués sont généralement classées en deux principaux types : les alimentations directes et les alimentations indirectes. Une antenne à alimentation directe est réalisée en établissant une connexion physique directe entre l'alimentation (par exemple, une ligne de transmission ou un câble coaxial) et l'élément rayonnant de l'antenne. En revanche, une antenne à alimentation indirecte est réalisée en utilisant un couplage électromagnétique entre l'alimentation et l'élément rayonnant. Les antennes à alimentation par microbande et les antennes à alimentation par sonde coaxiale sont des exemples d'antennes à alimentation directe (Figure 2.2), tandis que les antennes à alimentation par proximité et les antennes à couplage par ouverture sont des exemples d'antennes à alimentation indirecte (Figure 2.3).

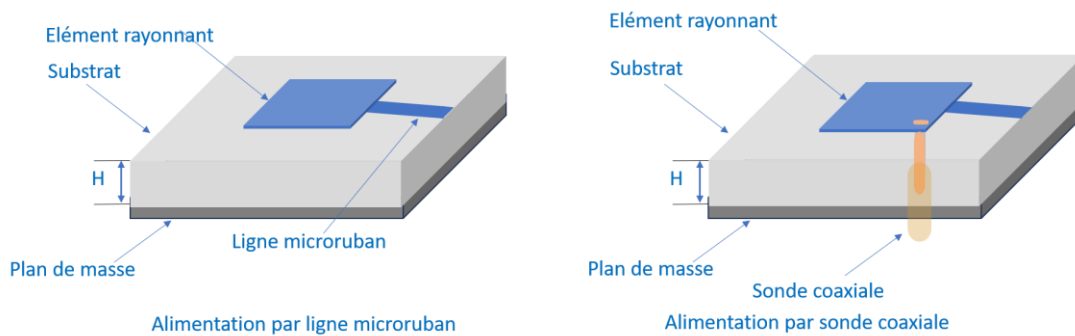


Figure 2. 2 : Alimentation directe.

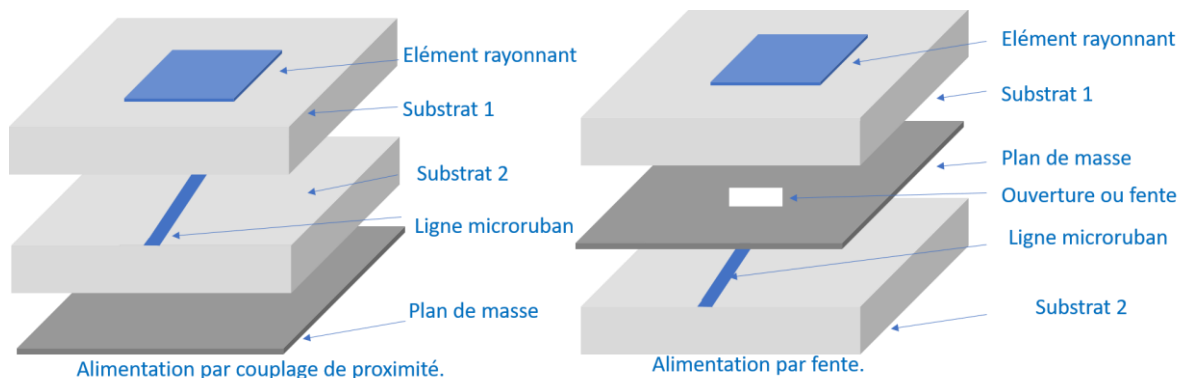


Figure 2. 3 : Alimentation à proximité.

Les systèmes de communication sans fil modernes nécessitent des antennes à faible profil, légères, à gain élevé et à structure simple pour assurer la fiabilité, la mobilité et l'efficacité. Une

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

antenne plaquée est très simple à construire en utilisant une technique de fabrication micro ruban conventionnelle [2.7]. Elle se compose d'un élément plan métallisé sur un substrat diélectrique mis à la terre. Les antennes plaquées sont des antennes à faible profil et légères, particulièrement adaptées aux applications aérospatiales et mobiles. Les antennes plaquées ont considérablement évolué ces dernières années, et bon nombre de leurs limitations ont été surmontées [2.4].

2.2.2.2. Conception d'une antenne à élément unique

Dans cette étude, différentes conceptions de réseaux d'antennes comportant des éléments de forme rectangulaire et circulaire sont examinées. L'approche débute par une évaluation des performances individuelles d'un seul élément de chaque forme, suivie de la conception d'un réseau d'antennes en utilisant la théorie du facteur de réseau. La simulation est réalisée à l'aide du logiciel 3D HFSS (High-Frequency Structural Simulator).

L'objectif principal de cette étude est de comparer les performances des antennes rectangulaires et circulaires dans la bande C, qui couvre des plages de fréquences cruciales pour diverses applications, notamment les communications par satellite, certaines technologies Wi-Fi, les téléphones sans fil et les systèmes de radars météorologiques. Les résultats des simulations serviront de base à cette comparaison approfondie.

Dans le cadre de cette étude, les équations sous-jacentes à la conception des antennes patch circulaires et rectangulaires sont présentées. Ces équations revêtent une importance fondamentale dans la modélisation et la fabrication de ces antennes. En ce qui concerne l'antenne patch circulaire, les équations essentielles englobent des paramètres tels que le rayon du patch, la longueur d'onde de fonctionnement, ainsi que les caractéristiques diélectriques du substrat. En manipulant ces paramètres, il est possible de déterminer avec précision les dimensions du patch circulaire en vue d'obtenir les performances souhaitées, notamment en ce qui concerne la directivité et la polarisation circulaire [2.8-2.9].

$$a = \frac{F}{\sqrt{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} [\ln(\frac{\pi F}{2h}) + 1,7726]}} \quad \text{Équation 2.6}$$

$$\text{Avec } F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{Équation 2.7}$$

En ce qui concerne l'antenne à élément rectangulaire, les équations intègrent les dimensions relatives à la longueur et à la largeur du patch, la longueur d'onde de fonctionnement, ainsi que les propriétés diélectriques du substrat. Grâce à ces équations, il est possible de calculer

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

précisément les dimensions du patch rectangulaire afin d'atteindre les caractéristiques de performance recherchées, telles que le gain et la polarisation linéaire souhaités.

$$W = \frac{C}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad \text{Équation 2.8}$$

$$\text{Et } L = \frac{C}{2 \times f_r \times \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 2 \Delta L \quad \text{Équation 2.9}$$

$$\text{Où } \epsilon_{\text{eff}} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \text{ et } \Delta L = 0.412 * h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad \text{Équation 2.10}$$

Ensuite, une comparaison a été réalisée entre l'antenne à élément circulaire et l'antenne à élément rectangulaire afin d'évaluer leurs performances respectives dans la bande C. Dans le cas de l'antenne rectangulaire, la version conçue par le logiciel HFSS présente des dimensions de $20 \times 27 \text{ mm}^2$, fonctionnant à une fréquence de 3,48 GHz. Pour ce qui est de l'antenne patch circulaire, le rayon est un paramètre clé qui influe sur ses caractéristiques. Dans notre étude, l'antenne patch circulaire a été configurée avec un rayon de 12 mm, fonctionnant à une fréquence de 3,5 GHz.

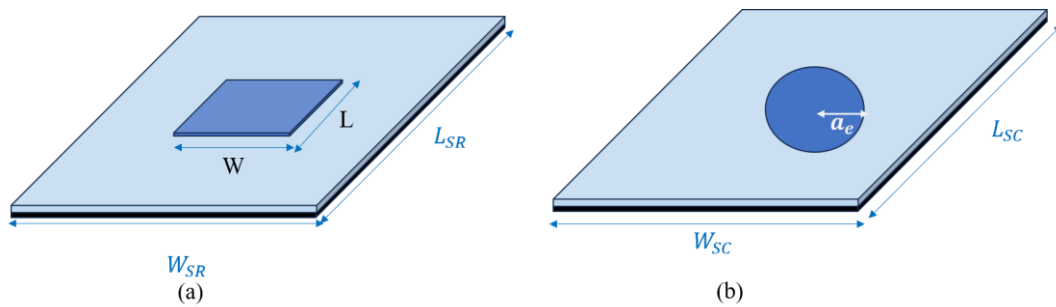


Figure 2. 4 : conception sous HFSS d'une antenne (a) rectangulaire (b) circulaire.

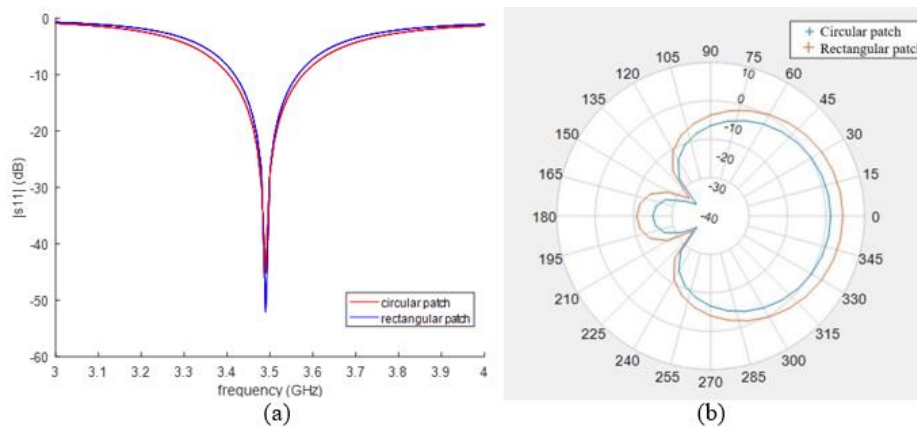


Figure 2. 5 : Comparaison entre antenne patch circulaire et antenne patch rectangulaire : (a) coefficient de réflexion (b) diagramme de rayonnement.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

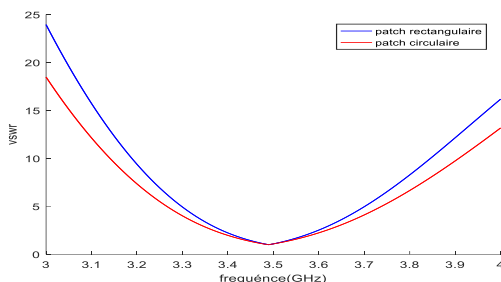


Figure 2. 6: Comparaison entre antenne patch circulaire et antenne patch rectangulaire : VSWR

Les deux antennes présentent de bons résultats en termes de coefficient de réflexion (S_{11}), de VSWR, de gain. Plus précisément, l'antenne circulaire présente un angle d'ouverture plus étroit de 90 degrés, tandis que l'antenne rectangulaire offre un angle d'ouverture de 100 degrés. En ce qui concerne le gain, l'antenne circulaire affiche un gain supérieur de 2,7 dB, comparé à 1,7 dB pour l'antenne rectangulaire. Cependant, il est à noter que l'antenne rectangulaire présente un coefficient de réflexion plus faible, enregistrant -50 dB, par rapport à -45 dB pour l'antenne circulaire.

En ce qui concerne la perte de retour et le VSWR, l'antenne rectangulaire présente des performances supérieures à celles de l'antenne à patch circulaire. Cependant, en ce qui concerne l'angle d'ouverture, le gain, le diagramme de rayonnement, les niveaux de lobes latéraux l'antenne à élément rayonnant circulaire surpasse l'antenne à patch rectangulaire. Les simulations effectuées révèlent que le gain de l'antenne à patch circulaire est supérieur à celle de l'antenne à patch rectangulaire. C'est pourquoi l'antenne à patch circulaire jouit d'une plus grande popularité et peut être utilisée de manière plus efficace par rapport à d'autres antennes à micro-ruban, telles que l'antenne à patch rectangulaire. Ainsi la polarisation circulaire est clairement démontrée par la figure ci-dessous, grâce à un rapport axial de moins de 3 dB à la fréquence requise, ce qui confirme que l'antenne patch circulaire offre une polarisation circulaire". Le rapport axial de la configuration circulaire présente un rapport axial (AR) ≤ 3 dB, avec une largeur de bande du rapport axial (moins de 3 dB) de 3,4 GHz à 3,7 GHz, atteignant en fait 0,7 dB à 3,48 GHz.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

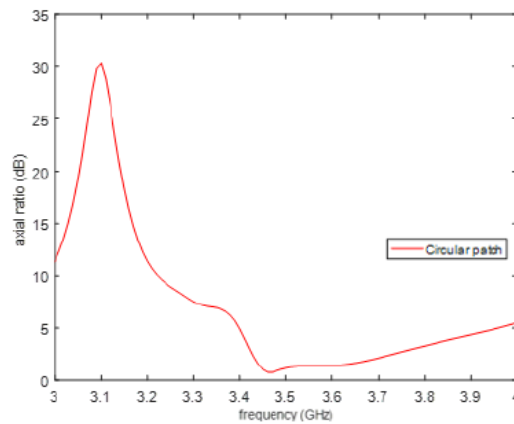


Figure 2. 7: Rapport axial simulé (AR).

Cependant, il est important de noter qu'une antenne micro-ruban à un seul élément de rayonnement ne peut pas toujours répondre aux exigences spécifiques de chaque application. En effet, des fonctionnalités telles que la formation de faisceaux, la direction du faisceau et le balayage du faisceau sont généralement obtenues grâce à l'agencement d'éléments de rayonnement, qu'ils soient disposés en matrice, en réseau linéaire le long d'un axe, en cercle ou en anneau circulaire, voire de manière irrégulière pour satisfaire des besoins particuliers. Par conséquent, pour améliorer ses performances, notamment le gain et la largeur de faisceau, une antenne réseau micro-ruban compacte doit être conçue de manière optimale, en tenant compte de la forme la plus efficace.

Afin d'améliorer la conception de l'antenne réseau de patches micro-rubans 2x2 destinée aux applications 5G dans la bande C, conformément à l'étude comparative, une approche similaire en 2x2 a été maintenue. La seule modification apportée consiste à remplacer les éléments rayonnants rectangulaires par des patches circulaires. Cette adaptation vise à optimiser certaines caractéristiques essentielles, notamment l'obtention d'un gain élevé, d'une faible largeur de faisceau, d'un coefficient de réflexion favorable (S11), ainsi que d'une réduction du poids de l'antenne.

2.3. Réseau d'antennes

2.3.1. Définition

Un réseau d'antennes est un ensemble d'antennes élémentaires, disposées de manière régulière, qui fonctionnent à la même fréquence. Les antennes sont alimentées par un réseau de distribution qui répartit l'énergie sur les différents éléments [10].

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

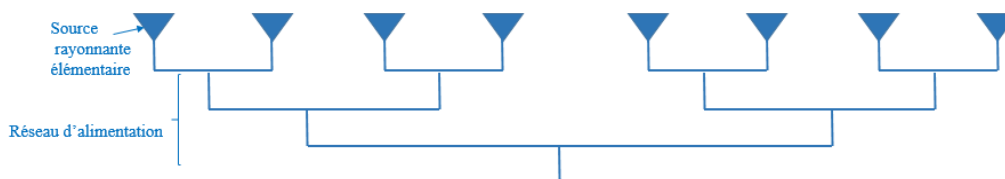


Figure 2. 8: Réseau d'antennes schématisé avec son alimentation parallèle.

2.3.2. Principe de fonctionnement

La qualité de service d'un réseau de communication sans fil est déterminée par la façon dont l'énergie électromagnétique est transmise et reçue. Un seul élément d'antenne peut suffire dans certains cas, mais un réseau d'au moins deux éléments peut être nécessaire pour améliorer le gain directionnel, la directivité dynamique, la diversité et la capacité de pointage.

Le champ total émis par un réseau d'antennes est la somme vectorielle des champs émis par chaque élément. Cette somme est calculée en supposant que le courant dans chaque élément est identique à celui de l'élément isolé [2.11].

Les avantages des réseaux d'antennes par rapport aux antennes à éléments uniques sont largement reconnus et leur utilisation s'est répandue dans divers domaines, notamment la médecine, le radar, et les communications cellulaires. Aujourd'hui, ces réseaux d'antennes revêtent diverses formes, des configurations linéaires, circulaires et planes aux réseaux conformes, bien que les réseaux linéaires demeurent les plus couramment utilisés. Une variété d'éléments d'antenne est employée au sein de ces réseaux, tels que des dipôles demi-onde, des monopôles, et des antennes patch [2.12-2.13].

L'intégration d'un réseau d'antennes avec un traitement de signal en réseau permet de moduler le diagramme de rayonnement selon les besoins spécifiques. Au fil des années, de nombreuses techniques de traitement du signal en réseau ont été développées, allant des méthodes simples de formation de faisceau commuté [2.1] [2.6] aux approches de traitement adaptatif plus complexes permettant au réseau de s'adapter en temps réel aux changements de l'environnement [2.7-2.9], ainsi qu'aux algorithmes plus récents de transmission-réception multiple (MIMO) [2.10-2.13].

Afin de créer des diagrammes de rayonnement très directifs, il est essentiel que les champs électromagnétiques émis par les éléments du réseau interagissent de manière constructive (addition) dans les directions souhaitées et de manière destructive (annulation) dans les directions non souhaitées.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

De manière générale, la performance d'un réseau s'améliore à mesure que le nombre d'éléments augmente. Par conséquent, dans la pratique, les réseaux sont couramment constitués de multiples éléments. Il est même possible que les réseaux comptent plusieurs milliers d'éléments, comme c'est le cas pour les antennes MIMO utilisées dans les systèmes de communication mobile [2.14].

2.3.3. Facteur du réseau

Le champ global rayonné par un réseau est la somme des contributions de chaque élément individuel du réseau. Ainsi, le champ électrique lointain pour un réseau constitué de N éléments peut être défini par l'expression suivante :

$$\vec{E}_T = \sum_{k=1}^N \vec{E}_k \quad \text{Équation 2.11}$$

Avec

$$\begin{aligned} E_K(M) &= kf_K(\theta_K) \frac{A_K}{r} \exp(i\varphi_K) \exp(-i\beta r_K), \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \\ &= kf_K(\theta_K) \frac{A_K}{r} \exp(i\varphi_K) \exp(-i\beta(r - d_K \cos \alpha_K)) \\ &= kf_K(\theta_K) \frac{A_K}{r} \exp(i\beta r) \exp(i(\varphi_K + \beta \cos \alpha_K)) \\ &= kf_K(\theta_K) \frac{A_K}{r} \exp(i\beta r) \exp i\Psi_K \end{aligned} \quad \text{Équation 2.12}$$

Ψ_i Correspond au déphasage (temporelle et spatial) entre les ondes issues de chaque antenne. Il dépend de la phase de chaque source et des distances entre les antennes. Le champ rayonné total au point M est la somme des contributions de chaque source.

d_K est la distance entre l'origine du repère et une source S_k . α_k est l'angle d'élévation, entre la surface et la direction de la source et le point où le champ est rayonné.

$f_K(\theta_K)$: représente la fonction caractéristique de rayonnement de chaque source dans le réseau d'antennes, et elle décrit comment l'énergie est rayonnée dans différentes directions par chaque élément de l'antenne

$$E_{\text{tot}}(M) = \frac{k}{r} \exp(i\beta r) \exp \sum_{k=1}^N A_K f_K(\theta_K) \exp i\Psi_K \quad \text{Équation 2.13}$$

$$= \frac{k}{r} \exp(i\beta r) \exp F_n(\theta)$$

$F_n(\theta)$ correspond au diagramme de rayonnement du réseau, puisqu'il est dépendant de la direction θ_k . Dans le cas où : $\theta = \theta_K \Rightarrow f_K(\theta_K) = f(\theta)$ Le diagramme de rayonnement du réseau F_n peut s'écrire sous la forme suivante.

$$F_n(\theta) = f(\theta) \sum_{k=1}^N A_K \exp i\Psi_K \quad \text{Équation 2.14}$$

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

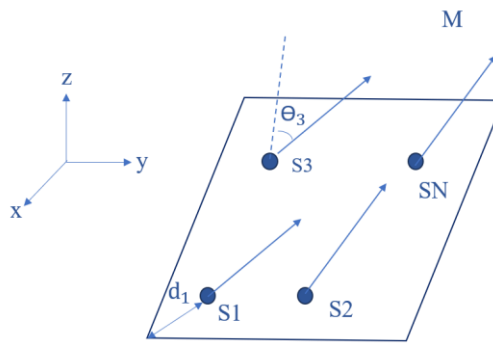


Figure 2. 9: Position du problème : N sources indépendantes placées sur une surface.

2.3.3.1. Réseau linéaire uniformément alimenté et régulièrement espacé

Lorsque des éléments rayonnants sont combinés pour former un réseau, la somme de tous les champs rayonnés par chaque élément individuel constitue le diagramme de rayonnement du réseau. Ces éléments peuvent être configurés de différentes manières pour créer différentes topologies [2.15]. Le réseau linéaire est la forme la plus simple et la plus étudiée d'un réseau. La figure ci-dessous montre une configuration typique de réseau linéaire avec N éléments également espacés le long de l'axe y .

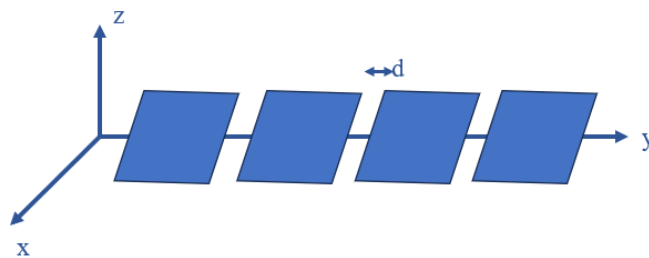


Figure 2. 10: Réseau linéaire.

2.3.3.2. Réseau planaire uniformément alimenté et régulièrement espacé

Un réseau planaire est un agencement d'antennes dans un plan, ce qui signifie que les antennes sont disposées dans un plan bidimensionnel. Plus spécifiquement, un réseau planaire de forme rectangulaire constitue une généralisation du réseau linéaire à deux dimensions. Une façon courante de le décrire mathématiquement consiste à organiser les éléments rayonnants en une grille rectangulaire de dimensions $N \times M$. Il est important de noter que l'espacement entre les éléments du réseau rectangulaire peut différer le long de ses deux axes principaux, ce qui permet une flexibilité dans la conception de l'antenne. Cette approche offre la possibilité de personnaliser les performances de l'antenne en ajustant la disposition spatiale des éléments rayonnants [2.16-2.17].

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

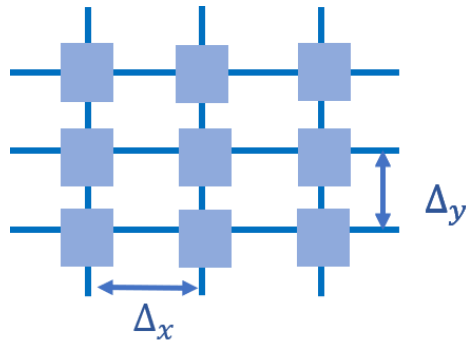


Figure 2. 11: Réseau planaire.

2.3.3.3. Réseau circulaire

Un réseau circulaire est un agencement d'éléments rayonnants disposés le long du périmètre d'un cercle, et ce, à intervalles égaux. L'analyse de ce réseau est généralement limitée au plan horizontal, et les positions des éléments sont caractérisées en utilisant des coordonnées polaires (α , Φ). En d'autres termes, ce réseau est étudié en se concentrant sur le plan horizontal et en décrivant la position de chaque élément en termes d'angle (α) et de distance (Φ) par rapport au centre du cercle. Cette disposition circulaire offre une distribution spatiale particulière des éléments rayonnants, ce qui peut influencer les propriétés et les performances globales de l'antenne [2.16-2.17].

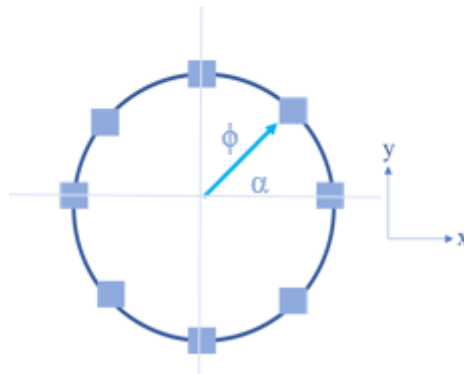


Figure 2. 12: Réseau circulaire.

2.4. Réseaux d'antennes et antennes intelligentes

2.4.1. Introduction

Dans l'évolution des réseaux de communication vers la nouvelle génération (5G), les réseaux d'antennes et les antennes intelligentes, également désignées comme antennes à formation de faisceaux numérique, jouent un rôle critique. Les avantages de ces antennes intelligentes par rapport aux antennes traditionnelles sont significatifs, notamment en ce qui concerne l'extension de la couverture, l'amélioration du débit, la qualité du signal et la gestion

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

efficace du spectre. D'autre part, les réseaux d'antennes permettent une utilisation plus efficace du spectre radioélectrique et une meilleure gestion des interférences entre les antennes [18].

2.4.2. Conception du réseau d'antenne pour la 5G

Dans le contexte de la 5G, ces technologies s'avèrent essentielles pour répondre aux exigences de performance, telles que des débits de données élevés, une faible latence, une densité élevée de connexions, et pour faciliter la mise en place de nouveaux services et applications. À mesure que la demande en communication cellulaire augmente et que les besoins en débits de transmission croissent, de nouveaux concepts d'antennes intelligentes ont été développés pour mieux contrôler le diagramme de rayonnement et minimiser les niveaux de lobes secondaires. Il est crucial que les résultats des simulations et des tests garantissent des performances satisfaisantes en termes de directivité et de contrôle du diagramme de rayonnement, tout en veillant à ce que les temps de simulation restent aussi courts que possible.

Dans [2.19], Wen-Shan Chen a élaboré un réseau d'antennes micro-rubans 2x2 destiné aux applications de point d'accès 5G dans la bande C. Le coefficient de réflexion S11 de l'antenne, qu'il a simulé et mesuré, est conforme à la bande de fréquences prévue pour les communications 5G dans la bande C. Les simulations ont démontré un diagramme de rayonnement directionnel, avec un gain simulé maximal atteignant 5,37 dBi. En plus de ses avantages en termes de coût abordable, de faible encombrement et de facilité de fabrication, l'antenne en réseau présente des caractéristiques attrayantes.

Cependant, il convient de souligner que les caractéristiques de directivité et d'angle d'ouverture de cette antenne ne satisfont pas complètement aux exigences de l'application de beamforming pour la technologie 5G. Par conséquent, suite à la comparaison des deux types d'antennes patch dans la section précédente, des efforts ont été déployés pour améliorer ces propriétés par le biais de diverses expérimentations. Cela inclut l'exploration de modifications de la forme du patch dans le but de concevoir une antenne à gain élevé, à faible largeur de faisceau, et avec un coefficient de réflexion S11 optimisé [2.4].

Afin de créer une base pour améliorer les performances, cette étude a procédé au remplacement du réseau d'antennes à patch rectangulaire, en tant que référence, conçue par l'auteur [2.19], par des antennes à patch circulaire. Cette modification avait pour objectif d'accroître le gain et de réduire l'angle d'ouverture en vue d'une amélioration [2.4].

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

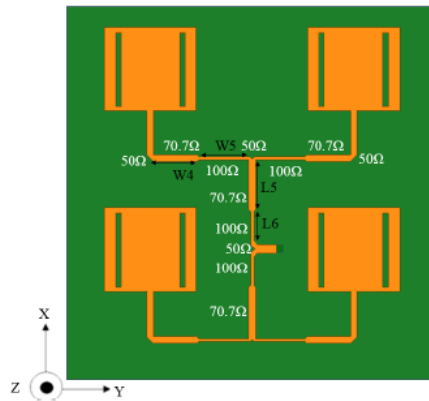


Figure 2. 13: Antenne de référence 'réseau d'antennes patch rectangulaires 2×2 pour la 5G'.

Un réseau d'antennes a été mis en place pour améliorer le gain et la directivité de l'antenne. Ce réseau connecte deux paires d'antennes à éléments rayonnants de forme circulaire et est alimenté par un réseau d'alimentation en mode coplanaire comme illustré dans la figure ci-dessous.

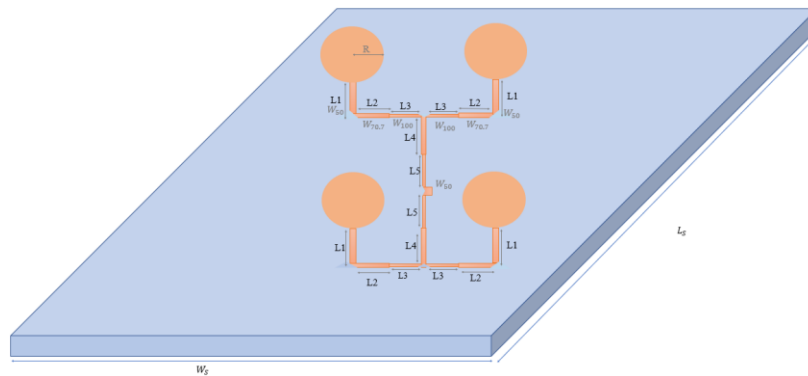


Figure 2. 14: Conception de notre réseau d'antennes patch circulaire (Configuration 1).

Afin de garantir une distribution équilibrée de la puissance, les impédances Z_{100} , Z_{50} et $Z_{70.7}$ ont été utilisées. Pour assurer une adaptation d'impédance appropriée, les dimensions des transformateurs d'impédance quart d'onde ont été calculées selon l'équation $Z_2 = \sqrt{Z_1 \times Z_3}$. Cette approche permet d'optimiser la correspondance d'impédance entre les différentes parties de l'antenne et de maximiser le transfert de puissance vers les éléments rayonnants. Le tableau [2.1] dévoile les dimensions en détail de l'ensemble du réseau d'antennes proposé, facilitant ainsi une analyse approfondie de sa conception. En conséquence, le gain et la directivité de l'antenne sont améliorés, ce qui se traduit par une meilleure efficacité de rayonnement et des performances accrues de l'antenne [2.16].

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

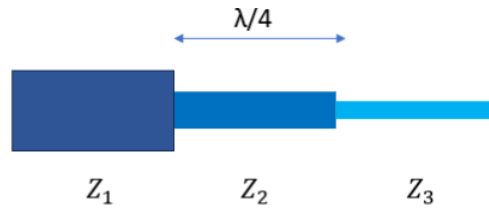


Figure 2. 15: Adaptation d'impédance.

Afin d'assurer une répartition égale de la puissance et d'adapter l'impédance des éléments de patch, il est nécessaire de créer des lignes effilées pour les transformateurs d'impédance quart d'onde. Cette conception en forme de cône des lignes de transformateurs d'impédance permet de graduellement modifier l'impédance le long de la ligne, assurant ainsi une transition en douceur entre les différentes impédances. Cette progression graduelle aide à éviter les réflexions d'impédance indésirables et à optimiser le transfert de puissance de l'alimentation vers les éléments de patch. En réalisant une répartition équilibrée de la puissance et une adaptation d'impédance appropriée grâce aux lignes effilées des transformateurs d'impédance quart d'onde, il est possible d'améliorer les performances globales de l'antenne tout en garantissant une transmission efficace des signaux électromagnétiques [2.4].

L_s	W_s	R	L1	L2	L3	L4	L5	W_{50}	$W_{70.7}$	W_{100}
100 mm	100 mm	12.5 mm	13.9 mm	10.9 mm	12,4 mm	12 Mm	8.75 mm	3 mm	1.55 mm	0.65 mm

Tableau 2. 1: Dimensions détaillées de l'antenne proposée.

Le réseau d'antennes à patch circulaire 2x2 a été soumis à une simulation dans HFSS et fabriqué au sein du laboratoire. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure ci-dessous qui montre un bon accord entre les graphiques simulés et mesurés, à l'exception de légères différences observées. En effet, les deux conceptions présentent un coefficient de réflexion (S_{11}) minimum de -30 dB. Cependant, il est important de noter que les résultats obtenus pour la conception de l'antenne révèlent que la largeur de bande passante de l'antenne fabriquée est décalée de 200 MHz par rapport à la largeur de bande simulée, atteignant ainsi 100 MHz. Cette disparité s'explique en grande partie par la présence d'une ligne quart d'onde, qui présente une variation de fréquence en raison de la permittivité effective de cette ligne.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

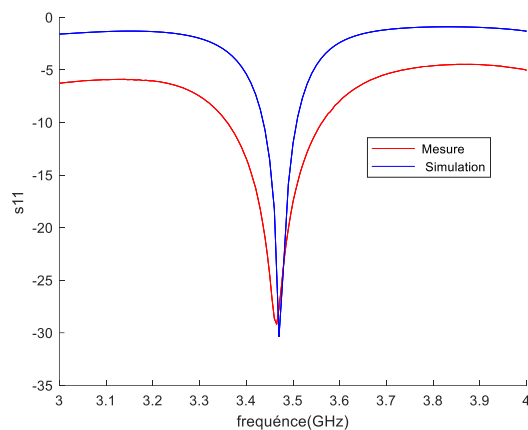


Figure 2. 16 : Comparaison entre les résultats simulés et mesurés du coefficient de réflexion S_{11}

Dans le but de vérifier les niveaux de champ électromagnétique émis, deux antennes sont installées dans une chambre anéchoïque :

La première antenne est l'antenne de référence, qui est une antenne QRH18 (Quad Ridged Horn). Le QRH18 est une 'antenne à guide d'onde qui présente des caractéristiques de très bonne directivité et de large bande. Elle est couramment utilisée comme antenne de référence en raison de ses propriétés bien connues et de sa réponse prévisible dans différentes applications.

La deuxième antenne qui est une antenne test où on insèrera notre antenne conçue est spécifiquement dédiée aux tests des antennes dans les plans E (électrique) et H (magnétique). Le plan E fait référence au plan électrique, qui est orthogonal à la direction de propagation de l'onde électromagnétique. Le plan H fait référence au plan magnétique, également orthogonal à la direction de propagation, mais perpendiculaire au plan E. En utilisant cette antenne dédiée, il est possible de mesurer les niveaux de champ électromagnétique dans les deux plans et d'évaluer les performances des antennes testées.

L'installation de deux antennes dans la chambre anéchoïque permet d'obtenir des mesures plus reproductibles, car elles fournissent des points de référence fiables pour les mesures de champ électromagnétique. En utilisant l'antenne de référence QRH18 et l'antenne dédiée aux tests dans les plans E et H, il est possible de comparer les performances de notre antenne et de quantifier les niveaux de champ électromagnétique émis avec une plus grande précision.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G



Figure 2. 17: Mesure de diagramme de rayonnement

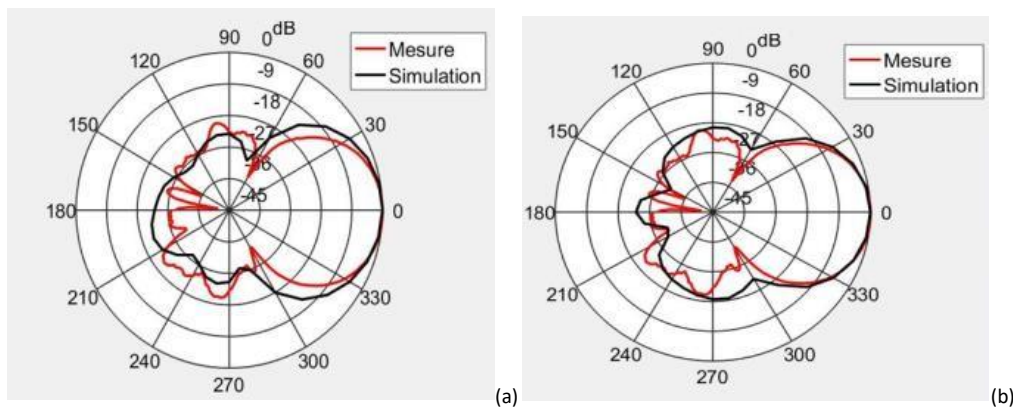


Figure 2. 18: Comparaison de diagramme de rayonnement simulé et mesuré à 3.48GHz ; (a) $\varphi=90^\circ$
(b) $\varphi=0^\circ$

La figure 2.18, montre la comparaison des diagrammes de rayonnement simulé et mesuré d'une antenne à 3,48 GHz. L'antenne est orientée dans deux directions différentes : (a) $\varphi=90^\circ$, c'est-à-dire perpendiculairement au plan de l'antenne, et (b) $\varphi=0^\circ$, c'est-à-dire dans le plan de l'antenne.

On peut en déduire facilement que l'antenne prototype est similaire aux résultats de la simulation. Comparée à l'antenne à élément unique, l'antenne en réseau présente une largeur de faisceau plus étroite. En fait, l'antenne en réseau présente un diagramme de rayonnement directif. La largeur de bande atteint les 40° comme prédit théoriquement. Il est également remarqué que le gain augmente avec le nombre d'éléments. Par conséquent, la simulation sous HFSS montre un gain d'environ 5,8 dB à la fréquence de 3.48 GHz.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

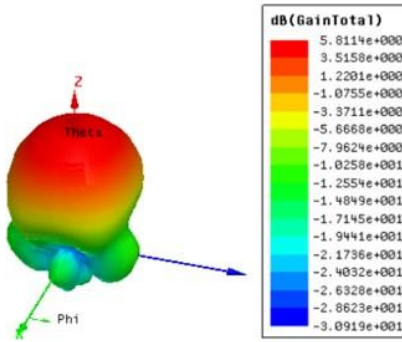


Figure 2.1: gain de l'antenne.

Contrairement à [2.19], notre antenne en réseau avec 2 paires d'éléments rayonnants de formes circulaires offre un bon gain (de 4dB à 5.8 dB), une polarisation circulaire et une faible largeur de faisceau (de 55 ° à 45°), ce qui est adapté aux systèmes beamforming MIMO.

Pour améliorer encore les performances de l'antenne, une approche multicouche a été adoptée. Cette technologie multicouche vise à optimiser l'isolation entre le réseau d'alimentation et les éléments rayonnants, à accroître le gain et à réduire les pertes [20]. Pour atteindre cet objectif, les patches rayonnants et les réseaux d'alimentation sont connectés par des trous traversants. Deux configurations distinctes peuvent être identifiées, comme illustré dans la figure ci-dessous.

-Dans l'une, les quatre patches sont positionnés dans la couche supérieure, suivis d'un substrat intermédiaire, puis d'un diviseur enfoui au centre. Ensuite, le deuxième substrat est ajouté, suivi du plan de masse (configuration 2).

-Dans l'autre configuration, les quatre éléments rayonnants se trouvent également dans la couche supérieure, puis le premier substrat est placé. Ensuite, le plan de masse est enfoui au milieu, suivi du deuxième substrat, et enfin, du diviseur situé en dessous (configuration 3).

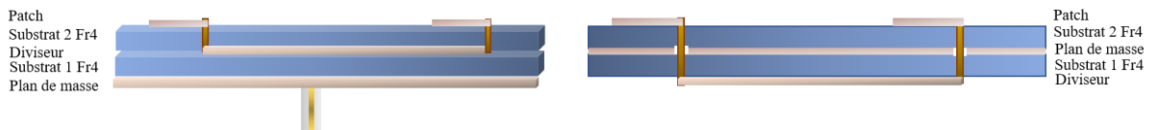


Figure 2. 19: Configurations multi couches.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

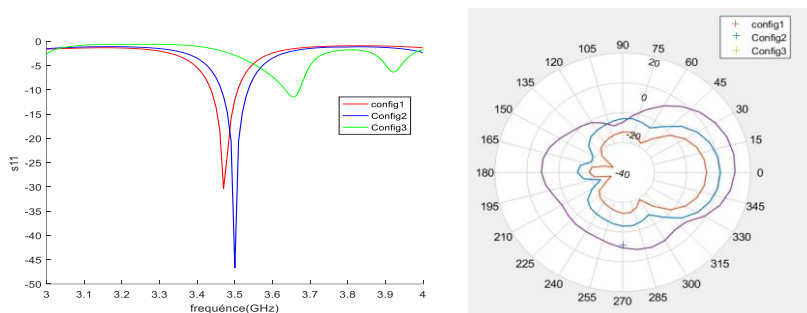


Figure 2. 20:Analyse comparative des performances de 3 configurations de réseau d'antennes.

La figure ci-dessus met en évidence que la configuration 2 présente des performances supérieures selon plusieurs critères. Tout d'abord, elle offre une largeur de bande plus étendue, ce qui signifie qu'elle est capable de couvrir une gamme de fréquences plus vaste. De plus, son diagramme de rayonnement est plus précis, ce qui se traduit par une directivité accrue de l'antenne. En outre, son angle d'ouverture est plus restreint, permettant ainsi une focalisation plus précise du signal émis. En ce qui concerne le gain, la configuration 2 affiche également des résultats supérieurs, ce qui se traduit par une amplification plus efficace du signal. Enfin, les lobes secondaires sont moins prononcés, contribuant ainsi à réduire les interférences indésirables provenant des directions latérales. En résumé, la configuration 2 se distingue par ses performances supérieures dans des aspects cruciaux tels que la largeur de bande, le diagramme de rayonnement, l'angle d'ouverture, le gain et les lobes secondaires.

Les performances remarquables de la configuration 2 sont mises en évidence par une série de chiffres significatifs. Tout d'abord, sa largeur de bande s'étend sur 0,2 GHz, ce qui en fait une option polyvalente capable de couvrir une gamme de fréquences considérable. Le coefficient de réflexion (S11) atteint un impressionnant -50 dB à une fréquence de 3,48 GHz pour la configuration 2, démontrant une excellente adaptation d'impédance et une faible réflexion du signal. En ce qui concerne le gain, cette configuration atteint 6,4 dB, ce qui représente une amélioration substantielle par rapport à l'antenne rectangulaire standard qui ne produit que 4 dB de gain. Cette performance accrue permet une amplification plus efficace des signaux électromagnétiques. Comparée à l'antenne à patch conventionnelle [2.12], l'antenne conçue dans cette configuration 2 se distingue par son gain supérieur et sa largeur de faisceau plus étroite. Ces caractéristiques en font une option particulièrement adaptée aux applications de formation de faisceaux numériques (DBF), où une focalisation précise du signal est essentielle. Le coefficient de réflexion (S11) remarquable, le gain élevé et la largeur de faisceau réduite confirment l'adéquation de cette antenne aux exigences des technologies 5G, où des

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

performances optimales sont essentielles pour répondre aux besoins croissants de débit, de qualité de signal et de gestion spectrale.

La conception multicouche démontre une concordance entre les résultats des simulations et les performances réelles. Celui-ci est illustré dans les exemples ci-dessous.



Figure 2. 21 : Antenne multicouche réalisée

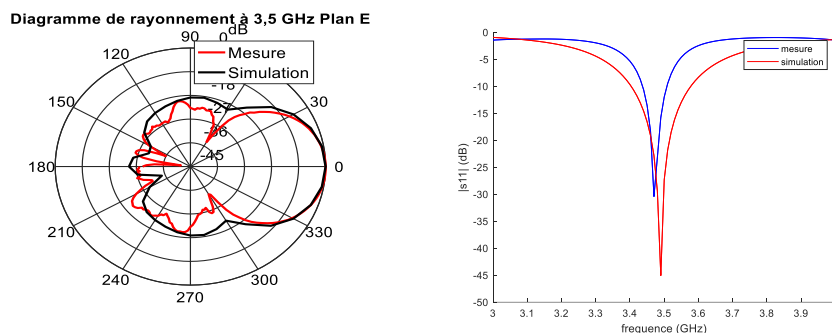


Figure 2. 22: Comparaison entre les résultats simulés et mesurés.

Les observations expérimentales de notre antenne prototype révèlent une convergence notable avec les résultats simulés, que ce soit en termes du coefficient de réflexion (S_{11}) ou du diagramme de rayonnement.

Le choix de la bande C, en particulier la plage centrale de 3,5 GHz, pour la 5G s'explique par la compatibilité avec les cartes SDR (Software-Defined Radio) qui fonctionnent généralement jusqu'à environ 6 GHz. En optant pour cette plage de fréquences, il devient inutile d'utiliser un transceiver pour transposer les fréquences vers ces cartes, ce qui évite l'introduction d'interférences et de pertes d'insertion tout en réduisant les coûts associés.

De plus, la plage de fréquences de l'antenne à patch est compatible avec la plage de fréquences de l'USRP (L'abréviation USRP signifie "Universal Software Radio Peripheral". Il s'agit d'une plateforme matérielle flexible pour la réalisation de systèmes de radio logicielle (SDR)) et elle correspond à l'impédance d'entrée et à la plage de fréquences souhaitée de l'USRP. Ce choix justifie entièrement la plage de fréquences de 3,48 GHz qui fait partie de la

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

bande C et est considérée comme une bande de fréquences moyenne pour le déploiement de la 5G [2.21].

2.5. La nécessité d'un traitement d'antennes

Il est depuis longtemps reconnu que les réseaux d'antennes comportant deux éléments ou plus sont des outils utiles pour améliorer les capacités des systèmes sans fil. La variété des types de réseaux d'antennes, associée aux avancées de la théorie des réseaux d'antennes et des technologies de traitement associées, a ouvert d'énormes opportunités pour les acteurs de ce domaine.

Avec la technique de formation de faisceaux, le diagramme de rayonnement de l'antenne est généralement constitué d'un faisceau principal accompagné de plusieurs lobes secondaires plus petits, situés de part et d'autre du faisceau principal. Ce faisceau principal peut être aisément orienté électroniquement, éliminant ainsi la nécessité d'un balayage mécanique encombrant utilisé par une seule antenne. De plus, la technologie des antennes imprimées a considérablement amélioré l'application des réseaux d'antennes. Cette technologie permet de discrètement intégrer des réseaux d'antennes sur diverses surfaces, créant ainsi des configurations conformes de réseaux d'antennes.

Avec la croissance massive des systèmes de communication sans fil, la disponibilité de la bande passante devient rapidement une ressource rare et la réduction des interférences une nécessité. Grâce au traitement dans le domaine spatial, le faisceau principal peut maintenant être dirigé vers la direction de l'antenne d'émission, offrant ainsi un gain plus élevé dans cette direction et une atténuation significativement plus faible, c'est-à-dire une suppression, dans les autres directions. C'est le principe de base de la séparation dans le domaine spatial, communément appelée filtrage spatial. En utilisant un réseau d'antennes, le domaine spatial peut être divisé en plusieurs canaux spatiaux différents, ce qui permet également d'augmenter la capacité du système ainsi que de supprimer les interférences co-canal et inter-canal.[2.22-2.23].

2.6. Architecture et fonctionnement de l'antenne intelligente

2.6.1. La structure d'une antenne intelligente

La structure d'une antenne intelligente est constituée d'un réseau d'antennes élémentaires dont les sorties sont pondérées avant d'être sommées. L'unité de contrôle des pondérations ajuste l'amplitude et/ou la phase des signaux reçus ou émis par les différentes antennes pour

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

former un diagramme de rayonnement optimal. La figure [2.24] comprend plusieurs blocs fonctionnels qui collaborent pour assurer son bon fonctionnement.

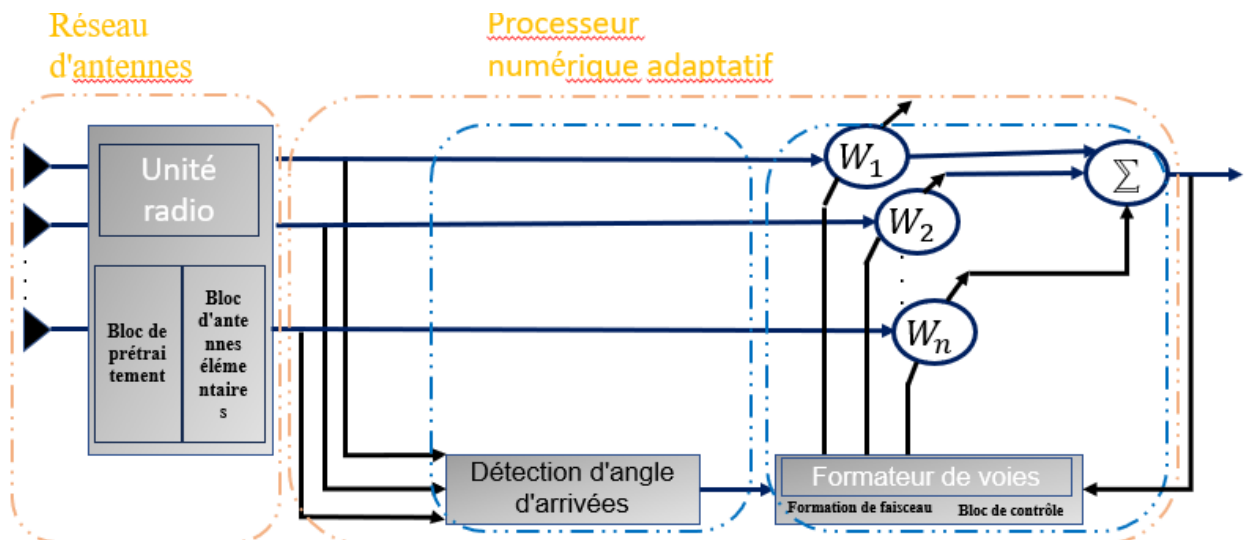
Bloc d'antennes élémentaires : ce bloc est composé d'un ensemble d'antennes élémentaires réparties dans l'espace. Chaque antenne élémentaire est responsable de la réception ou de l'émission des signaux.

Bloc de prétraitement : ce bloc effectue des opérations de filtrage, d'amplification et de mise en forme des signaux reçus par les antennes élémentaires. Il peut également réaliser des opérations de conversion analogique-numérique ou numérique-analogique.

Bloc de détection d'angle d'arrivée : ce bloc utilise des algorithmes de traitement du signal pour estimer les angles d'arrivée des signaux. Il analyse les caractéristiques des signaux reçus par les antennes élémentaires afin de déterminer la direction des sources des signaux.

Bloc de formation de faisceaux : ce bloc ajuste les amplitudes et les phases des signaux provenant des antennes élémentaires pour former des faisceaux de rayonnement dans les directions souhaitées. Il utilise les informations fournies par le bloc de détection d'angle d'arrivée pour orienter les faisceaux vers les sources des signaux ou pour supprimer les interférences.

Bloc de contrôle et de traitement : ce bloc est responsable de la coordination et de la gestion de l'ensemble du système d'antennes intelligentes. Il collecte les informations nécessaires à la prise de décision, ajuste les paramètres en fonction des besoins du système et contrôle le fonctionnement du bloc de formation de faisceaux. Il peut également être responsable de la mise à jour des pondérations des antennes en temps réel.



Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

Figure 2. 23: Architecture et fonctionnement de l'antenne intelligente.

2.6.2. Avantages de l'antenne intelligente

Les antennes intelligentes offrent une voie prometteuse pour accroître la capacité des systèmes de transmission. Elles exploitent la dimension spatiale des capteurs pour améliorer les performances des communications. Le principe de fonctionnement des antennes intelligentes peut être résumé en plusieurs étapes. Tout d'abord, la station de base intelligente se focalise sur un signal spécifique plutôt que de capter les signaux provenant de toutes les directions. Ensuite, elle forme des faisceaux d'énergie dirigés vers des utilisateurs spécifiques, sans avoir besoin de connaître leur emplacement précis. Cela permet de créer une liaison sans fil personnalisée pour chaque téléphone cellulaire [2.21] [2.24].

En utilisant un éventail d'antennes et en appliquant des techniques avancées de traitement numérique du signal, il est possible de réduire la consommation d'énergie nécessaire pour focaliser un signal sur une direction spécifique. Ainsi, les antennes intelligentes permettent de concentrer l'énergie dans une direction donnée plutôt que de la répartir sur 360 degrés. L'utilisation des antennes intelligentes présente plusieurs avantages. Elle permet d'augmenter le nombre d'utilisateurs desservis par un système cellulaire donné et d'élargir la gamme de services offerts. En établissant une communication directe entre la station de base et le téléphone cellulaire de l'utilisateur, les antennes intelligentes réduisent les bruits ambiants et éliminent les interférences provenant d'autres utilisateurs ou obstacles. Ces améliorations de la qualité de la communication et de la capacité du système sont des atouts pour les futurs systèmes de communication sans fil de quatrième génération.

Les avantages de l'utilisation des antennes intelligentes sont nombreux. Ils incluent l'annulation des brouillages co-canal, l'augmentation de la portée grâce à un meilleur rapport signal/bruit, la réduction de l'effet des trajets multiples, et l'augmentation de la capacité des systèmes cellulaires grâce à la réutilisation plus importante des fréquences et à la possibilité de séparer spatialement plusieurs utilisateurs occupant le même canal [2.21] [2.25].

2.6.3. Types de l'antenne intelligente

L'adoption d'antennes intelligentes dans les systèmes sans fil 5G est anticipée pour apporter des améliorations significatives en termes d'efficacité spectrale, de réduction des coûts de déploiement de nouveaux réseaux sans fil, et d'optimisation de la Qualité de Service (QoS). Contrairement aux systèmes de communication sans fil précédents tels que la 2G et la 3G, qui utilisaient respectivement le multiplexage par répartition dans le temps et en fréquence, la 5G

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

requiert une approche plus poussée, basée sur le multiplexage par répartition dans l'espace. Cette technique vise à améliorer la QoS et à réduire les interférences dans les systèmes sans fil. Pour atteindre ces objectifs, la recherche et le développement d'antennes intelligentes dotées de capacités de formation de faisceaux sont essentiels. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire d'étudier et de développer des antennes intelligentes dotées de capacités de formation de faisceaux. Les antennes intelligentes doivent être prises en compte dès la phase de conception initiale des systèmes sans fil pour assurer leur réussite. De plus, il est essentiel de réaliser une évaluation réaliste des performances des antennes intelligentes en fonction des paramètres critiques liés aux exigences des futurs systèmes. Par conséquent, l'étude des méthodologies de mesure pour les antennes intelligentes revêt une grande importance. Cette présentation générale illustre les structures des différents types d'antennes intelligentes. Elle met également en évidence les tendances importantes dans l'adoption des antennes intelligentes dans les futurs systèmes, telles que la reconfiguration du système d'antennes en fonction des différents canaux et des conditions du réseau, la diversité multi-utilisateurs et la suppression des interférences. Une revue de littérature sur les méthodes de mesure pour les antennes intelligentes est également présentée [2.26].

2.6.3.1. *Système à commutation du faisceau*

Un système de formation de faisceaux commutés est un système de communication sans fil qui utilise un réseau d'antennes pour former des faisceaux étroits vers les utilisateurs. Ces faisceaux permettent d'améliorer la puissance du signal reçu et de réduire les interférences [2.26].

Le système de formation de faisceaux commutés fonctionne en commutant entre plusieurs faisceaux prédéfinis. Lorsque l'utilisateur se déplace dans la cellule, le système détecte la puissance du signal et choisit le faisceau prédéfini approprié. Le système continue de commuter les faisceaux si nécessaire pour maintenir le meilleur signal possible [2.27-2.29]

L'objectif global du système de formation de faisceaux commutés est d'augmenter le gain en fonction de l'emplacement de l'utilisateur. Cela permet de fournir une meilleure qualité de service aux utilisateurs, même lorsqu'ils se déplacent.

Plusieurs critères peuvent être utilisés pour optimiser les poids de la matrice d'antennes du système de formation de faisceaux commutés. Ces critères comprennent le rapport signal sur interférence maximal (MSIR), la variance minimale (MV), l'erreur quadratique moyenne minimale (MMSE) et la probabilité maximale (ML).

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

Dans l'approche de formation de faisceau à poids fixes, les angles d'arrivée ne changent pas avec le temps. Cela signifie que les poids optimaux n'auraient pas besoin d'être ajustés. Cependant, cette approche peut ne pas être efficace dans les environnements où les angles d'arrivée varient fréquemment, tels que les environnements urbains.

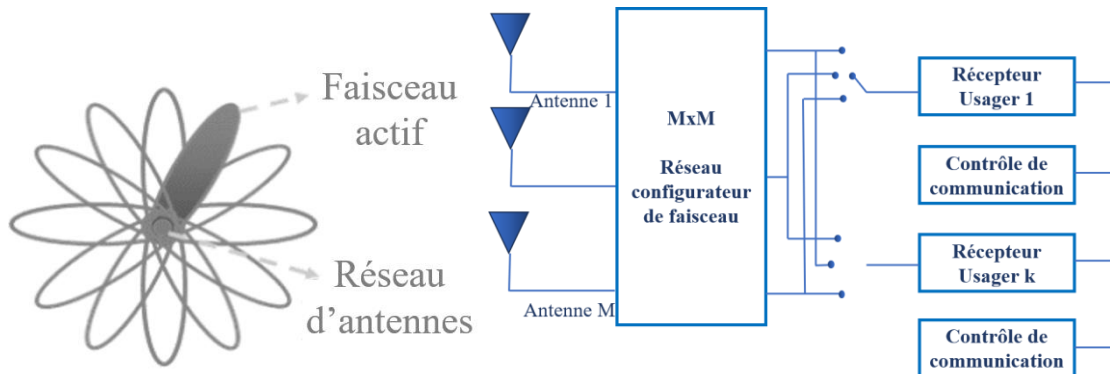


Figure 2. 24: Système à commutation du faisceau.

2.6.3.1.1. Matrice de Butler

La Matrice de Butler est un dispositif passif hyperfréquence qui permet la formation de faisceaux des réseaux d'antennes. Ce composant radio-électrique a été inventé en 1961 par Jesse Butler et Ralph Lowe de la société Sanders Associates, basée à Nashua, dans l'Etat Américain du New Hampshire [2.29]. Ce dispositif est un agencement de coupleurs hybrides avec N entrées et N sorties, où N en général est une puissance de 2.

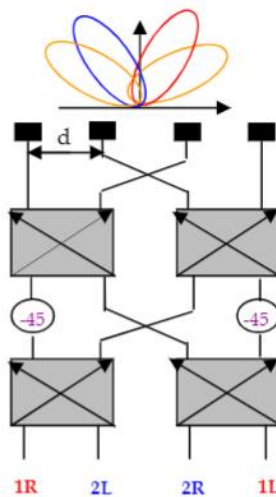


Figure 2. 25: Schématique de Matrice butler 4*4.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

2.6.3.1.2. Matrice de Nolen

La matrice de Nolen [2.30] peut être une alternative intéressante à la matrice de Butler dans le cas de réalisation planaires. Cette solution est très peu abordée dans la littérature. Sa topologie est présentée sur la figure [2.26]

Cette matrice est caractérisée par une alimentation en série de l'ensemble des ports de sorties. Chaque nœud de la matrice est constitué d'un coupleur directionnel et d'un déphaseur. Cummings propose dans [2.15] une mise en équation matricielle du problème mais sa résolution reste difficile surtout si la matrice est de dimensions importantes.

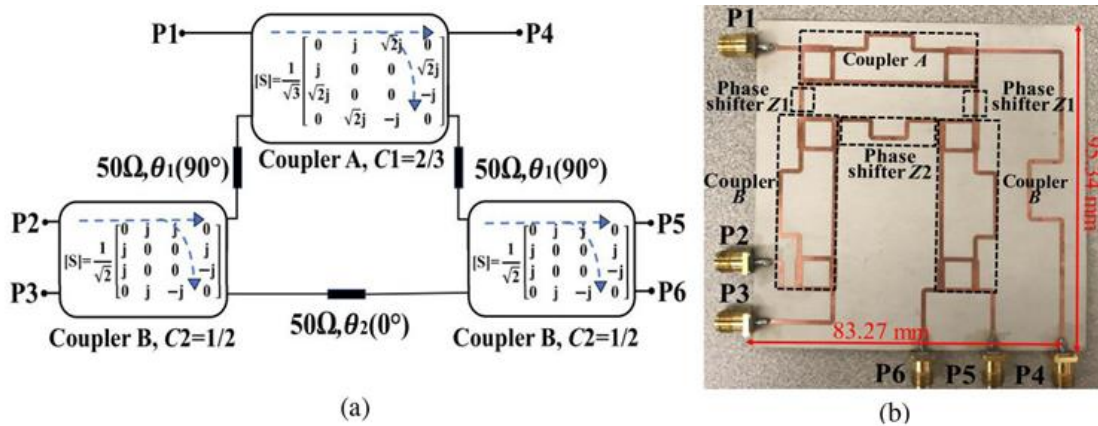


Figure 2. 26: Architecture de la matrice Nolen symétrique 3 × 3 (b) Photographie de la matrice 3 × 3 Nolen fabriquée.

2.6.3.2. Système à réseau adaptatif

2.6.3.2.1. Définition

Historiquement, le terme "réseau d'antennes adaptatives" (comme illustré dans la figure ci-dessous) a été employé pour décrire un système d'antennes à auto-phasage. Ces systèmes étaient conçus pour diriger tous les signaux entrants dans la direction d'origine en utilisant des techniques de phasage intelligentes qui dépendent de la conjugaison de phase. Les systèmes adaptatifs se distinguent des systèmes à faisceaux commutés par leur utilisation d'algorithmes de traitement du signal avancés. Ces algorithmes sophistiqués ont pour objectif constant de distinguer les signaux utiles des signaux indésirables, tels que les signaux provenant de trajets multiples et les brouilleurs, qui peuvent dégrader la qualité des signaux. En outre, ces algorithmes permettent de calculer les directions d'arrivée des signaux et de localiser les sources d'interférences pour les éliminer [2.31].

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

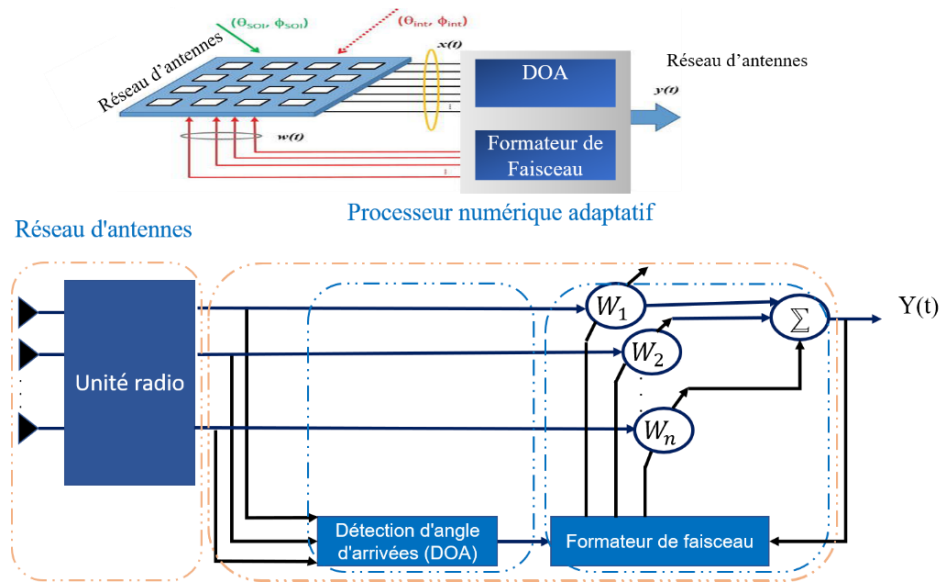


Figure 2. 27: structure d'une antenne adaptative.

Les systèmes adaptatifs exploitent les techniques de traitement du signal pour réaliser des opérations telles que la suppression des interférences, la détection des signaux utiles et la localisation des sources de brouillage. Ces algorithmes sophistiqués analysent en temps réel les caractéristiques des signaux reçus et ajustent les paramètres de communication en fonction des estimations du canal, tels que les directions d'arrivée des signaux et les niveaux d'interférence [2.32].

Les systèmes d'antennes adaptatives utilisent le principe de multiplication des signaux individuels par des pondérations pour former un faisceau dirigé vers une cible particulière. Cela permet d'ajuster à la fois la phase et l'amplitude des signaux, ce qui offre plusieurs avantages par rapport aux systèmes d'antennes traditionnels. Dans un environnement à visibilité directe (Line of sight 'LOS'), où il n'y a pas d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur, les performances des systèmes à faisceaux commutés ou adaptatifs sont généralement bonnes. Cependant, ces performances se dégradent de manière significative dans un environnement à trajets multiples (No-Line-of-Sight 'NLOS'), où les signaux se propagent via différents chemins réfléchis, diffractés ou dispersés par des obstacles. Les trajets multiples dans un environnement NLOS peuvent entraîner des interférences entre les différents signaux, ce qui complique la tâche de séparation des signaux utiles et indésirables. Les systèmes adaptatifs, grâce à leurs algorithmes sophistiqués de traitement du signal, peuvent atténuer les effets des trajets multiples en adaptant les pondérations des antennes de manière dynamique. Cependant, il est important de noter que même les systèmes adaptatifs peuvent rencontrer des limites dans les environnements les plus complexes. Les caractéristiques spécifiques de l'environnement,

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

telles que la densité et la distribution des obstacles, ainsi que les propriétés du canal de propagation, peuvent influencer les performances des systèmes adaptatifs. Des techniques complémentaires, telles que l'utilisation de techniques de pré-distorsion du signal ou de modèles de propagation plus précis, peuvent être nécessaires pour améliorer davantage les performances dans de tels environnements difficiles.

En utilisant ces informations, les systèmes adaptatifs peuvent ajuster dynamiquement les paramètres de leurs antennes, comme les poids de faisceau, les amplitudes et les phases des signaux émis, afin d'optimiser la réception des signaux utiles et de réduire l'impact des interférences. Les signaux provenant de trajets multiples et de brouilleurs sont identifiés et traités de manière à minimiser leur impact sur la qualité de la communication.

Parmi les avantages prouvés des réseaux d'antennes adaptatives utilisés dans les stations de base des systèmes cellulaires, on trouve une efficacité spectrale accrue et une capacité de canal résultant d'une couverture étendue et d'une réduction des interférences co-canal. De plus, une réduction de l'affaiblissement par trajets multiples peut être obtenue. Deux des avantages les plus importants sont la capacité à minimiser les interférences co-canal, en isolant les signaux provenant de différentes directions, et la capacité à éviter la radiation de signaux dans des directions où un autre utilisateur mobile ou une autre station de base est déjà présent. Cette isolation des signaux avec différents angles d'arrivée ou signatures spatiales est la propriété essentielle exploitée par les réseaux d'antennes.

3.5.3.2.2. Comparaison entre les deux types de l'antenne intelligente

Critères	Système à réseau adaptatif	Système à commutation de faisceau
Contrôle des antennes	Contrôle individuel des réseaux d'antennes	Sélection d'un faisceau prédéfini en fonction de l'emplacement
Ajustement des poids	En temps réel pour optimiser les performances du système	Statiques, les faisceaux prédéfinis ne sont pas ajustés en temps réel
Adaptation aux changements de canal	Oui, grâce à des algorithmes adaptatifs	Non, les faisceaux prédéfinis restent fixes
Flexibilité	Grande flexibilité pour s'adapter aux changements de l'environnement, des interférences et des conditions de propagation	Moins flexible, limité aux faisceaux prédéfinis

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

Suivi des utilisateurs en mouvement	Oui, les faisceaux peuvent être formés dans différentes directions pour suivre les utilisateurs en mouvement	Non, les faisceaux prédéfinis ne sont pas adaptés en fonction des mouvements des utilisateurs
Amélioration de la qualité du signal	Oui, en optimisant les performances du système en fonction des conditions du canal	Oui, en sélectionnant un faisceau prédéfini approprié
Adaptation dynamique	Oui, ajustement en temps réel en fonction des conditions du canal	Non, les faisceaux prédéfinis restent fixes
Complexité	Plus complexe en raison de l'adaptation en temps réel et de l'utilisation d'algorithmes adaptatifs	Moins complexe car les faisceaux prédéfinis sont statiques
Exigences spécifiques	Convient aux environnements changeants et aux communications adaptatives	Convient aux scénarios où les faisceaux prédéfinis sont suffisants
Flexibilité des faisceaux	Très flexible, possibilité de former des faisceaux dans différentes directions	Limitée aux faisceaux prédéfinis

Tableau 2. 2: Etude comparative entre les deux types des systèmes intelligentes.

En conclusion, notre étude a montré que l'utilisation de systèmes adaptatifs présente de nombreux avantages dans le domaine des réseaux de communication sans fil. Les systèmes adaptatifs offrent une capacité d'adaptation en temps réel aux conditions changeantes du canal et aux besoins des utilisateurs. Ils permettent d'améliorer la qualité et la capacité des réseaux de communication tout en réduisant les interférences et en optimisant l'utilisation du spectre radio. En comparaison avec les systèmes à commutation de faisceaux, les systèmes adaptatifs offrent une flexibilité accrue, une meilleure gestion des interférences, une utilisation plus efficace du spectre et une capacité d'adaptation aux scénarios de communication variables. Ces avantages font des systèmes adaptatifs un choix judicieux pour répondre aux exigences croissantes des réseaux de communication sans fil. Cependant, il convient de souligner que le choix entre les systèmes adaptatifs et les systèmes à commutation de faisceaux dépendra des besoins spécifiques de chaque application et des contraintes du système. Dans certains cas, les systèmes à commutation de faisceaux peuvent être plus adaptés en termes de coût, de complexité ou de besoins de communication spécifiques. Une évaluation approfondie des exigences et des contraintes est nécessaire pour prendre la décision la plus appropriée.

Dans notre étude, compte tenu des avantages en termes d'adaptabilité, de gestion des interférences et d'utilisation efficace du spectre, nous recommandons l'utilisation de systèmes adaptatifs pour améliorer la qualité et la capacité des réseaux de communication sans fil. Ces

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

systèmes offrent des solutions prometteuses pour répondre aux besoins croissants de connectivité et de performance dans les environnements de communication modernes.

2.6.4. Domaines d'application de la technologie d'antennes intelligentes

La technologie des antennes intelligentes trouve de nombreuses applications dans différents domaines. Voici quelques exemples :

Télécommunications mobiles : Les antennes intelligentes sont largement utilisées dans les systèmes de communication mobile, tels que les réseaux 4G et 5G. Elles permettent d'améliorer la qualité des signaux, d'augmenter la capacité du réseau en gérant les interférences, et de fournir une meilleure couverture et une meilleure connectivité aux utilisateurs.

Communications sans fil : Les antennes intelligentes sont largement utilisées dans les systèmes de communication sans fil tels que les réseaux cellulaires, les réseaux Wi-Fi, les systèmes de communication par satellite, etc. Elles permettent d'améliorer la qualité du signal, d'augmenter la portée et la capacité du réseau, pour améliorer la portée du signal, réduire les interférences et augmenter la vitesse de transmission des données ainsi que d'optimiser la gestion des interférences.

Radar : Les antennes intelligentes sont utilisées dans les systèmes de radar pour détecter et suivre des objets. Elles permettent une meilleure résolution spatiale, une réduction des interférences et une amélioration de la précision de détection.

Systèmes de navigation : Les antennes intelligentes sont utilisées dans les systèmes de navigation, tels que le GPS, pour améliorer la précision de localisation en réduisant les erreurs causées par les multi-trajet et les interférences.

Systèmes de surveillance : Les antennes intelligentes sont utilisées dans les systèmes de surveillance, tels que les caméras de vidéosurveillance, pour améliorer la qualité des images, optimiser la couverture et suivre les objets en mouvement.

Systèmes de défense et de sécurité : Les antennes intelligentes sont utilisées dans les systèmes de défense et de sécurité pour améliorer la détection des menaces, la surveillance du champ de bataille et les communications sécurisées.

Radiodiffusion : Les antennes intelligentes sont utilisées dans les systèmes de radiodiffusion, tels que la télévision et la radio, pour améliorer la qualité du signal, augmenter la portée de diffusion et optimiser la réception dans les zones de couverture difficile.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

Systèmes de télédétection : Les antennes intelligentes sont utilisées dans les systèmes de télédétection pour la collecte et l'analyse de données environnementales. Elles permettent une meilleure résolution spatiale et temporelle des mesures, facilitant ainsi la surveillance de l'environnement, la cartographie, l'agriculture de précision, etc.

Systèmes de véhicules autonomes : Les antennes intelligentes sont utilisées dans les systèmes de communication des véhicules autonomes pour permettre la communication entre les véhicules et les infrastructures routières. Elles facilitent l'échange d'informations en temps réel, la détection des obstacles et la coordination des mouvements des véhicules. Ces domaines ne sont qu'une sélection des applications possibles de la technologie des antennes intelligentes, et de nouvelles utilisations continuent d'émerger à mesure que la technologie évolue.

3. Techniques avancées des antennes intelligentes

Plusieurs techniques de pointe en matière d'antennes intelligentes sont en train de révolutionner les communications sans fil. Parmi ces méthodes figurent le beamforming, le MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), les antennes à réseau intelligent, les antennes à balayage électronique et les antennes à polarisation adaptable. Chacune de ces approches présente des avantages spécifiques en termes de rendement, de capacité et de qualité des communications sans fil. Elles permettent d'optimiser l'utilisation du spectre radio, de réduire les interférences et de fournir des connexions plus rapides et plus fiables. Ces avancées technologiques dans le domaine des antennes intelligentes ouvrent de nouvelles perspectives pour une variété d'applications, allant des réseaux de télécommunication aux systèmes de surveillance et de navigation, améliorant ainsi l'efficacité et l'expérience des utilisateurs.

Parmi ces techniques avancées, le beamforming occupe une place particulière. Il se distingue par sa capacité à former un faisceau directionnel précis, ce qui étend la portée, diminue les interférences et améliore l'adaptabilité aux fluctuations du canal. Ces avantages en font une option de choix dans le domaine des antennes intelligentes pour optimiser la performance et la qualité des communications sans fil.

3.1. Le beamforming : une avancée révolutionnaire des techniques des antennes intelligentes"

3.1.1. Définition et principe du Beamforming

Le beamforming est généralement une opération de filtrage spatial utilisant un réseau d'antennes pour rayonner ou capturer de l'énergie dans une direction particulière. Il permet une amélioration remarquable par rapport à la réception/émission omnidirectionnelle en mettant

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

l'accent sur la qualité, la portée et la fiabilité des communications sans fil tout en réduisant les interférences [2.33].

Ces systèmes ont la capacité de percevoir le signal reçu et d'optimiser leurs diagrammes de rayonnement en modifiant la forme et la direction du faisceau, en supprimant les interférences en introduisant un minimum de rayonnement (zones de faible puissance) dans les directions des signaux d'interférence, en modifiant le niveau des lobes secondaires, en compensant les défauts matériels et en prenant en compte les effets de couplage mutuel qui peuvent modifier l'amplitude et la phase des signaux émis.

3.1.2. État de l'art du beamforming : les avancées récentes dans la technique de formation de faisceau

Il y a eu des avancées technologiques dans ce domaine, dans [2.34] un système de formation de faisceau basé sur une matrice de Nolen a été élaboré. Cette matrice se distingue par une alimentation en série de tous les ports de sortie. Chaque nœud de la matrice est composé d'un coupleur directionnel et d'un déphaseur. Une formulation matricielle du problème a été proposée, mais sa résolution demeure complexe, en particulier lorsque la matrice est de grande taille.

Dans [2.35] une antenne intelligente à faisceau commutable est conçue. Au niveau du front RF, un ensemble d'antennes M sont combinées à l'aide d'une matrice de Butler, qui additionne les signaux au niveau RF et génère une sortie pour M faisceaux différents. Cependant Les systèmes à faisceau commutable ont cependant des limitations. Comme les faisceaux sont prédéterminés, la puissance du signal varie à mesure que l'utilisateur se déplace dans le secteur. Lorsqu'une unité mobile se déplace à la bordure du faisceau, la puissance du signal peut se dégrader rapidement avant que l'utilisateur ne bascule sur un autre faisceau. Une autre limitation se produit lorsque le faisceau commutable est activé, ce qui réduit le rapport signal sur interférence (C/I). Par conséquent, la suppression des interférences est limitée par la largeur de faisceau de l'antenne du faisceau commutable. C'est l'une des raisons pour lesquelles les antennes adaptatives sont considérées comme supérieures aux antennes à faisceau commutable. Les antennes adaptatives sont capables d'ajuster la direction et la forme du faisceau en temps réel, en fonction de la position de l'utilisateur. Cela permet de maintenir une puissance de signal élevée et un rapport signal sur interférence (C/I) élevé, même lorsque l'utilisateur se déplace.

Pour mettre en œuvre le beamforming, il est essentiel de profiter des avancées technologiques actuelles dans les domaines des hyperfréquences, y compris les antennes et les

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

circuits, ainsi que dans le domaine de la microélectronique, avec l'utilisation des ASICs (circuits intégrés spécifiques à une application), des DSP (processeurs de traitement numérique du signal), des FPGA, de la logique programmable, des convertisseurs analogique-numérique (AN) et numérique-analogique (NA).

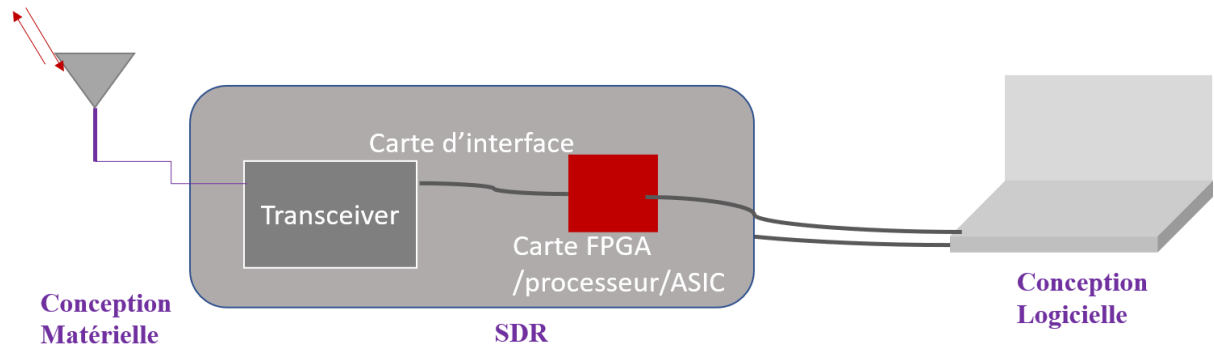


Figure 2. 28 : Implémentation du Beamforming.

La figure 2.28 illustre comment les circuits intégrés spécifiques à une application (ASIC) ainsi que les processeurs de signal numérique (DSP), combinés à des méthodes novatrices de traitement de signal adaptatif, contribuent à rendre les systèmes commerciaux d'antennes intelligentes de plus en plus faisables et performants. Des systèmes intelligents à faible coût composés de plusieurs éléments d'antenne intégrés sur une seule carte et à haute résolution ont été présentés. Les auteurs des articles [2.36-2.37] présentent un bon exemple de l'importance de l'utilisation de la formation de faisceau numérique dans les systèmes multi-antennes pour réduire la puissance reçue dans les directions des signaux d'interférence, en plaçant des nulls dans le diagramme de rayonnement. Des avancées technologiques ont été réalisées dans ce domaine, avec la présentation de radars à faible coût, composés de plusieurs éléments d'antenne intégrés sur une seule carte et à haute résolution. L'article [2.38] présente un exemple d'un récepteur à faisceau numérique à faible coût (Rx) pour la connectivité des appareils IoT, une application peu coûteuse pour résoudre les problèmes de communication.

Dans [2.39-2.41], l'importance de l'efficacité spectrale de la formation de faisceaux est démontrée, avec l'annulation des interférences indésirables en plaçant des zones d'annulations dans leurs directions, ce qui peut conduire à un taux d'erreur binaire (BER) plus faible.

Le concept de formation de faisceaux, dans le sens de la capacité à contrôler la forme de rayonnement d'un réseau d'antennes, peut être réalisé soit numériquement, comme les exemples présentés précédemment [2.39-2.41], analogiquement (en utilisant des déphaseurs analogiques en frontal [2.42] ou de manière hybride [2.43]). Une architecture de système de formation de

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

faisceaux hybride à ondes millimétriques basée sur des sous-réseaux phasés analogiques est rapportée dans [2.44]. Ce travail utilise un réseau d'antennes à 32 éléments avec un émetteur-récepteur de formation de faisceaux hybride pour fonctionner dans la bande des 28 GHz en mode TDD, avec une bande passante de 500 MHz. Un aspect important est la réduction du nombre de canaux de fréquence intermédiaire (IF) par rapport à [2.39-2.41], ce qui réduit le coût par rapport aux architectures entièrement numériques. Cependant, un problème avec cette architecture est le déphasage analogique, qui augmente les pertes d'insertion jusqu'à 19,5 dB, nécessitant l'utilisation d'amplificateurs supplémentaires pour compenser de telles pertes. De plus, cette architecture présente une conception complexe du signal de commande en raison de la non-linéarité entre les signaux de commande (contrôle de l'amplitude) et la phase de sortie de ce vecteur somme de phase.

Dans [2.45], un circuit intégré (IC) CMOS à 28 GHz hautement compact avec capacités MIMO (multiples entrées, multiples sorties) et de formation de faisceau avec un seul fil pour le multiplexage en bande de base est rapporté. Cependant, il nécessite des opérations MIMO de traitement du signal numérique (DSP) lourdes pour récupérer les informations. Un concept similaire a été récemment présenté dans [2.46], proposant un récepteur d'array numérique pour les applications satellites, intégrant également des algorithmes DSP, fonctionnant sur la plateforme de prototypage Xilinx ZCU1275 ; cependant pour la transmission et la réception de données, un transceiver est indispensable ce qui peut augmenter le coût global de l'application, réduire la puissance du signal reçu et entraîner des erreurs ou une perte de communication.

Les auteurs dans [2.47] ont exploré l'utilisation d'un périphérique radio logiciel (SDR) qui est souvent moins cher que les FPGA et ASIC, et qui inclut généralement un transceiver intégré. Cela permet aux SDR d'être plus compactes, faciles à utiliser et flexible pour être configuré pour différentes fréquences et protocoles. Les auteurs ont utilisé une carte SDR 'USRP X310' connectée à un ordinateur capable de calculer la direction d'arrivée (DoA) et de générer une formation de faisceaux dans la bande de fréquence sub-6 GHz pour une structure de transpondeur satellite. Néanmoins, cette plate-forme de test présente des erreurs d'estimation de la DoA considérables dans une fréquence inférieure au scénario d'opération.

La SDR permet de concevoir et de tester rapidement des prototypes de systèmes de communication, offrant ainsi une meilleure flexibilité et évolutivité pour soutenir l'adoption de nouvelles technologies et de nouveaux protocoles, cependant, certains articles, tels que ceux mentionnés dans [2.47-2.49], vont plus loin en combinant l'exploration de la SDR avec la

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

formation de faisceaux pour concevoir des systèmes de communication sans fil basés sur la SDR avec une mise en œuvre de la formation de faisceaux. Cela promet une amélioration significative des performances en termes de directionnalité des signaux. Cependant, il convient de noter que l'évaluation expérimentale de ces systèmes a été réalisée en utilisant des cartes USRP coûteuses et en mode half-duplex. Ainsi, il est important de noter qu'au sein des articles [2.49-2.50], l'identification des angles d'arrivée des signaux est consciemment omise ou négligée. En d'autres termes, ces publications ne se penchent pas sur la tâche cruciale de déterminer les directions à partir desquelles les signaux sont reçus. Cette omission peut être significative, car la détection précise des angles d'arrivée est souvent une composante essentielle de la technologie de formation de faisceaux, permettant de diriger efficacement les signaux dans la direction souhaitée.

Dans [2.48], un système polyvalent et reconfigurable à réseau en phase à formation de faisceaux numérique 4x4 fonctionnant dans la bande Ka à 28 GHz est proposé. Ce système a la capacité de manipuler et de diriger électroniquement et numériquement le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes, et de l'adapter à l'environnement pour maximiser ses performances et son efficacité. De plus, ce système a également la polyvalence de changer avec une faible complexité la fréquence de l'oscillateur local (LO) et de l'IF pour mettre en œuvre des systèmes de communication et de radar dans les ondes millimétriques (bande Ka), ce qui permet de tester rapidement de nouvelles solutions basées sur la radio définie par logiciel. Il présente également l'avantage de permettre la communication full-duplex. Cette architecture a le potentiel pour être utilisée dans une grande variété de scénarios futurs tels que les communications 5G, les applications radar, l'IoT ou la surveillance. Cependant, il convient de noter que ce système présente toutefois un inconvénient majeur en termes de coût, en raison de l'utilisation de plusieurs cartes USRP, chaque carte USRP est généralement considérée comme étant soit un émetteur (TX) soit un récepteur (RX), ce qui signifie qu'elle ne peut pas effectuer simultanément la réception et l'émission. La figure ci-dessous illustre le concept décrit ci-dessus. Cette limitation peut entraîner des défis en termes de coûts et de complexité pour les systèmes nécessitant à la fois la réception et l'émission simultanée. Cela nécessite généralement l'utilisation de plusieurs cartes USRP, ce qui augmente les coûts.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

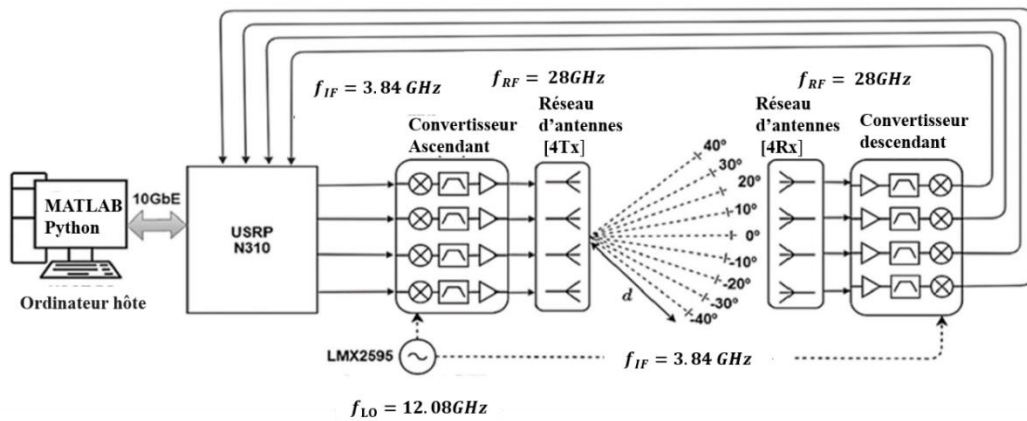


Figure 2. 29 : diagramme d'une application de formation de faisceau en utilisant des cartes USRP

La figure 2.29 représente l'ajout d'un transceiver dans un système de communication basé sur un USRP (Universal Software Radio Peripheral). Le transceiver agit comme une passerelle entre l'antenne et la carte USRP, permettant ainsi au système de communiquer avec les signaux radio, ce qui entraîne une augmentation des pertes d'insertion. Ainsi, L'utilisation d'un transmetteur pour transposer la fréquence jusqu'à la plage de fréquence du USRP peut être une solution abordable et simple à utiliser. Cependant, il existe quelques inconvénients potentiels à considérer, tels que le coût, la complexité, la perte de signal ce qui réduit la puissance du signal reçu par le USRP, et les interférences.

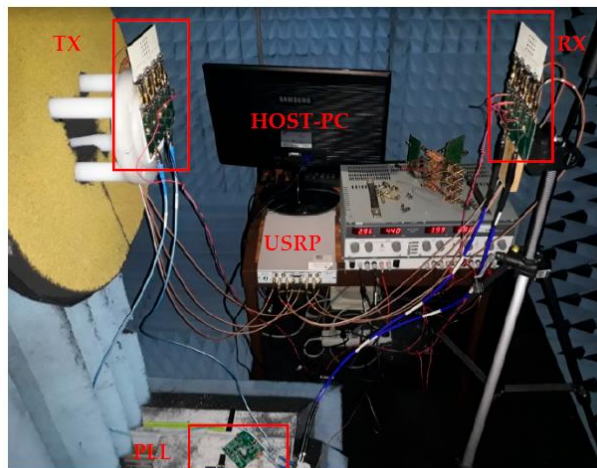


Figure 2. 30: Évaluation expérimentale des capacités de beamforming avec des cartes USRP.

Dans [2.49], les auteurs ont proposé une implémentation d'un réseau d'antennes à phases avec des USRP. Les aspects de calibration concernant les cartes des SDR ont été discutés. La solution déployée utilisait un réseau linéaire plan de quatre éléments testés dans une chambre anéchoïque. Les mesures ont montré qu'un diagramme de rayonnement directionnel pouvait

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

être créé dans les directions de l'émetteur et du récepteur et qu'il pouvait être orienté en appliquant des excitations de phase différentes. Le réseau était composé de quatre éléments d'antennes similaires à fente quart d'onde à extrémité ouverte alimentés par une ligne microruban planaire, tous placés sur le même substrat. L'architecture comprenait 4 USRP connectés au réseau, pouvant fonctionner en tant qu'émetteur ou récepteur. À l'autre extrémité, un seul USRP avec une antenne Vivaldi a été utilisé. Étant donné que la synthèse du diagramme de rayonnement pouvait être réalisée par des excitations de phase ou d'amplitude des éléments individuels, cela nécessitait une synchronisation des pilotes en phase, fréquence et temps. La calibration a été réalisée en utilisant un USRP supplémentaire comme signal de référence et en connectant les ports de sortie des USRP du réseau avec des diviseurs de puissance. De cette manière, en envoyant un signal de calibration de type impulsion à travers une ligne de transmission stable, toutes les phases pouvaient être alignées. En plus de la calibration de phase, une calibration d'amplitude a également été réalisée, avec un ajustement de puissance des USRP. Une fois le système synchronisé, des déphaseurs ont été introduits dans le système pour créer le diagramme de rayonnement souhaité. Les mesures ont été effectuées dans une chambre anéchoïque. Tandis que la puissance maximale de transmission pour l'émetteur était de -37,31 dBm. Les résultats ont montré que les diagrammes de rayonnement obtenus suivaient le diagramme de rayonnement théorique. Les creux obtenus à partir des mesures étaient 10° plus larges que ceux de la théorie, produisant ainsi des largeurs de faisceau plus larges.

La technique de beamforming se révèle être une solution prometteuse pour maintenir une communication robuste entre la station de base et les utilisateurs, comme en témoignent les références. Il convient de noter que le beamforming peut être catégorisé en fonction du niveau de traitement, comme illustré dans la section suivante.

3.2. Classification des techniques de Beamforming

Intégrer un réseau d'antennes dans un système offrant à la fois polyvalence et performances optimales est une tâche ardue. Au cœur du système à réseau d'antennes se trouve l'architecture de formation de faisceau, un schéma de mise en œuvre au niveau des blocs qui peut considérablement améliorer ou entraver les capacités du système en fonction du cas d'utilisation sous-jacent. De nombreuses applications visant à exploiter le concept massif MIMO à bande C pour une efficacité spectrale accrue et une compensation des pertes de trajet présentent au concepteur des compromis significatifs au niveau du système, tels que la capacité totale, la

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

flexibilité des utilisateurs, la complexité de conception et la consommation d'énergie. Trois architectures sont couramment mises en œuvre : numérique, analogique et hybride.

3.2.1. La formation de faisceau numérique (DBF)

La plus performante des trois architectures de formation de faisceau, est largement mise en œuvre dans les systèmes classiques à basse fréquence, permettant ainsi la fonctionnalité MIMO [2.51]. Comme le montre la figure [2.31], chaque antenne est équipée de sa propre chaîne RF, composée de convertisseurs mixtes analogiques-numériques (ADC) et numériques-analogiques (DAC), de circuits de traduction de fréquence et de circuits RF en amont. Le nombre total d'utilisateurs est égal au nombre total d'antennes, permettant au système de fonctionner avec une efficacité spectrale maximale grâce à la pré codification numérique. Dans le cas où le multiplexage spatial n'est pas souhaité, le réseau peut être reconfiguré pour servir un seul utilisateur en exploitant le facteur de réseau afin d'améliorer le gain de l'émetteur-récepteur. Cependant, en raison du grand nombre de chaînes RF, la consommation d'énergie dépasse celle des autres architectures de formation de faisceau pour une même résolution de convertisseur de données, et le passage aux ondes millimétriques montre une relation presque linéaire entre la puissance et la largeur de bande du système [2.8]. De plus, une complexité système accrue entraîne une densification des circuits, une surcharge de traitement du signal et une latence résultante [2.50]. En revanche, le beamforming numérique (DBF) présente les avantages d'une plus grande flexibilité, adaptabilité et performance, mais avec l'inconvénient d'une consommation élevée d'énergie dans les systèmes massifs MIMO, puisque chaque antenne nécessite un émetteur-récepteur. Le DBF trouve ses origines dans les systèmes sonar et RADAR et est une combinaison des avancées réalisées dans les domaines des antennes et de la technologie numérique [2.48-2.49]. Dans le DBF, les signaux RF qui arrivent aux éléments du réseau sont numérisés, puis convertis en deux flux de signaux de bande de base binaires : l'in-phase (I) et le quadrature (Q).

Ces signaux portent des informations sur l'amplitude et la phase des signaux reçus. Le DBF est réalisé en pondérant ces signaux, c'est-à-dire en contrôlant leur amplitude et leur phase de manière à former le diagramme de rayonnement souhaité lorsqu'ils sont additionnés.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

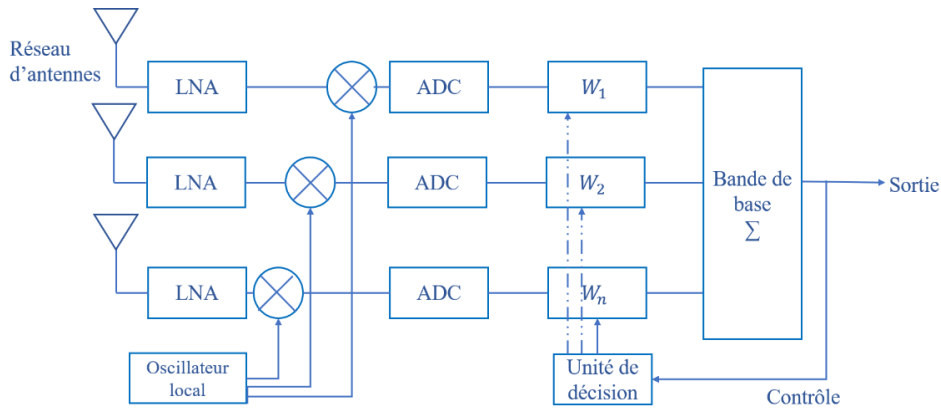


Figure 2. 31: Beamforming numérique

3.2.2. beamforming analogique (ABF)

Dans le beamforming analogique (ABF), le diagramme de rayonnement est généralement obtenu en utilisant des déphaseurs et des diviseurs/combineurs de puissance à l'étage des fréquences radio (RF). Ainsi, l'ABF présente l'avantage d'un coût d'implémentation réduit, notamment lorsqu'un seul faisceau doit être conçu. Cependant, si plusieurs faisceaux sont nécessaires, l'ABF devient complexe. De plus, l'ABF présente l'inconvénient des limitations des composants RF tels que la non-linéarité et la bande passante étroite [2.51]. Une implémentation bien connue de l'ABF est la matrice de Butler. Malgré les avancées dans le domaine numérique, l'ABF reste pertinent aujourd'hui. Dans [2.52], une solution est proposée pour réduire les coûts des systèmes massifs MIMO en remplaçant les déphaseurs RF par des commutateurs RF. La formation de faisceau RF analogique réduit la consommation d'énergie au détriment du support multi-utilisateurs. Cette approche de formation de faisceau RF analogique est largement adoptée et étudiée dans la littérature.

La formation de faisceau dépend des liaisons en ligne de mire, où elle attribue la pondération de l'amplitude et de phase nécessaire à chaque antenne dans le domaine analogique via des atténuateurs variables et des déphaseurs. Cela entraîne un manque de flexibilité de pré-codage et, par conséquent, exerce une plus grande contrainte sur la partie avant RF, limitée par le comportement de gain et la résolution en bits du déphaseur [2.24]. L'ensemble du réseau d'antennes est piloté par une seule chaîne RF, comme illustré dans la figure ci-dessous, ce qui réduit la complexité du système, la densité du routage et la surcharge de traitement du signal, tout en permettant d'importantes économies d'énergie. Par conséquent, la taille du réseau a moins d'impact sur le budget d'énergie, la consommation dépendant uniquement de l'efficacité

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

du module RF, ce qui permet d'avoir un réseau beaucoup plus grand, un rapport signal sur bruit (SNR) plus élevé et une sensibilité réduite aux interférences co-canal [24].

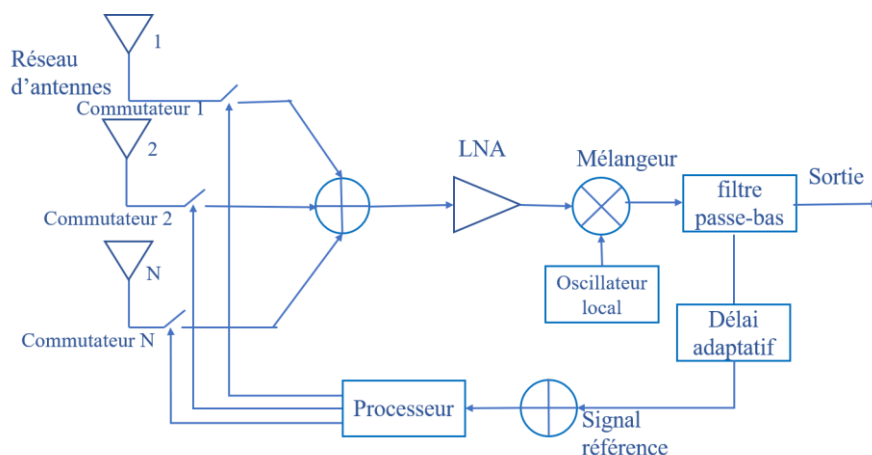


Figure 2. 32: La formation de faisceau analogique.

3.2.3 Beamforming hybride (ABF)

C'est une technique de formation de faisceaux qui combine les avantages du beamforming analogique et du beamforming digital. Le beamforming analogique est utilisé pour contrôler la direction du faisceau à large bande, tandis que le beamforming digital est utilisé pour contrôler la direction du faisceau à bande étroite. La formation de faisceaux hybride cherche à combiner les avantages des deux architectures fondamentales : une efficacité spectrale accrue et une consommation d'énergie minimale.

La figure ci-dessous illustre le principe du beamforming hybride. L'antenne est divisée en plusieurs éléments, chacun étant connecté à un amplificateur ou atténuateur analogique. Les amplificateurs et atténuateurs sont contrôlés par un circuit électronique qui calcule la direction du faisceau souhaité. Le signal RF est ensuite numérisé et traité par un processeur de signal numérique (DSP) qui calcule les coefficients de beamforming pour chaque élément d'antenne. Les coefficients de beamforming sont ensuite appliqués aux amplificateurs ou atténuateurs analogiques pour former le faisceau souhaité. Le beamforming hybride est une technique prometteuse qui offre de nombreux avantages. Cependant, le beamforming hybride est plus complexe et coûteux que le beamforming analogique ou le beamforming digital seul, et il peut générer des interférences [2.53].

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

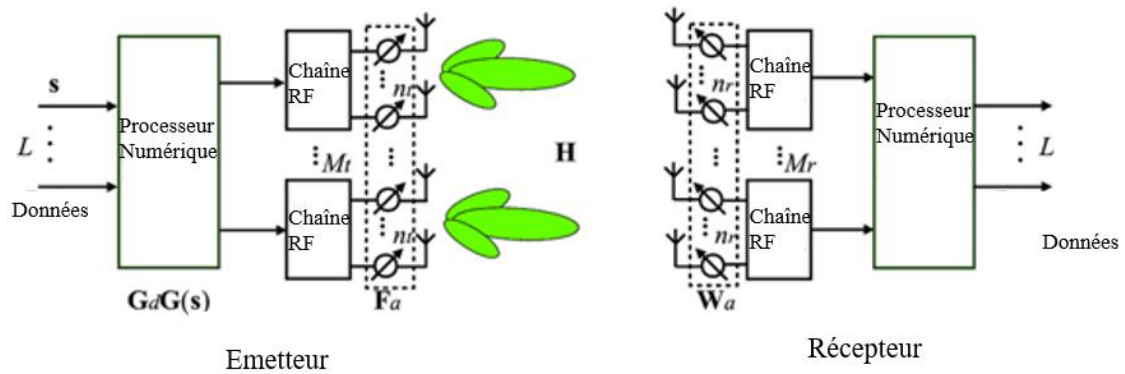


Figure 2. 33: La formation de faisceau Hybride.

	Beamforming analogique	Beamforming numérique	Beamforming hybride
Complexité	Faible	Élevée	Modérée
Coût	Abordable	Élevé	Modéré
Flexibilité	Limitée	Élevée	Élevée
Précision	Limitée	Élevée	Élevée
Consommation d'énergie	Faible	Élevée	Modérée
Adaptabilité	Limitée	Élevée	Élevée

Tableau 2. 3: Tableau comparatif entre les différents types de beamforming.

En conclusion, la preuve est dans le tableau ci-dessus, l'utilisation du beamforming numérique dans les systèmes de communication sans fil offre de nombreux avantages en font un choix attrayant. Les performances améliorées, la flexibilité, la gestion des interférences, l'utilisation efficace du spectre et l'adaptabilité aux conditions variables du canal sont autant de facteurs qui rendent le beamforming numérique supérieur à l'utilisation d'un faisceau standard. Le beamforming numérique permet de manipuler et de diriger les faisceaux d'antenne de manière flexible, ce qui permet d'optimiser la qualité du signal, d'améliorer la couverture et de réduire les interférences. De plus, il permet une utilisation plus efficace du spectre radio, ce qui augmente la capacité du système et optimise l'utilisation des ressources disponibles. Un autre avantage important du beamforming numérique est sa capacité à s'adapter aux conditions variables du canal. Il peut ajuster les faisceaux en temps réel pour s'adapter aux changements de distance, aux obstacles physiques et aux conditions environnementales, ce qui garantit des performances optimales dans différents scénarios de communication. De plus, le beamforming numérique peut être facilement mis en œuvre à l'aide de techniques de traitement numérique du signal et de plates-formes logicielles telles que les radios logicielles (SDR). Cela offre une évolutivité et une facilité de déploiement accrues, permettant des prototypages rapides et des tests flexibles. C'est pour cela que le travail présenté dans ce manuscrit se concentrera

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

uniquement sur les mises en œuvre de la formation de faisceau numérique (DBF) sur des radios logicielles définies par logiciel (SDR).

Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons introduit le contexte général dans lequel s'inscrivent les travaux réalisés dans ce rapport. Nous avons examiné différents types de réseaux d'antennes en fonction de leur rayonnement, de leur agilité et de leurs applications appropriées. Nous avons également souligné que l'utilisation de systèmes d'antennes adaptatives est une approche prometteuse pour améliorer la qualité et la capacité des réseaux de communication sans fil.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté les principaux concepts liés à notre étude. Nous avons brièvement décrit le concept des antennes intelligentes, en expliquant leur structure, leurs types et leurs avantages. Nous avons également abordé les différentes méthodes actuelles de traitement des antennes intelligentes. Parmi ces méthodes, nous avons adopté la technique de formation de voies et d'annulation d'interférences, qui offre un compromis intéressant entre les systèmes à faisceaux commutés et les systèmes adaptatifs.

La deuxième partie de ce chapitre aborde les différents types de synthèse de diagramme de rayonnement. Nous présentons une liste de critères de choix qui pourront être utilisés pour élaborer une sélection efficace d'une nouvelle technique numérique de synthèse de diagramme de rayonnement. Cette section est essentielle pour guider nos travaux de recherche dans le choix et l'implémentation de la méthode la plus appropriée pour notre système d'antennes adaptatives.

Références bibliographiques

[2.1] VAN, V., BARRY, D., et BUCKLEY, K. M., "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering," IEEE ASSP Magazine, vol. 5, no. 2, 1988, pp. 4-24.

[2.2] LIU, W., & WEISS, S., "Wideband beamforming: concepts and techniques," John Wiley & Sons, 2010.

[2.3] Abirami, M., "A review of patch antenna design for 5G," In 2017 IEEE International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE), IEEE, 2017, pp. 1-3.

[2.4] DRISSI, M., BENJELLOUN, N., DESCAMPS, P., et GHARSALLAH, A., "Multilayer antenna dedicated to MIMO Beamforming antenna for 5G telecommunication applications," In 2021 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), IEEE, 2021, pp. 183-188.

[2.5] LEE, K. F., et TONG, K. F., "Microstrip patch antennas—basic characteristics and some recent advances," Proceedings of the IEEE, vol. 100, no. 7, 2012, pp. 2169-2180.

[2.6] WERFELLI, H., TAYARI, K., CHAOUI, M., LAHIANI, M., et GHARIANI, H., "Design of rectangular microstrip patch antenna," In 2016 2nd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), IEEE, 2016, pp. 798-803.

[2.7] NAYNA, T. F. A., BAKI, A. K. M., et AHMED, F., "Comparative study of rectangular and circular microstrip patch antennas in X band," In 2014 International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology, IEEE, 2014, pp. 1-5.

[2.8] DALLI, A., ZENKOUAR, L., et BRI, S., "Comparison of circular sector and rectangular patch antenna arrays in C-band." Journal of Electromagnetic, Analysis and Applications, Vol.4 No.11, 2012.

[2.9] Balanis, C. A., "Antenna theory: analysis and design," John Wiley & Sons, 2016.

[2.10] Ab Wahab, N., Maslan, Z. B., Muhamad, W. N. W., & Hamzah, N., "Microstrip rectangular 4x1 patch array antenna at 2.5 GHz for WiMAX application," In 2010 2nd International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (pp. 164-168). IEEE, 2010.

[2.11] Alsager, A. F., "Design and analysis of microstrip patch antenna arrays," Unpublished Master's Thesis, University College of Boras, Sweden, 2011, pp. 1-80.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

[2.12] Breed, G., "The fundamentals of patch antenna design and performance," High-frequency electronics, 2009, vol. 3, no. 12, pp. 49-51.

[2.13] Singh, I., et Tripathi, V. S., "Microstrip patch antenna and its applications: a survey," Int. J. Comp. Tech. Appl, 2011, vol. 2, no. 5, pp. 1595-1599.

[2.14] Forenza, A., et Heath, R. W., "Benefit of pattern diversity via two-element array of circular patch antennas in indoor clustered MIMO channels," IEEE Transactions on Communications, 2006, vol. 54, no. 5, pp. 943-954.

[2.15] Alzein, H., "Développements de nouvelles architectures d'antennes reconfigurables pour les applications de télécommunications de 5ème génération," Electronique, Université de Limoges, 2020.

[2.16] GUELLIL, N., "Étude et conception d'un réseau d'antennes beamforming à base de la matrice de Butler en utilisant ADS Momentum," mémoire de magister, Université de Sétif 1, 2018.

[2.17] Fonseca, N. J. G., "Étude de Systèmes Micro-ondes d'Alimentation d'Antennes Réseaux pour Applications Multifaisceaux," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 2010.

[2.18] Godara, L. C., "Smart antennas," CRC press, 2004.

[2.19] Chen, W. S., et Lin, Y. C., "Design of 2x2 Microstrip Patch Array Antenna for 5G C-Band Access Point Applications," In 2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM), IEEE, 2018, pp. 1-2.

[2.20] Zehforoosh, Y., Ghobadi, C., et Nourinia, J., "Antenna design for ultra wideband application using a new multilayer structure," PIERS online, 2006, vol. 2, no. 6, pp. 544-549.

[2.21] Drissi, M., Benjelloun, N., Descamps, P., et Gharsallah, A., "Design of digital beamforming for 5G access point Applications," Microw Opt Technol Lett, 2023, pp. 1-10.

[2.22] Hall, P. S., & Vetterlein, S. J., "Review of radio frequency beamforming techniques for scanned and multiple beam antennas," In IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation), 1990, vol. 137, no. 5, pp. 293-303.

[2.23] Ali, E., Ismail, M., Nordin, R., & Abdulah, N. F., "Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: overview, classification, and trends for future research," Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, vol. 18, pp. 753-772.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

[2.24] Beulah, R. E., & Vigneshwari, N., "Design and Simulation of Smart Antenna Array Using Adaptive Beamforming Method," 2014.

[2.25] Rashid, Z. M., & Al-hindawi, A. M., "Design of Adaptive Planar Microstrip Patch Array Operating at 28 GHz for 5G Smart Mobile System," *Science*, 2019, vol. 4, pp. 158-172.

[2.26] Kandasamy, S., Morla, R., & Ricardo, M., "Improving the Performance of IEEE802.11s Networks using Directional Antennas over Multi-Radio/Multi-Channel Implementation—The Research Challenges," 2009.

[2.27] Lian, J.-W., Ban, Y.-L., Zhu, J.-Q., Guo, J., & Chen, Z., "Planar 2-D scanning SIW multibeam array with low sidelobe level for millimeter-wave applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2019, vol. 67, pp. 4570-4578.

[2.28] Lu, R., Yu, C., Zhu, Y., & Hong, W., "Compact millimeter-wave endfire dual-polarized antenna array for low-cost multibeam applications," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2020, vol. 19, pp. 2526-2530.

[2.29] Wang, Y., Ma, K., & Jian, Z., "A low-loss Butler matrix using patch element and honeycomb concept on SISL platform," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2018, vol. 66, pp. 3622-3631.

[2.30] Fonseca, N. J. G., & Ferrando, N., "Nolen matrix with tapered amplitude law for linear arrays with reduced side lobe level," *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona, Spain, 2010*, pp. 1-5.

[2.31] Applebaum, S., "Adaptive arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1976, vol. 24, no. 5, pp. 585-598.

[2.32] Djigan, V. I., "Low complexity partially adaptive antenna array based on Recursive Least Square algorithm," In *2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, IEEE, 2022, pp. 1-5.

[2.33] Núñez-Ortuño, J. M., González-Coma, J. P., Nocelo López, R., Troncoso-Pastoriza, F., & Álvarez-Hernández, M., "Beamforming Techniques for Passive Radar: An Overview," *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 7pp. 3435.

[2.34] Cummings, W. C., "Multiple Beam Forming Networks," *Technical Note, Lincoln Lab.*, 1978.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

[2.35] Smida, A., "Synthèse et implémentation de la méthode de Taguchi Application dans les antennes intelligentes," Mémoire de mastère, Électronique, Laboratoire de Physique de la Matière Molle, Unité de Recherche des Circuits et Systèmes d'Electroniques à Haute Fréquence, FST-Tunis, Tunis, Tunisie, 2013.

[2.36] Bechter, J., Rameez, M., & Waldschmidt, C., "Analytical and Experimental Investigations on Mitigation of Interference in a DBF MIMO Radar," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 65, 2017, pp. 1727-1734.

[2.37] Bechter, J., Eid, K., Roos, F., & Waldschmidt, C., "Digital beamforming to mitigate automotive radar interference," In *Proceedings of the 2016 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*, San Diego, CA, USA, 2016, pp. 1-4.

[2.38] Sturdivant, R. L., Chang, E., Bartholomew, D., Brown, R. A., De Pillis-Lindheim, S., & Rohweller, J. D., "Systems Engineering a Low Cost Digital Beam Formed Phased Array for IoT Connectivity," In *Proceedings of the 2017 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, Las Vegas, NV, USA, 2017, pp. 1393-1395.

[2.39] Gaydos, D., Nayeri, P., & Haupt, R., "Experimental Comparison of Digital Beamforming Interference Cancellation Algorithms using a Software Defined Radio Array," In *Proceedings of the 2019 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)*, Boulder, CO, USA, 2019, pp. 1-2.

[2.40] Diaz, J. D., Salazar-Cerreno, J. L., Ortiz, J. A., Aboserwal, N. A., Lebrón, R. M., Fulton, C., & Palmer, R. D., "A Cross-Stacked Radiating Antenna with Enhanced Scanning Performance for Digital Beamforming Multifunction Phased-Array Radars," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, 2018, pp. 5258-5267.

[2.41] Geng, Z., Deng, H., & Himed, B., "Adaptive Radar Beamforming for Interference Mitigation in Radar-Wireless Spectrum Sharing," *IEEE Signal. Process. Lett.* 2014, vol. 22, pp. 484-488.

[2.42] Peng, Z.; Ran, L.; Li, C. A 24-GHz low-cost continuous beam steering phased array for indoor smart radar. In *Proceedings of the 2015 IEEE 58th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, Fort Collins, CO, USA, August 2015, 2–5; pp. 6–9.

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

[2.43] Wei, Z.; Ng, D.W.K.; Yuan, J. Beamwidth Control for NOMA in Hybrid mmWave Communication Systems. In Proceedings of the ICC 2019—2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), Shanghai, China, May 2019, 20–24; pp. 1–6.

[2.44] Zhang, R.; Zhou, J.; Lan, J.; Yang, B.; Yu, Z. A High-Precision Hybrid Analog and Digital Beamforming Transceiver System for 5G Millimeter-Wave Communication. IEEE Access 2019, 7, 83012–83023.

[2.45] Johnson, M.; Dascuru, A.; Zhan, K.; Galioglu, A.; Adepu, N.; Jain, S.; Krishnaswamy, H.; Natarajan, A. A 4-element 28 GHz Millimeter-wave MIMO Array with Single-wire Interface using Code-Domain Multiplexing in 65 nm CMOS. In Proceedings of the 2019 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), Boston, MA, USA, June 2019, 2–4; pp. 243–246.

[2.46] Pulipati, S.; Ariyar[2.42] Peng, Z., Ran, L., & Li, C., "A 24-GHz low-cost continuous beam steering phased array for indoor smart radar," In Proceedings of the 2015 IEEE 58th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Fort Collins, CO, USA, August 2015, 2–5, , pp. 6–9.

[2.43] Wei, Z., Ng, D. W. K., & Yuan, J., "Beamwidth Control for NOMA in Hybrid mmWave Communication Systems," In Proceedings of the ICC 2019—2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), Shanghai, China, May 2019, 20–24 pp. 1–6.

[2.44] Zhang, R., Zhou, J., Lan, J., Yang, B., & Yu, Z., "A High-Precision Hybrid Analog and Digital Beamforming Transceiver System for 5G Millimeter-Wave Communication," IEEE Access, vol. 7, 2019, pp. 83012–83023.

[2.45] Johnson, M., Dascuru, A., Zhan, K., Galioglu, A., Adepu, N., Jain, S., Krishnaswamy, H., & Natarajan, A., "A 4-element 28 GHz Millimeter-wave MIMO Array with Single-wire Interface using Code-Domain Multiplexing in 65 nm CMOS," In Proceedings of the 2019 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), Boston, MA, USA, June 2–4, 2019, pp. 243–246.

[2.46] Pulipati, S., Ariyarathna, V., De Silva, U., Akram, N., Alwan, E., Madanayake, A., Mandal, S., & Rappaport, T. S., "A Direct-Conversion Digital Beamforming Array Receiver with 800 MHz Channel Bandwidth at 28 GHz using Xilinx RF SoC," In Proceedings of the

Chapitre 2 : Etat de l'art sur les antennes intelligentes pour la 5G

2019 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS), Tel-Aviv, Israel, November 4–6, 2019, pp. 1–5.

[2.47] Campo, C., Stefer, M., Bernard, M., Hengy, S., Boeglen, H., & Paillot, J. M., "Antenna Weighting System for a Uniform Linear Array based on Software Defined Radio," 2017 Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Marseille, 2017, pp. 1-4.

[2.48] Marinho, D., Arruela, R., Varum, T., & Matos, J. N., "Software-Defined Radio Beamforming System for 5G/Radar Applications," *Appl. Sci.*, vol. 10, 2020, p. 7187.

[2.49] Codau, C., et al., "Experimental Evaluation of a Beamforming-capable System using NI USRP Software Defined Radios," 2019 18th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet), Galati, Romania, 2019, pp. 1-6.

[2.50] Fokin, G., Volgushev, D., Kireev, A., Bulanov, D., & Lavrukhin, V., "Designing the MIMO SDR-based LPD transceiver for long-range robot control applications," 2014 6th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2014, pp. 456-461.

[2.51] Zhang, S., Guo, C., Wang, T., & Zhang, W., "On-off Analog Beamforming for Massive MIMO," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, vol. 67, no. 5.

[2.52] Van Trees, H., "Optimum Array Processing," Wiley, New York, 2002.

[2.53] Abdullah, Q., Salh, A., Mohdshah, N. S., et al., "A brief survey and investigation of hybrid beamforming for millimeter waves in 5G massive MIMO systems," *arXiv preprint arXiv*, 2021, pp1699-1710.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

1. Introduction

Avec la prolifération rapide des dispositifs sans fil à haut débit, des technologies et des services offerts sur le marché actuel, la technologie de radio logicielle (Software Defined Radio ou SDR) avec des antennes multiples, telle que le MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), est une avancée majeure dans le domaine des communications sans fil. Cette approche innovante permet d'améliorer considérablement les performances des réseaux sans fil en tirant parti de la diversité spatiale et en exploitant de manière plus efficace les ressources disponibles en utilisant plusieurs antennes d'émission et de réception pour augmenter la capacité du système, améliorer la qualité du signal et réduire les interférences [3.1].

La technologie de radio logicielle (Software Defined Radio ou SDR) multi-antennes se révèle être une avancée remarquable pour les systèmes de communication sans fil. Cette approche permet l'implémentation souple et efficace de configurations à plusieurs antennes sur une plate-forme matérielle programmable. En exploitant la SDR multi-antennes, il devient possible de configurer et de contrôler en temps réel plusieurs ajustements et personnalisations concernant les antennes utilisées, incluant leur nombre, leur emplacement, et leurs techniques de traitement de signal. Cette flexibilité offre la possibilité d'optimiser les performances du système en fonction des caractéristiques changeantes de l'environnement de communication, réduisant ainsi les interférences, améliorant la qualité du signal et maximisant le débit. De plus, la SDR multi-antennes assure la polyvalence nécessaire pour prendre en charge divers protocoles de communication sans fil. Les normes de communication, telles que le Wi-Fi, le LTE, le 5G, contribuant ainsi à la réduction des coûts de développement et de déploiement. En permettant une adaptation constante et une mise en œuvre de nouvelles fonctionnalités, la SDR multi-antennes favorise l'innovation continue dans le domaine des communications sans fil. Cela permet de comparer les performances des différentes normes et de développer des techniques de coexistence entre les protocoles [3.2].

La SDR permet également d'implémenter des techniques avancées de traitement du signal adaptées aux systèmes multi-antennes telles que les techniques de formation de faisceau. Elles peuvent être utilisées pour améliorer la qualité du signal en dirigeant l'énergie vers la direction souhaitée et en réduisant les interférences.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

La technologie de la Radio Logicielle (Software Defined Radio ou SDR) offre une manière flexible et économique à de nombreux chercheurs d'étudier les canaux de communication radio [3.1-3.2]. La génération de signaux, leur modulation et l'émulation de nombreux protocoles de communication populaires peuvent désormais être réalisées grâce à la combinaison SDR/langage de haut niveau Simulink, ce qui facilite l'étude des formes d'onde radio par rapport aux méthodes précédentes.

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la mise en œuvre et la conception de systèmes SDR en utilisant Simulink pour les communications radio. Plus précisément, nous présentons 4 configurations importantes. Ces configurations sont conçues pour effectuer des mesures à proximité de sujets humains.

Le système SISO (Single-Input Single-Output) : SISO fait référence à un système de communication où il y a une seule antenne d'émission et une seule antenne de réception. Cela signifie qu'il y a un seul signal entrant dans le système et un seul signal sortant. Il s'agit donc d'une configuration simple avec une seule voie de communication.

Le système 2x1 MISO (Multiple-Input Single-Output) : MISO se réfère à un système de communication où il y a plusieurs antennes d'émission mais une seule antenne de réception. Dans cette configuration, plusieurs signaux sont émis à partir de différentes antennes, mais ils sont combinés en un seul signal à la réception. Cela permet d'améliorer la qualité et la robustesse du signal en exploitant les avantages de la diversité spatiale

Le système 1x2 SIMO se réfère à une configuration dans laquelle une seule antenne émettrice envoie des signaux à deux antennes réceptrices. Cette configuration permet d'étudier les caractéristiques de propagation des signaux dans des scénarios hors du corps, où le corps humain peut avoir un impact significatif sur la propagation des ondes radio.

Le système 2x2 MIMO implique deux antennes émettrices et deux antennes réceptrices en utilisant un nouveau schéma de transmission de deux flux de données indépendants sur plusieurs antennes. En utilisant Simulink en conjonction avec la technologie SDR, les chercheurs peuvent mettre en œuvre et évaluer les performances du schéma dans des scénarios de communication radio.

2. Les systèmes multi-antennes

Les systèmes multi-antennes, tels que les systèmes SISO (Single-Input Single-Output), MISO (Multiple-Input Single-Output), SIMO (Single-Input Multiple-Output) et MIMO

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

(Multiple-Input Multiple-Output), jouent un rôle crucial dans les communications sans fil modernes en améliorant la performance et la fiabilité des transmissions. Chacun de ces systèmes présente des caractéristiques distinctes :

SISO (Single-Input Single-Output) : C'est le scénario le plus simple, avec une seule antenne à l'émetteur et une seule antenne au récepteur. Il convient aux applications de base, mais il est limité en termes de capacité et de résilience aux interférences [3.1-3.5].

MISO (Multiple-Input Single-Output) : Dans ce cas, il y a plusieurs antennes à l'émetteur mais une seule antenne au récepteur. Le MISO permet d'améliorer la qualité du signal reçu en utilisant la diversité spatiale pour réduire les effets de l'affaiblissement du canal.

SIMO (Single-Input Multiple-Output) : C'est l'inverse du MISO, avec une seule antenne à l'émetteur mais plusieurs antennes au récepteur. Le SIMO est utile pour exploiter la diversité spatiale et réduire le bruit et les interférences [3.1-3.5].

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) : Dans un système MIMO, tant l'émetteur que le récepteur disposent de plusieurs antennes. Cette configuration permet d'exploiter à la fois la diversité spatiale et le multiplexage spatial, ce qui se traduit par une amélioration significative de la capacité, de la fiabilité et de la résistance aux interférences [3.1-3.7].

L'implémentation de systèmes de communication sur des plates-formes SDR (Software Defined Radio) constitue un atout essentiel dans le domaine des communications sans fil. Les SDR offrent une flexibilité inégalée pour concevoir, tester et déployer des systèmes de communication personnalisés. Grâce à leur capacité à être reconfigurés via des logiciels, les SDR permettent aux ingénieurs et aux chercheurs d'itérer rapidement sur des prototypes, de s'adapter aux évolutions des normes de communication et de créer des solutions sur mesure pour diverses applications. De l'éducation à la recherche en passant par le déploiement sur le terrain, les SDR jouent un rôle clé en offrant un environnement d'expérimentation réaliste qui tient compte des conditions du monde réel. En réduisant les coûts de développement et en accélérant le cycle de développement, les SDR contribuent à la création de systèmes de communication plus efficaces, flexibles et adaptés aux besoins changeants du secteur des télécommunications. Les SDR offrent la flexibilité nécessaire pour ajuster les paramètres des antennes, les algorithmes de traitement du signal et les schémas de modulation en temps réel. Cela permet de tester l'efficacité des systèmes multi-antennes dans des environnements réalistes

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

et d'optimiser leurs performances pour répondre aux besoins spécifiques des applications, telles que les réseaux 5G, les communications sans fil à haute vitesse, la télédétection, la navigation et bien d'autres [3.8-3.12]

3. SOFTWARE DEFINED RADIO

3.1. Définition

Une radio logicielle (SDR - Software Defined Radio) est un système radio dans lequel les composants traditionnellement implémentés en matériel (par exemple, les mélangeurs, les filtres, les amplificateurs, les modulateurs/démodulateurs, les détecteurs, etc.) sont plutôt implémentés à l'aide de logiciels sur un ordinateur personnel ou des dispositifs informatiques intégrés [3.12]. L'avantage principal d'un SDR est sa reconfigurabilité. En mettant en œuvre les fonctions radio par logiciel plutôt que par matériel, il devient plus simple de reconfigurer un dispositif radio pour différents cas d'utilisation sans avoir besoin de redessiner le matériel pour prendre en charge de nouvelles fonctionnalités. Avec l'évolution rapide des protocoles et des normes sans fil, un dispositif radio matériel pourrait devenir obsolète en raison de son incapacité à se conformer aux nouvelles normes ou protocoles. En revanche, un SDR pourrait être reconfiguré pour prendre en charge de nouvelles normes qui n'existaient peut-être pas au moment où le dispositif a été construit. Cette flexibilité est attrayante pour les fabricants, car elle leur permet de mettre à jour leur produit SDR par le biais de logiciels, sans nécessairement avoir besoin de changer le matériel de la radio [3.11].

Récemment, les architectures de prototypage rapide pour les radios logicielles (Software Defined Radios ou SDR) sont devenues populaires pour plusieurs raisons. Elles sont utilisées comme une étape importante dans le développement de systèmes dédiés. Ces architectures sont également essentielles à des fins de recherche et de développement.

Le temps total de développement d'un système SDR dédié et hautement optimisé, comprenant le matériel, les logiciels et les intergiciels (pilotes de périphériques et interfaces), ainsi que le processus de débogage, peut être très long, en particulier si le système combine différentes technologies de bande de base telles que les FPGA, les DSP et les ASIC [3.13]

Le temps de développement d'un nouveau système basé sur SDR (Software Defined Radio) peut avoir un impact sur son coût, en grande partie grâce à la flexibilité, la programmabilité et la réutilisabilité inhérentes aux SDR et sa forme ou sa consommation d'énergie. Le prototypage rapide est donc essentiel pour identifier les problèmes potentiels et réduire les risques liés au

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

développement du produit. Il s'agit souvent d'une mise en œuvre "rapide et simple" des composants critiques d'un système. Dans un effort de prototypage rapide, la consommation d'énergie et la taille sont généralement moins importantes que le temps de mise en œuvre.

De plus en plus souvent, les personnes utilisent des plates-formes toutes faites pour développer des systèmes de radios logicielles (SDR). Ces plates-formes sont créées par des entreprises comme Pentek, Sundance, Spectrum Signal Processing, Lyrtech, et d'autres. Elles sont utiles car elles contiennent à la fois les pièces matérielles et les logiciels nécessaires pour construire un système SDR. Cependant, certaines de ces solutions sont compliquées et coûteuses. Pour la recherche académique et l'enseignement en laboratoire, une plate-forme de test plus simple et abordable est préférable.

Il est donc important de disposer de plates-formes de prototypage rapide pour les SDR afin de faciliter le développement, de réduire les risques et de favoriser la réutilisation des ressources matérielles et logicielles. Ces plates-formes offrent une solution plus abordable et plus accessible pour la recherche académique et l'expérimentation en laboratoire.

3.2. Architectures et bancs d'essai pour les SDR

Récemment, les architectures pour le prototypage rapide de SDR sont devenues populaires pour plusieurs raisons. Elles sont utilisées comme une étape importante dans le développement de systèmes dédiés. Ces architectures sont également essentielles à des fins de recherche et développement. Tout d'abord, elles permettent de réduire considérablement le temps de développement en utilisant des composants matériels et logiciels préconçus et réutilisables. Cette approche permet aux ingénieurs de se concentrer davantage sur les fonctionnalités spécifiques de leur application plutôt que de concevoir tout le système depuis zéro. De plus, la flexibilité et la reconfigurabilité des SDR basés sur des logiciels offrent une solution attrayante pour s'adapter rapidement aux évolutions des normes et des technologies sans fil. En utilisant principalement des logiciels pour implémenter les fonctionnalités radio, il devient plus facile de mettre à jour le système et d'ajouter de nouvelles fonctionnalités sans changer le matériel. Cette approche permet également de réduire les coûts de développement en utilisant des composants standardisés, tout en facilitant la recherche et l'innovation dans le domaine des communications sans fil. En somme, les architectures de prototypage rapide de SDR offrent une solution souple, économique et rapide pour le développement de systèmes de communication radio avancés [3.12]

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

Le temps de développement total pour un système SDR dédié et hautement optimisé, comprenant le matériel, les logiciels et les intergiciels (pilotes de périphériques et interfaces), et surtout le processus de débogage, peut être très long, en particulier si le système combine différentes technologies de bande de base telles que les FPGA, les DSP et les ASIC. Le temps de développement d'un nouveau système peut être plus important que son coût, son facteur de forme ou sa consommation d'énergie.

Le prototypage rapide est extrêmement important pour identifier d'éventuels problèmes et réduire les risques liés au développement de produits. Le prototypage rapide consiste souvent en une mise en œuvre "rapide et sommaire" des composants critiques d'un système. Dans ce type d'effort de prototypage, la consommation d'énergie et la taille sont généralement moins importantes que le temps de mise en œuvre.

De plus en plus souvent, conformément aux principes de réutilisation matérielle et logicielle, les systèmes SDR sont mis en œuvre à l'aide de bancs d'essai déjà développés. Plusieurs plates-formes commercialement disponibles sont proposées par des entreprises telles que Pentek, Sundance, Spectrum Signal Processing, Lyrtch, et d'autres. Certaines entreprises proposent des bancs d'essai SDR composés de modules matériels et logiciels. Cependant, ces solutions sont souvent complexes et coûteuses.

Plate-forme SDR	Avantages	Inconvénients	Prix approximatif	Vitesse d'échantillonnage (duplex intégral)	Plage de fréquences	Nombre de canaux
USRP	- Haute flexibilité et reconfigurabilité, large bande passante et large gamme de fréquences, support et documentation solides	- Coût élevé	Élevé	Jusqu'à plusieurs centaines de MS/s	Dépend du modèle Généralement de 10MHz/70 MHz jusqu'à 6 GHz	Variabile
HackRF One	- Coût abordable, open-source et communauté active,	- Bande passante limitée (20 MHz),	Environ 300 \$	20 MS/s	1 MHz - 6 GHz	1

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

	portabilité et compact	moins performant dans des environnements bruités, faible puissance de sortie				
LimeSDR	- Large bande passante (30.72 MHz), support des fréquences jusqu'à 3.8 GHz, émetteur-récepteur MIMO 2x2	- Complexité du logiciel et de la configuration, sensibilité au bruit RF	Environ 299 \$	30.72 MS/s	100 kHz - 3.8 GHz	2
BladeRF	- Haute qualité de signal et faible bruit, excellente performance RF, large gamme de fréquences (300 MHz - 3.8 GHz)	- Coût relativement élevé, configuration avancée requise	Environ 420 \$	40 MS/s	300 MHz - 3.8 GHz	1 (peut être étendu à 2)
RTL-SDR	- Coût très abordable, populaire et largement utilisé dans les projets amateurs, facilité d'utilisation et d'intégration avec des logiciels	- Bande passante limitée (2.8 MHz) -sensibilité limitée -Faible puissance de sortie (voire négligeable. 0,1 (mW))	Environ 20 \$	2.8 MS/s	24 MHz - 1.7 GHz	1

Tableau 3. 1 : Tableau comparatif entre les différents types des cartes SDR

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

Les applications MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) et beamforming requièrent une sélection minutieuse de la carte SDR, un choix qui peut avoir un impact décisif sur le succès global du projet. Parmi les options couramment envisagées telles que le HackRF One, le LimeSDR, le BladeRF et le RTL-SDR, l'USRP se positionne fréquemment en tête en raison de plusieurs facteurs essentiels. Tout d'abord, l'USRP se distingue par sa flexibilité et sa reconfigurabilité avancées, permettant l'ajustement précis des paramètres pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application. De plus, sa large bande passante exceptionnelle, pouvant atteindre 120 MHz, et sa gamme de fréquences étendue de 10 MHz à 6 GHz offrent un terrain fertile pour explorer une variété de spectres de fréquences. En termes de performance RF, l'USRP excelle avec une sensibilité élevée et une qualité de signal supérieure, des attributs indispensables pour garantir une réception et une transmission précises dans les scénarios complexes du MIMO et du beamforming [3.14]

De plus, l'USRP bénéficie d'un support technique solide de la part du fabricant (Ettus Research) ainsi que d'une documentation complète, ce qui facilite la prise en main et le développement d'applications MIMO et beamforming. Enfin, l'USRP offre également une évolutivité et une extensibilité intéressantes, avec la possibilité d'utiliser plusieurs cartes en parallèle pour créer des systèmes MIMO à grande échelle. Il est compatible avec des accessoires supplémentaires tels que des amplificateurs de puissance et des filtres, ce qui permet d'étendre ses capacités en termes de puissance de sortie et de filtrage [3.15].

4. LE PÉRIPHÉRIQUE RADIO LOGICIEL UNIVERSEL

4.1. Introduction à l'USRP

Le Périphérique Radio Logiciel Universel, ou USRP, de Ettus Research, est un périphérique matériel reconfigurable qui permet aux ordinateurs à usage général de fonctionner comme des radios logicielles à large bande passante [3.13]. Il existe des USRP connectés par bus qui se connectent à un PC hôte via une connexion USB 2.0, des USRP connectés au réseau qui se connectent à un PC hôte via Ethernet, et des dispositifs USRP intégrés qui possèdent un système d'exploitation Linux intégré et ne nécessitent pas de PC externe. Pour cette recherche, un USRP connecté par bus est utilisé et sera désigné par la suite simplement comme "USRP".

L'USRP associé à un ordinateur hôte crée un système SDR complet. Dans un SDR basé sur USRP, le rôle de l'ordinateur hôte est d'effectuer tout le traitement de la bande de base et spécifique à la forme d'onde, tel que le filtrage, la modulation et la démodulation, tandis que l'USRP effectue la conversion numérique haute vitesse de la bande de base à la fréquence

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

intermédiaire (IF) à l'aide du FPGA intégré, puis de l'IF à la fréquence radio (RF) à l'aide d'une carte fille RF analogique.

4.2. Caractéristiques de l' USRP

Le USRP est composé d'une carte mère et de jusqu'à quatre cartes filles modulaires. La carte mère du USRP implémente une fréquence intermédiaire numérique (IF) et dispose de quatre convertisseurs analogiques-numériques (CAN) 12 bits, 64 échantillons/secondes et de quatre convertisseurs numériques-analogiques (CNA) 14 bits.

Le USRP est équipé de quatre convertisseurs numériques-analogiques (CNA) 128 échantillons/seconde et de quatre convertisseurs analogiques-numériques (CAN) 12 bits, 64 échantillons/seconde. Ces quatre canaux d'entrée et de sortie sont connectés à la FPGA principale. La FPGA est reliée à un ordinateur hôte via USB 2.0 pour établir la liaison de données entre le USRP et l'ordinateur hôte.

Les cartes filles modulaires du USRP fournissent l'accès du USRP au monde RF (Radiofréquence). Les cartes filles contiennent l'interface analogique RF et les opérations de mélange IF (Fréquence Intermédiaire) pour le SDR (Radio Logicielle), comme l'illustre la figure ci-dessous. Il existe plusieurs cartes filles différentes pour le USRP, chacune conçue pour une bande de fréquence spécifique avec une fréquence centrale accordable par logiciel. Le USRP dispose d'une large collection de cartes filles couvrant la plage de fréquences de DC à 4,4 GHz.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

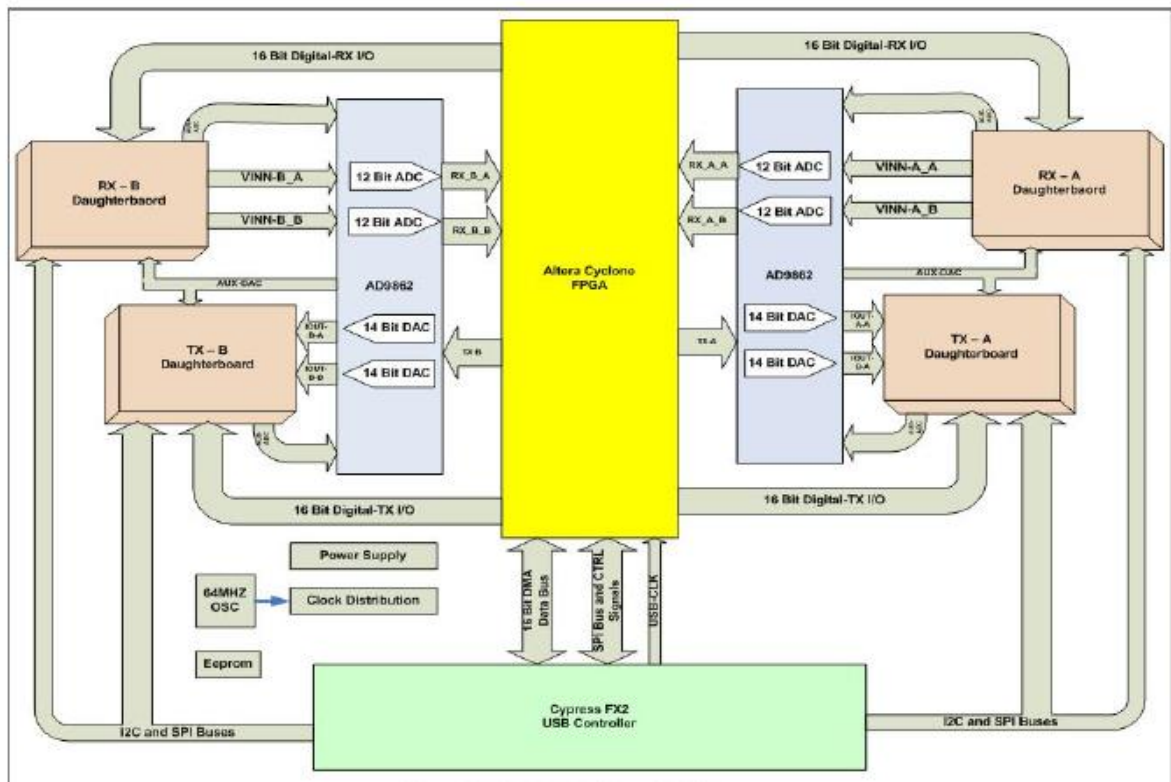


Figure 3. 1 : Schéma global du carte USRP

Les limitations de bande passante d'un USRP connecté par bus sont dictées par le débit maximal de la technologie de connexion utilisée et la puissance de traitement de l'ordinateur hôte. Pour une connexion USB 2.0, le USRP peut maintenir un débit de données de 256 Mbps (32 Mo/s) (les surcharges telles que les en-têtes de paquets, le temps entre les paquets, etc. réduisent le débit maximal de l'USB 2.0 de 480 Mbps à 256 Mo/s). Le format des données complexes en quadrature (IQ) envoyées à l'ordinateur hôte est de 16 bits en phase et 16 bits en quadrature, ce qui équivaut à 4 octets par échantillon complexe. Par conséquent, le débit de données maximal pour les données IQ de bande de base est de 8 millions d'échantillons par seconde ($32 \text{ MS/s} / 4 \text{ octets} = 8 \text{ MS/s}$), ce qui correspond à une largeur de bande maximale de 8 MHz selon le théorème d'échantillonnage de Nyquist pour l'échantillonnage complexe. Bien que le taux d'échantillonnage maximal via la connexion USB soit de 8 MS/s, le véritable taux d'échantillonnage maximal que l'ordinateur hôte est capable de gérer dépend des capacités de traitement de données de l'ordinateur hôte. Si le taux d'échantillonnage est trop élevé pour que l'ordinateur hôte traite correctement les données, le USRP doit changer le taux d'échantillonnage par interpolation et décimation.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

L'USRP B210 se démarque de manière significative parmi les cartes SDR pour les applications MIMO et beamforming en raison de plusieurs caractéristiques essentielles. Tout d'abord, sa flexibilité est remarquable : il offre la possibilité d'ajuster précisément les paramètres RF pour répondre aux exigences spécifiques de chaque projet. Cette adaptabilité est cruciale pour les applications où la configuration précise des paramètres est nécessaire pour optimiser les performances. En ce qui concerne les performances RF, Sa plage de fréquences étendue de 70 MHz à 6 GHz offre une flexibilité essentielle pour s'adapter à différentes bandes de fréquences. Avec une largeur de bande de 56 MHz et une connexion USB 3.0, il peut maintenir des débits de données d'environ 200 Mbps à 400 Mbps, favorisant des opérations efficaces. Doté d'une sensibilité RF typique allant de -100 dBm à -120 dBm, l'USRP B210 capte efficacement les signaux faibles, essentiels dans les scénarios MIMO et beamforming. Sa qualité de signal, caractérisée par un SNR supérieur à 70 dB et une distorsion harmonique généralement en dessous de -50 dBc, assure des transmissions précises. Avec une précision temporelle de quelques nanosecondes, il garantit une synchronisation fiable entre les antennes. En outre, l'USRP B210 est évolutif, permettant de créer des systèmes MIMO complexes en combinant plusieurs unités. Ces attributs font de l'USRP B210 un choix bien équilibré pour des projets MIMO et beamforming exigeants, tout en prenant en compte les variations possibles en fonction des conditions et des configurations spécifiques.

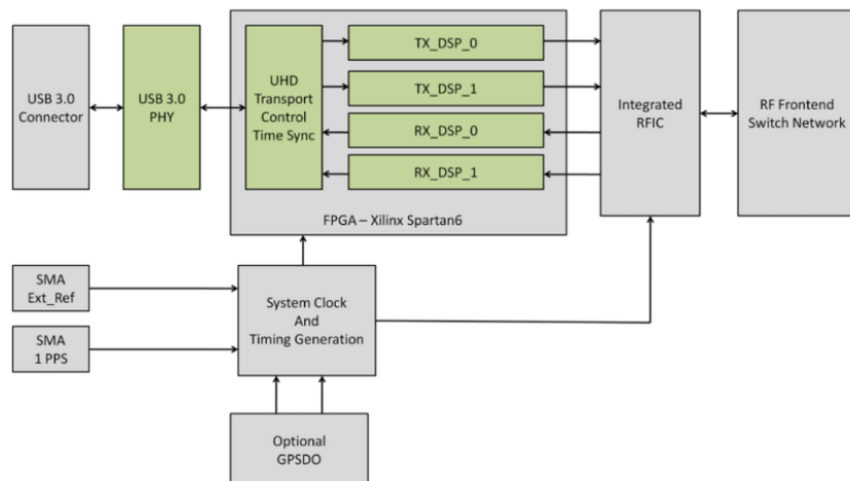


Figure 3. 2: diagramme fonctionnel général de la carte USRP B210.

Grâce à son oscillateur à quartz hautement précis (d'environ $\pm 1,5$ ppm (parts per million)) il assure une synchronisation précise entre les canaux, ce qui est essentiel pour le MIMO et le beamforming. Sa portabilité le rend facilement transportable pour des expérimentations sur le

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

terrain. Le support logiciel fourni, tel que le logiciel UHD et la compatibilité avec des frameworks populaires, simplifie le développement des applications SDR. De plus, sa capacité d'évolutivité permet d'étendre le système en utilisant plusieurs cartes en parallèle pour créer un système MIMO à grande échelle. Il est important de noter que le choix de l'USRP B210 dépend des exigences spécifiques de votre projet, et une évaluation approfondie est recommandée pour sélectionner la meilleure carte pour votre application MIMO et beamforming.

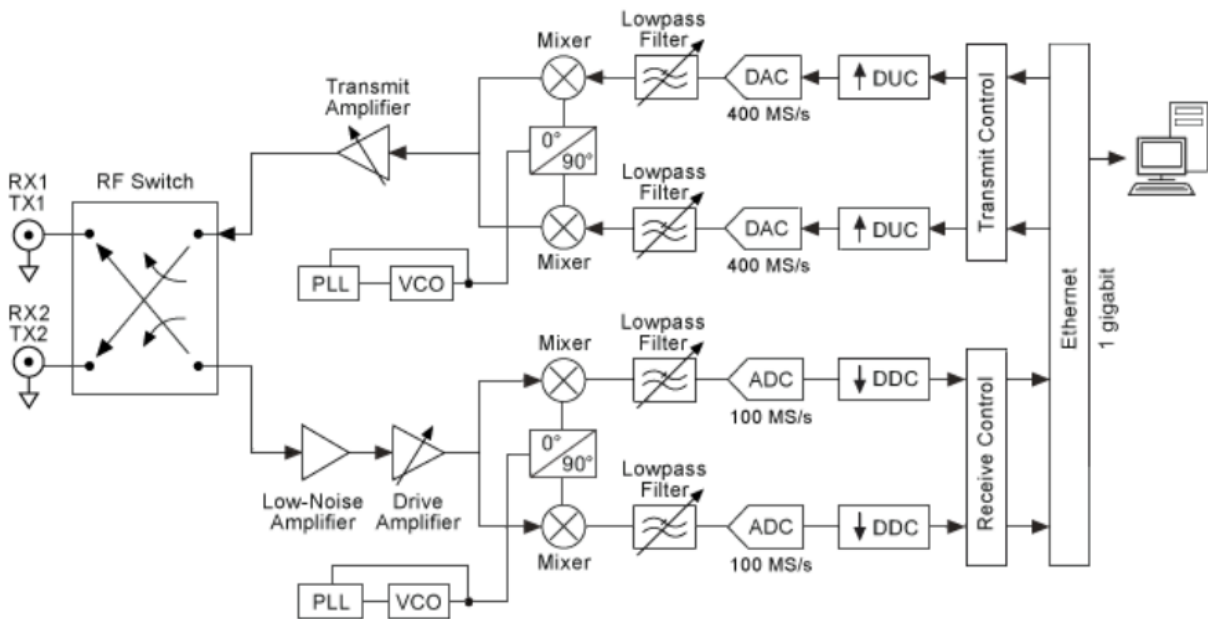


Figure 3. 3: Schémas bloc de la carte USRP B210.

La plateforme Agilent (USRP) est une plateforme polyvalente pour la radio logicielle, qui permet aux utilisateurs de construire et de prototyper des systèmes de communication radio à l'aide d'une large gamme d'outils logiciels. Elle a été sélectionnée pour sa polyvalence, sa modularité, ses performances élevées, sa consommation d'énergie et son rapport coût-efficacité par rapport à d'autres dispositifs. Pour notre banc d'essai, l'USRP B210 était un choix de premier ordre car il fonctionne en mode duplex intégral, ce qui permet de transmettre et de recevoir des signaux sur des canaux séparés, et il dispose d'un front-end RF intégré avec deux canaux de réception (RX) et deux canaux de transmission (TX). Ainsi, il est possible d'étudier n'importe quel système multi-antenne en intervenant à n'importe quelle étape de la transmission (RF, fréquence intermédiaire ou bande de base) et il offre une capacité MIMO 2x2 entièrement cohérente.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

4.3. Logiciels Compatibles

Le USRP et l'ordinateur hôte constituent la partie matérielle du système SDR, mais pour qu'ils interagissent, l'ordinateur hôte doit exécuter un logiciel compatible. L'ordinateur hôte peut contrôler le USRP à l'aide de logiciels tels que le package logiciel GNU Radio ou Matlab Simulink. Les deux logiciels offrent un moyen de contrôler les paramètres reconfigurables du USRP tels que la sélection d'antenne, la fréquence centrale RF, le gain et le taux d'échantillonnage, ainsi que de définir l'opération de bande de base du système radio [3.16].

4.3.1. GNU Radio

GNU Radio (GR) est une boîte à outils de développement de logiciels libre qui fournit le runtime de traitement de signal et les blocs de traitement pour implémenter des radios logicielles à l'aide de matériels RF externes facilement disponibles et peu coûteux, tels que le USRP. GNU Radio est nativement pris en charge par le système d'exploitation Linux, avec un certain support pour les systèmes d'exploitation Mac et Windows avec des modifications. GNU Radio a gagné en popularité dans le milieu universitaire en raison de sa nature open-source et de sa communauté d'utilisateurs diversifiée [3.17].

Les applications GNU Radio sont sous la forme de graphiques de flux (flow graphs), une série de blocs interconnectés allant d'un bloc source à un bloc puits (sink block). Un bloc dans GNU Radio est un morceau de logiciel écrit dans le langage C++ et conçu pour implémenter une fonction spécifique, telle que le filtrage, la modulation, la génération de signaux ou l'affichage graphique. Un graphique de flux GNU Radio est écrit dans le langage de programmation Python pour fournir un niveau d'abstraction plus élevé par rapport aux blocs C++, afin de simplifier et d'optimiser la construction et l'implémentation d'un graphique de flux [3.18].

4.3.2. GNU Radio et le USRP

GNU Radio peut être interfacé avec le USRP pour créer un système de radio logicielle définie par logiciel (SDR). Le USRP remplit les fonctions RF et IF d'un SDR, tandis que GNU Radio effectue toutes les fonctions de bande de base et reconfigure le USRP. GNU Radio contrôle le USRP à travers le pilote matériel universel (UHD). L'UHD fournit un pilote hôte et une interface de programmation d'application (API) pour le USRP. GNU Radio utilise l'UHD pour modifier les paramètres spécifiés par l'utilisateur tels que la fréquence centrale RF, la sélection d'antenne, le gain et les paramètres d'interpolation ou de décimation. Ces paramètres

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

sont définis par l'utilisateur en Python, et le niveau inférieur du C++ transmet les données à l'API UHD, qui les traduit ensuite pour le FPGA du USRP.

Avec le USRP et GNU Radio, on peut créer un émetteur, un récepteur ou un système émetteur-récepteur (transceiver) SDR. Un schéma bloc d'un émetteur SDR basé sur le USRP construit en utilisant un graphique de flux GNU Radio est illustré dans les figures ci-dessous.

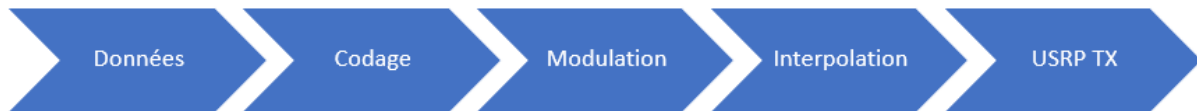


Figure 3. 4: Architecture d'un émetteur

Dans la Figure ci-dessous, on peut voir un schéma bloc représentant un récepteur. GNU Radio offre également divers blocs de sortie graphiques (blocs sink) qui permettent de visualiser les données à différents endroits du flux de signal, que ce soit dans le domaine temporel ou fréquentiel."

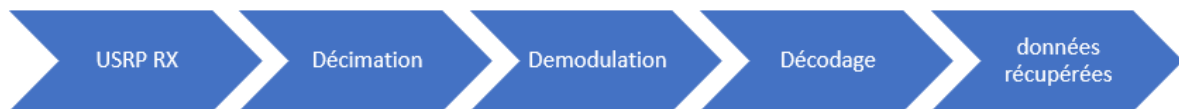


Figure 3. 5: Architecture d'un récepteur

4.3.3. Simulink-USRP

Un autre package logiciel compatible avec le USRP est le bloc Simulink-USRP. Simulink-USRP est utilisé avec Matlab Simulink et a été développé et mis à disposition par le Laboratoire d'Ingénierie des Communications de l'Institut de Technologie de Karlsruhe [3.5]. Simulink-USRP permet à Matlab Simulink de contrôler le USRP et de transférer des données entre un ordinateur hôte et le USRP. Simulink-USRP permet à l'utilisateur de traiter les données du USRP en temps réel en utilisant les nombreuses fonctions intégrées de Matlab et Simulink que de nombreux ingénieurs connaissent bien.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

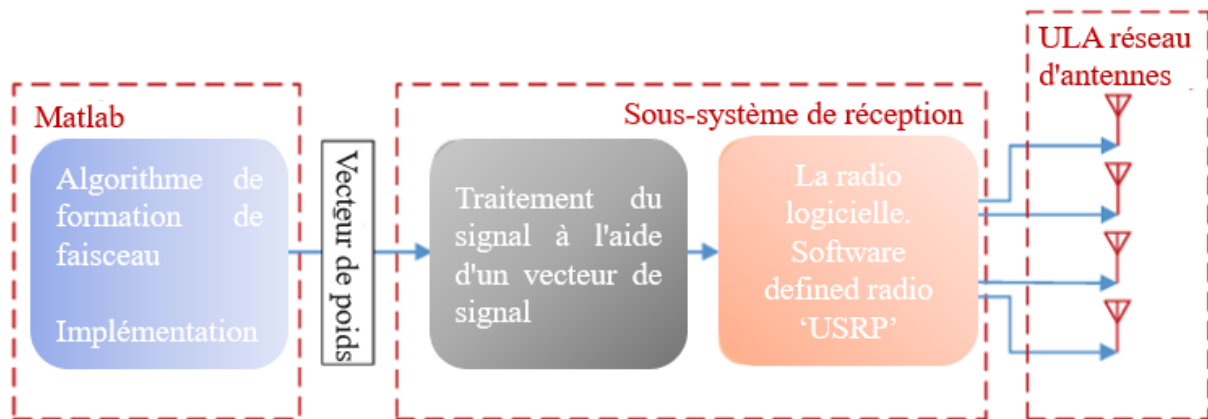


Figure 3. 6 : Schéma de traitement des données avec MATLAB et USRP

Tout comme avec GRC (GNU Radio Companion), Simulink offre un environnement graphique pour construire un système SDR avec le USRP en utilisant des blocs source (source blocks) et puits (sink blocks) USRP. Comme avec GNU Radio, les paramètres reconfigurables du USRP peuvent être définis à travers le logiciel. Dans Simulink-USRP, les blocs source et puits USRP sont utilisés pour définir des paramètres tels que le gain, la fréquence centrale et le taux d'échantillonnage du USRP, par l'intermédiaire de la décimation et de l'interpolation, respectivement. Les blocs source et puits USRP passent les données sous forme de vecteurs et la taille du vecteur doit également être définie [3.20].

Un avantage clé de l'implémentation avec Simulink-USRP est la capacité de traitement en temps réel des données. Si un traitement supplémentaire des données est nécessaire, les données peuvent être directement transmises à Matlab sans avoir besoin d'être écrites dans un fichier au préalable. De plus, le modèle Simulink peut être contrôlé depuis Matlab, ce qui permet une implémentation et une analyse automatisées des données.

5. Implémentation

5.1. Introduction

Lors de la configuration d'une carte USRP (Universal Software Radio Peripheral) avec MATLAB, on suit plusieurs étapes pour établir une connexion fonctionnelle. Pour commencer, on s'assure d'avoir installé les outils nécessaires, y compris la boîte à outils "Communications System Toolbox" dans MATLAB. La première étape typique pour détecter la carte USRP et vérifier sa disponibilité consiste à utiliser la fonction `findsdru` fournie par la boîte à outils, l'ordinateur recherchera les radios logicielles connectées et testera leurs connexions. Le modèle NI USRP-2901 est identifié comme B210, avec un numéro de série qui peut également être trouvé au bas de l'appareil.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

```
>> findsdru
Checking radio connections...

ans =

    struct with fields:
        Platform: 'B210'
        IPAddress: ''
        SerialNum: '3218C74'
        Status: 'Success'

>> findsdru
Checking radio connections...

ans =

    struct with fields:
        Platform: 'B210'
        IPAddress: ''
        SerialNum: '3218C81'
        Status: 'Success'
```

Figure 3. 7 : Détection de deux cartes.

Le B210 est un produit fabriqué par Ettus Research, une filiale de National Instruments, qui correspond au modèle USRP-2901. Cette fonction permet d'identifier les périphériques USRP connectés au système et de récupérer leurs informations, y compris le numéro de série, le modèle et les informations de statut. Si l'utilisateur souhaite obtenir des informations plus détaillées sur la radio logicielle utilisée, la commande probesdru permet d'afficher des informations précises sur les ports émetteurs et récepteurs de la radio logicielle. La figure cidessous présente le modèle d'appareil utilisé dans ce travail.

Cela nous aide à nous assurer que notre carte USRP est reconnue et prête à être utilisée avec MATLAB. Suite à cette étape, on peut procéder à la configuration et à l'utilisation de sa carte USRP pour des expérimentations en radio logicielle [3.1-3.2].

5.2. La plateforme de tests et de mesures

Dans le cadre du développement d'un prototype SDR, l'utilisation de plates-formes de test permettant de tester rapidement et de valider les performances de toute fonction numérique ou analogique du récepteur, à la fois en simulation et en mesure, semble tout à fait raisonnable. Nous avons donc développé une plateforme de test basée sur Simulink et les outils USRP B210. Cet équipement fonctionne à une fréquence de 3,48 GHz. Ces équipements sont connectés à une antenne multicouches conçue à cet effet.

La plateforme de tests et de mesures utilisée pour la validation des résultats a été réalisée dans le laboratoire IRSEEM sans aucun élément ajouté entre l'émetteur (Tx) et le récepteur (Rx), qui sont espacés d'une distance de 1 mètre. En fait, comme montre [3.7] la figure un signal sinusoïdal de fréquence 1 MHz généré avec Simulink est combiné avec d'autres blocs Simulink et la boîte à outils USRP pour effectuer une modulation d'amplitude avec une porteuse de 3,48 GHz, qui est la fréquence résonante de l'antenne multicouches. La connexion du PC hôte

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

(MATLAB) à l'USRP B210 permet aux utilisateurs de contrôler, de communiquer avec l'USRP et de fournir des fonctions pour régler les paramètres tels que la fréquence centrale, le taux d'échantillonnage et le gain. Elle comprend également des outils pour la transmission et la réception de données utilisant différentes techniques de modulation, ainsi que pour le traitement et l'analyse des signaux reçus. Les USRP B210 sont à leur tour connectés à ces antennes conçues qui sont utilisées comme émetteur et récepteur [3.13].

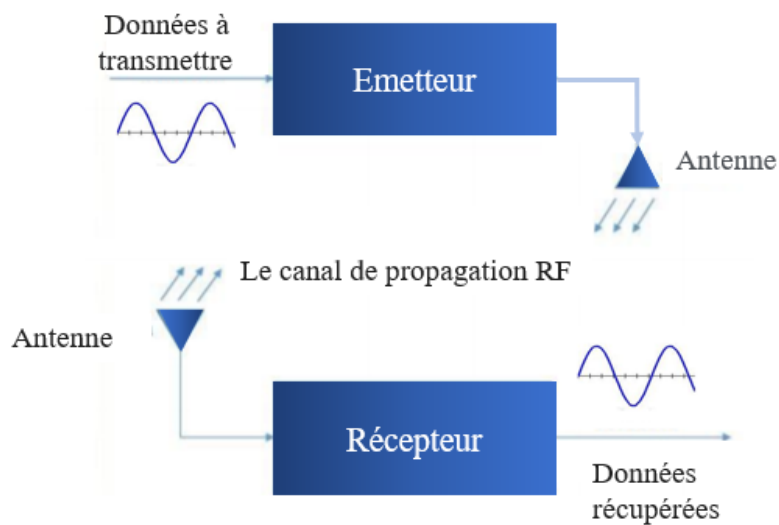


Figure 3. 8: Diagramme de blocs de base du système de communication 5G.

Le PPS (impulsion par seconde) et la source d'horloge sont définis soit internement dans l'USRP, soit externement. Le PPS, c'est-à-dire le nombre de pulsations par seconde que l'émetteur envoie, peut être défini avec un générateur de signaux, et la source d'horloge avec un générateur d'horloge de 10 MHz. Ensuite, dans le menu suivant, la fréquence principale de l'horloge est définie, qui doit être comprise entre 5 MHz et 56 MHz pour le modèle NI-2900. La valeur par défaut est de 32 MHz, et cette fréquence correspond aux fréquences d'échantillonnage des convertisseurs A/D et D/A. L'interpolation peut également être définie par paramètre ou par port externe. La radio utilise le paramètre d'interpolation lors de la conversion ascendante du signal de fréquence intermédiaire en signal IF (fréquence intermédiaire). Pour le modèle NI-2900, la valeur du paramètre d'interpolation peut être n'importe quel nombre entier entre 1 et 512. Ensuite, les paramètres de l'information à envoyer sont définis. Le choix du type de données utilise les paramètres int16 ou int8. Int16 signifie que la transmission est sur 16 bits, tandis que int8 correspond à 8 bits. Int16 offre une meilleure précision, mais int8 est presque deux fois plus rapide en transmission que int16. La valeur par

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

défaut est int16, où chaque échantillon complexe d'informations envoyé contient 32 bits, dont 16 sont des échantillons I et 16 des échantillons Q. Enfin, il est possible de choisir si l'on souhaite autoriser une sortie indiquant les échantillons perdus lors de l'envoi, c'est-à-dire le sous-débit. Un bloc est connecté à cette sortie, qui affiche des valeurs de 0 ou 1. Si la valeur est 0, il n'y a pas d'échantillons perdus, et si la valeur est 1, un échantillon a été perdu. Cela permet de surveiller en temps réel le fonctionnement de la radio logicielle et de détecter d'éventuelles erreurs. L'option de transmission par rafales peut également être sélectionnée, ce qui permet de produire une image continue sur la radio sans échantillons perdus. Cette option est généralement sélectionnée lors de la simulation de modèles qui ne peuvent pas être exécutés en temps réel. Si ce modèle est sélectionné, le nombre d'images dans une rafale doit être spécifié comme un nombre entier [3.22].

6. Conception du système SISO

Dans notre travail, nous avons spécifiquement choisi le modèle USRP B210 en raison de ses avantages. Le USRP B210 est conçu avec plusieurs canaux RF, généralement deux canaux, ce qui permet une transmission et une réception simultanées. Chaque canal possède son propre ensemble de DAC (convertisseurs numérique-analogique) et de ADC (convertisseurs analogique-numérique), ce qui permet un traitement indépendant des signaux pour les chemins de transmission et de réception. Il prend en charge le fonctionnement en duplex intégral.

➤ Émetteur AM :

Ce modèle décrit un système SISO (Single Input Single Output), ce qui signifie qu'un seul émetteur communique avec un seul récepteur, en se basant sur la flexibilité et la reconfigurable entre Simulink et le dispositif USRP pour mettre en œuvre un émetteur AM (amplitude modulation) et un récepteur AM.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

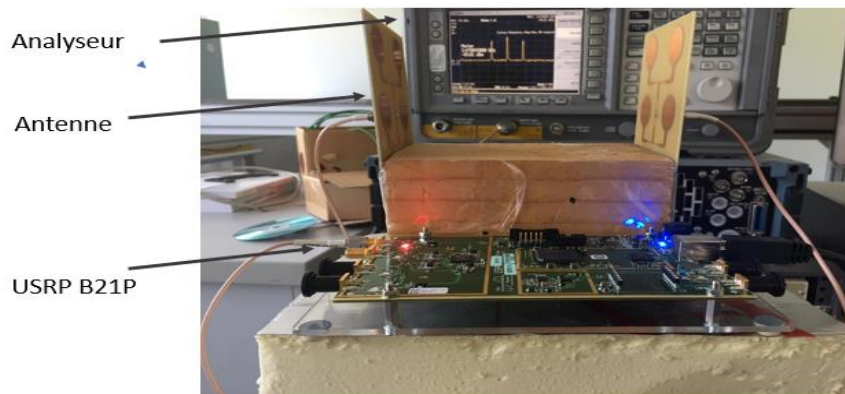


Figure 3. 9 : Implémentation du SISO.

Pour créer une antenne multi-système à faible coût et flexible, nous utilisons Simulink pour générer un signal sinusoïdal d'une fréquence de 1 MHz. Ce signal servira de message à transmettre. Pour transmettre ce signal efficacement, nous utilisons l'USRP (Universal Software Radio Peripheral) que nous configurons pour effectuer une modulation d'amplitude. La modulation d'amplitude consiste à combiner les informations du message avec un signal de porteuse. Dans ce cas, le signal de la porteuse a une fréquence beaucoup plus élevée, soit 3,48 GHz, afin de correspondre aux caractéristiques résonantes de l'antenne conçue, assurant ainsi des performances de transmission optimales. Le signal de porteuse agit comme une onde porteuse sur laquelle le signal du message est modulé. En multipliant les informations du message par ce signal de porteuse, on obtient le signal modulé résultant.

Pour faciliter la transmission et la réception des signaux RF en temps réel, un émetteur AM (amplitude modulation) est construit en utilisant Simulink, l'USRP (Universal Software Radio Peripheral) et les équations suivantes. La modulation AM est réalisée à l'aide de l'équation décrite ci-dessous, où f_p représente la fréquence de la porteuse de 3,48 GHz et f_m représente la fréquence du signal du message de 1 MHz :

$$s(t) = A_c \mu m(t) \cos(2\pi f_c t) + A_c \cos(2\pi f_c t) \quad \text{Equation 3.1}$$

$s(t)$: Le signal modulé en amplitude résultant.

A_c : L'amplitude de la porteuse (ou signal porteur) à la fréquence f_c .

$m(t)$: Le signal modulant, qui modifie l'amplitude de la porteuse. Ce signal est fonction du temps.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

Pour mettre en œuvre cette équation dans Simulink, la première partie de l'équation est modélisée à l'aide des diagrammes de blocs de Simulink. Cependant, la deuxième partie, qui implique la configuration de l'USRP, est réalisée à l'aide d'un bloc appelé "USRP transmitter" [3.1].

Ce bloc permet de configurer des paramètres tels que la fréquence centrale, le taux d'échantillonnage et le gain. En combinant les fonctionnalités de Simulink et le bloc "USRP transmitter" de la boîte à outils USRP, le modèle mathématique spécifié par l'équation (3.1) est réalisé dans Simulink. Cela permet de générer des signaux modulés en AM et de régler divers paramètres de transmission nécessaires pour une transmission efficace du signal en utilisant le matériel USRP.

En effet, la figure ci-dessous montre le schéma en bloc du modulateur AM dans l'environnement Simulink. Le signal d'information est généré dans le bloc "Multiple Sine Waves", où des paramètres tels que l'amplitude, la fréquence et le décalage de phase peuvent être définis pour le signal. Ensuite, le signal d'information est normalisé, puis multiplié par l'indice de modulation. L'indice de modulation mesure l'amplitude de la variation par rapport au signal non modulé, c'est-à-dire à quel point le signal modulé varie par rapport à un niveau statique. L'indice de modulation est calculé en divisant la plus petite valeur absolue du signal modulé par la tension de polarisation (bias voltage). L'indice prend des valeurs entre 0 et 1, et par exemple, la valeur d'indice utilisée dans cette simulation est de 0.5, ce qui signifie que le signal s'élève d'un facteur de 0.5 et descend donc d'un facteur de 0.5. Finalement, le signal passe au bloc d'émission de l'USRP.

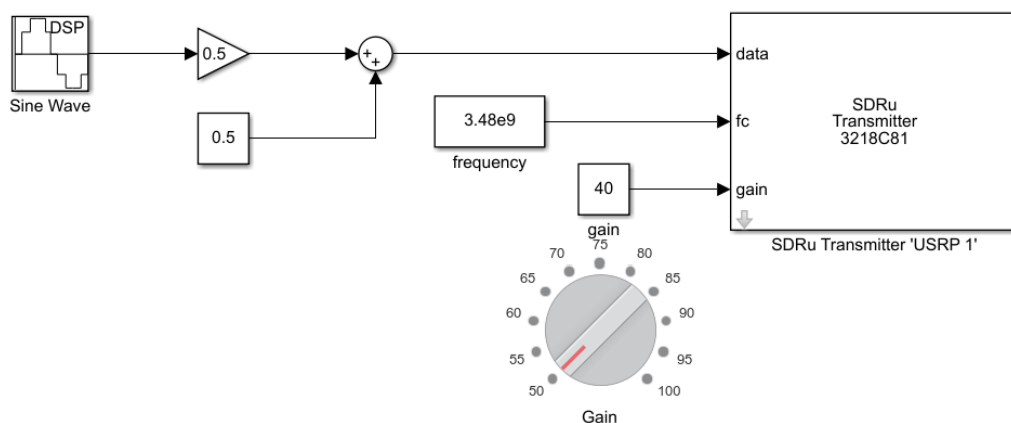


Figure 3. 10: Modèle de l'émetteur utilisant Simulink.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

Pour mettre en œuvre l'émetteur AM, nous avons utilisé les blocs standard et les blocs de sortie disponibles dans la bibliothèque Simulink. Tel que le bloc 'sdru transmitter' qui nous a permis de configurer des paramètres importants tels que le gain, la fréquence centrale, l'interpolation, le filtrage et les données du signal [3.7-3.8]. La figure ci-dessous illustre la configuration du bloc de programmation. En configurant correctement ce bloc, nous avons réalisé la modulation du signal souhaité.

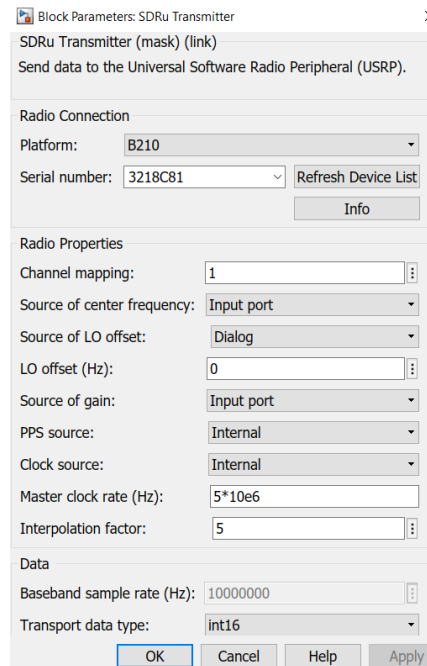


Figure 3. 11: Programmation du bloc pour transmettre des signaux à l'aide de périphériques SDR.

➤ Récepteur AM :

Le bloc récepteur est principalement constitué des mêmes paramètres que le bloc émetteur. Les paramètres du récepteur sont présentés dans la figure [3.10], où le bon modèle de périphérique et le périphérique correspondant au numéro de série sont d'abord sélectionnés. La cartographie des canaux est à nouveau définie à un, car une seule porte de réception est utilisée. Le bloc récepteur reçoit des informations de la radio logicielle en utilisant UHD. Le bloc renvoie un vecteur de colonne ou un signal matriciel avec un nombre de lignes corrigé. Tout comme dans le bloc émetteur, la fréquence centrale, la fréquence de décalage de l'oscillateur local, le gain, le PPS et la source d'horloge peuvent être définis à la fois comme des paramètres internes et des ports externes [3.12].

Il est conseillé d'utiliser une amplification plus élevée dans le récepteur pour améliorer la qualité du signal. Par conséquent, la valeur par défaut de l'amplification dans le bloc récepteur

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

est de 32 dB. La fréquence principale de l'horloge est également définie par défaut à 32 MHz dans le bloc récepteur. Ensuite, le paramètre de décimation est défini. Ce paramètre peut prendre les mêmes valeurs entières que le paramètre d'interpolation du bloc émetteur, c'est-à-dire des valeurs comprises entre 1 et 512. Le paramètre de décimation permet à la radio de convertir le signal IF en un signal de fréquence intermédiaire complexe. Dans le récepteur, le type de données à envoyer de Simulink peut être à nouveau choisi entre int8 et int16 en fonction des exigences de précision des résultats [3.11].

À partir du récepteur, il est également possible d'examiner les échantillons perdus, c'est-à-dire le débordement, à partir du port de débordement (overrun port). Dans ce cas, le temps d'échantillonnage doit être spécifié en tant que valeur scalaire. Pour que le temps d'échantillonnage de Simulink corresponde au temps réel, il doit être défini selon la formule suivante.

Temps échantillonnage (en secondes) = Temps simulation (en secondes) / Échantillons par seconde (échantillons par seconde)

Après avoir réussi à transmettre le signal modulé, nous avons mis en place une antenne multi-couches comme récepteur. Pour faciliter la démodulation et la récupération des données transmises, nous avons connecté cette antenne à l'un des ports de réception du premier USRP B210. La figure ci-dessous décrit le modèle de récepteur conçu pour effectuer une démodulation AM. Le processus de démodulation consistait à utiliser un bloc récepteur SDRu, qui nous a permis de recevoir et de démoduler le signal transmis.

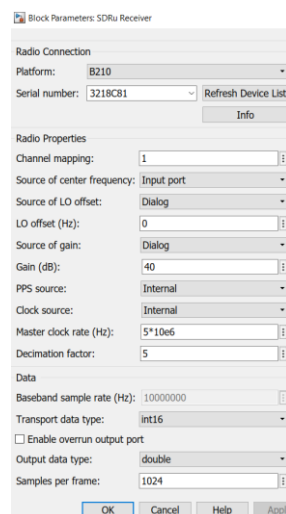


Figure 3. 12: Programmation du bloc "SDRU Receiver" dans Simulink pour recevoir et traiter des signaux radio à l'aide de périphériques SDR.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

Le signal démodulé passait ensuite à travers un filtre passe-bas pour éliminer les composantes haute fréquence et extraire le signal du message original. En mettant en œuvre ce démodulateur AM, nous avons pu récupérer les données transmises à partir du signal reçu, ce qui permettait un traitement ou une analyse ultérieure des informations.

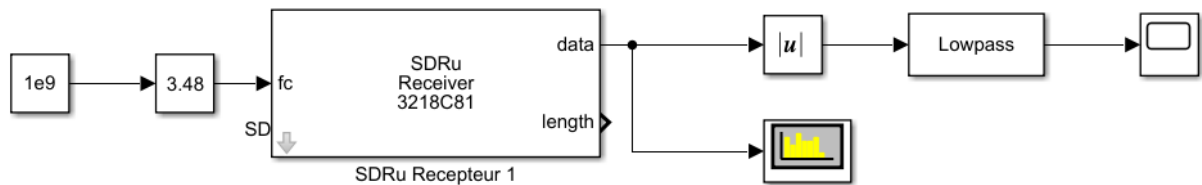


Figure 3.13: Le modèle de récepteur.

Ensuite, examinons la structure du démodulateur AM utilisé. Le signal émis est reçu dans le schéma en bloc présenté dans la figure [3.13], qui commence par le bloc récepteur de l'USRP. À l'intérieur de ce bloc, un sous-système a été créé pour le démodulateur lui-même. À partir du signal reçu, le bloc de valeur absolue est utilisé pour démoduler le signal AM et pour extraire l'enveloppe du signal AM et la renvoie au bloc suivant, puis il est recommandé de le filtrer avec un filtre passe-bas. Avant cela, on peut voir le spectre du signal de porteuse reçu qui sera présenté dans la figure 3.24. Le filtre passe-bas élimine les composantes haute fréquence du signal, ne laissant passer que les composantes du signal qui ont des fréquences basses.

7. Conception du système MISO 2x1

Nous avons utilisé un schéma MISO (Multiple-Input Single-Output) 2X1, avec 2 antennes au niveau du transmetteur et 1 antenne au niveau du récepteur. Les deux terminaux du premier USRP sont utilisés pour la transmission tandis que le port du deuxième USRP B210 est utilisé pour la réception.

Lors de la transmission des données, les mêmes données sont transmises de manière redondante depuis les deux antennes d'émission.

➤ Émetteur AM :

Dans le cadre de la mise en œuvre du système MISO 1X2, le modèle d'émetteur du système MIMO est configuré pour exploiter les deux canaux du USRP B210, permettant une transmission simultanée de données sur plusieurs voies de communication. En attribuant ces canaux aux antennes, un mappage des canaux [1 2] a été défini. Cela signifie que le canal 1 est utilisé pour la transmission sur le premier élément d'antenne et le canal 2 est utilisé pour la transmission sur le deuxième élément d'antenne, afin

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

de garantir une transmission coordonnée, un bloc de "concaténation de matrices" a été ajouté pour organiser les éléments de données en colonnes, créant ainsi une matrice de données. Cette étape de préparation des données est essentielle pour assurer la synchronisation et la coordination adéquates des informations à transmettre, éléments fondamentaux dans les systèmes MIMO pour garantir un fonctionnement efficace et une utilisation optimale des ressources disponibles. Ce processus de préparation des données joue un rôle crucial dans la maximisation de la qualité de la communication et du débit du système MIMO.

La "concaténation de matrices" est un bloc de traitement de signal qui permet de regrouper les données provenant des deux canaux de l'USRP B210 en une seule matrice de données. Cela permet de transmettre les signaux simultanément à partir des deux antennes d'émission du système MISO. Le mappage des canaux en [1 2] indique que les données des deux canaux de l'USRP B210 doivent être utilisées pour la transmission du signal. Ainsi, grâce à cette configuration, le modèle d'émetteur MISO est capable de transmettre le signal simultanément à partir des deux antennes d'émission, ce qui améliore les performances du système en termes de capacité de transmission et de qualité du signal reçu. La figure 3.12 décrit de manière détaillée l'implémentation de l'émetteur dans un système SIMO en utilisant Simulink et le périphérique USRP B210.

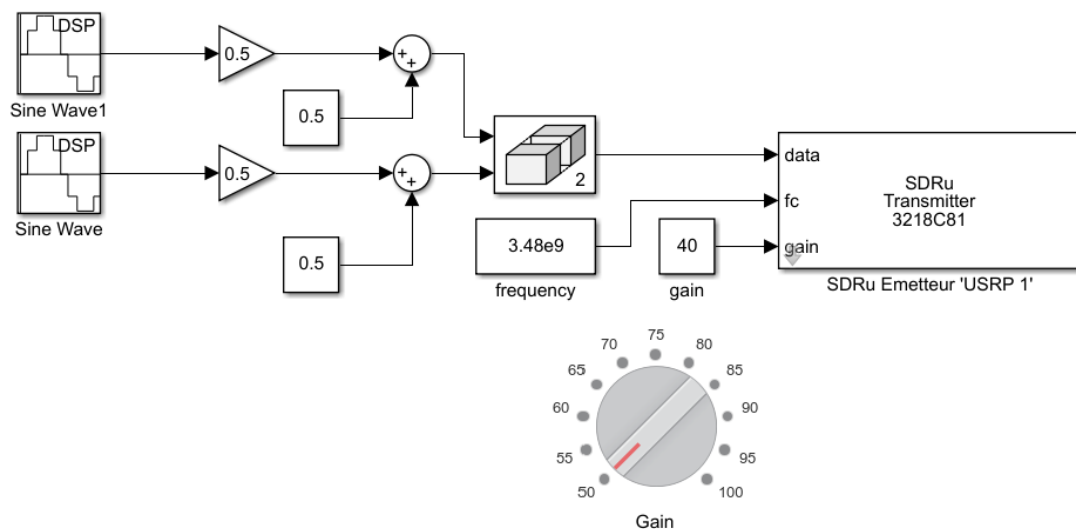


Figure 3. 14: La mise en œuvre de l'émetteur dans un système MISO en utilisant Simulink et le périphérique USRP B210.

➤ Récepteur AM :

Le bloc du récepteur comprend essentiellement les mêmes paramètres que le bloc du récepteur SISO comme illustré dans la fig.3.13.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

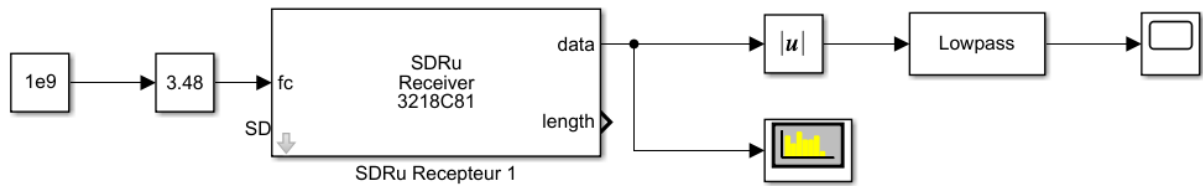


Figure 3. 15: La mise en œuvre du récepteur dans un système MISO en utilisant Simulink et le périphérique USRP B210.

En utilisant la configuration décrite dans la figure [3.14] nous pouvons exploiter les avantages des antennes d'émission multiples pour améliorer la qualité du signal et atténuer les effets de l'affaiblissement du canal ou des interférences. Le récepteur peut ensuite traiter les signaux reçus provenant des différentes antennes pour améliorer les performances globales de réception.

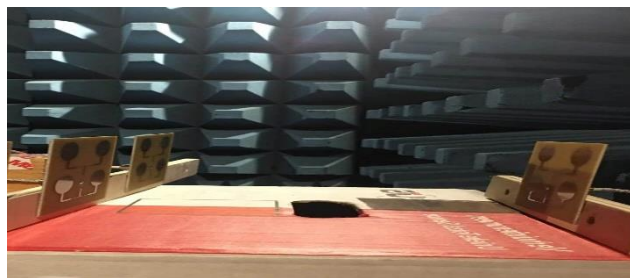


Figure 3. 16: Implémentation du MISO.

8. Conception du système SIMO 1x2

Dans l'expérience SIMO (Single-Input Multiple-Output), un schéma SIMO 1X2 a été utilisé. La configuration impliquait l'utilisation de deux terminaux du premier USRP pour la réception des signaux, tandis que les autres terminaux USRP étaient utilisés à la fois pour la transmission et la réception. Le système SIMO conventionnel est entièrement numérique, où toutes les techniques de traitement du signal sont effectuées en bande de base basée sur Simulink.

➤ Émetteur AM :

Dans un schéma de transmission de données, le système SIMO contient une seule antenne du côté émetteur et deux antennes du côté récepteur. Ce système est également connu sous le nom de diversité de réception. La mise en œuvre de l'émetteur dans un système SIMO comprend essentiellement les mêmes paramètres que le bloc émetteur SISO.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

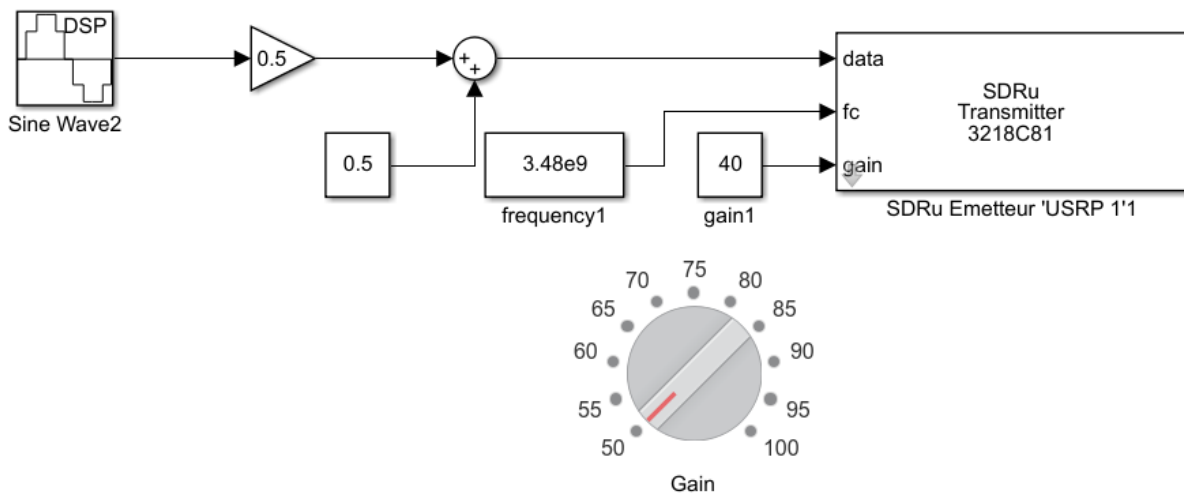


Figure 3. 17: La mise en œuvre de l'émetteur dans un système SIMO en utilisant Simulink et le périphérique USRP B210.

➤ Récepteur AM :

Pour recevoir les signaux, deux antennes sont placées en tant que récepteur, où 2 antennes de réception sont connectées à l'USRP supplémentaire. Cela signifie que pendant que le système transmet des signaux depuis l'antenne d'émission, il reçoit également des signaux. Les antennes de récepteur sont séparées d'une distance de $\lambda/2$ pour garantir l'indépendance linéaire entre les canaux entre les antennes.

Une fois que les signaux sont reçus par les deux antennes du système SIMO, ils passent par une étape de démodulation RF à l'aide d'UHD (Universal Hardware Driver) et de Simulink. Pour la partie réception, le modèle du récepteur AM SISO est utilisé, avec l'ajout du bloc de récepteur sdru correspondant au deuxième dispositif USRP. L'incorporation du bloc de récepteur sdru permet au système SIMO de gérer efficacement les signaux reçus des deux antennes.

La première étape consiste à sélectionner la plateforme et le dispositif appropriés en fonction du numéro de série. La configuration des canaux est définie sur [1.2], indiquant que les deux ports du récepteur sont utilisés pour la réception du signal. Le bloc de récepteur reçoit les informations du logiciel radio en utilisant UHD. En incorporant le bloc « Select Colum », les signaux reçus des deux antennes peuvent être traités indépendamment. Cela permet un traitement et une analyse séparés de chaque canal, ce qui permet le traitement simultané de plusieurs signaux reçus.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

Ainsi, le système est capable de traiter et de démoduler simultanément les signaux provenant des deux antennes, améliorant ainsi les capacités de la configuration SIMO. Cette approche permet d'exploiter les avantages de la diversité de réception dans le système SIMO, en utilisant des techniques de traitement du signal à bande de base pour extraire et analyser les informations contenues dans les signaux reçus.

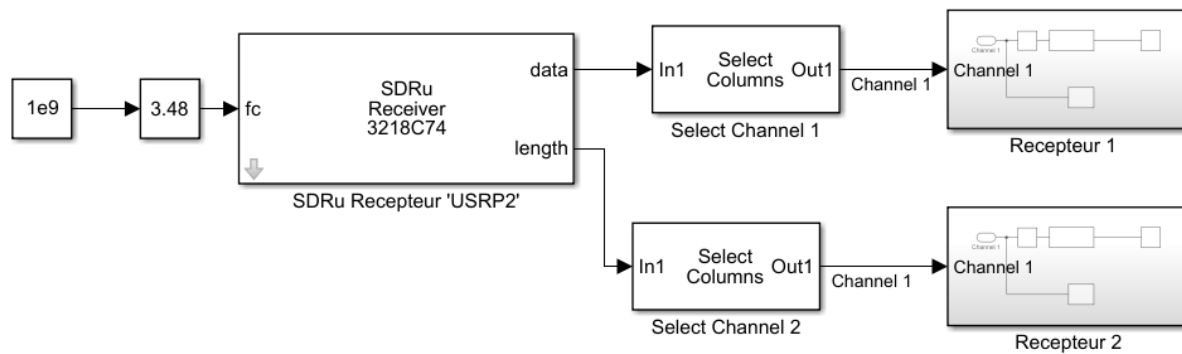


Figure 3. 18: La mise en œuvre du récepteur dans un système SIMO en utilisant Simulink et le périphérique USRP B210.

9. Conception du système MIMO 2x2

Pour mettre en place une configuration MIMO 2x2, on utilise deux USRP B210. Chaque USRP est équipée de deux antennes d'émission et deux antennes de réception. Cela permet de créer un système de communication avec quatre antennes, deux pour l'émission et deux pour la réception.

Le dispositif USRP B210 comprend principalement les composants suivants :

Transceiver AD9361 ;

FPGA Xilinx Spartan 6 ;

USRP Toolbox

Antennes à 4 éléments en émission.



Antennes à 4 éléments en réception.

USRP B210

Figure 3. 19 : Système MIMO 2X2

La deuxième configuration est réalisée en utilisant 2 antennes à la fois au niveau de l'émetteur et du récepteur, fournissant un MIMO 2X2 entièrement numérique.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

➤ Émetteur AM

Le modèle d'émetteur MIMO doit conserver les mêmes paramètres d'émetteur SISO en ajoutant un bloc de Simulink appelé "concaténation de matrices" et en changeant le mappage des canaux en [1 2] pour transmettre le signal simultanément à travers les émetteurs USRP. Cette configuration est illustrée dans la figure suivante.

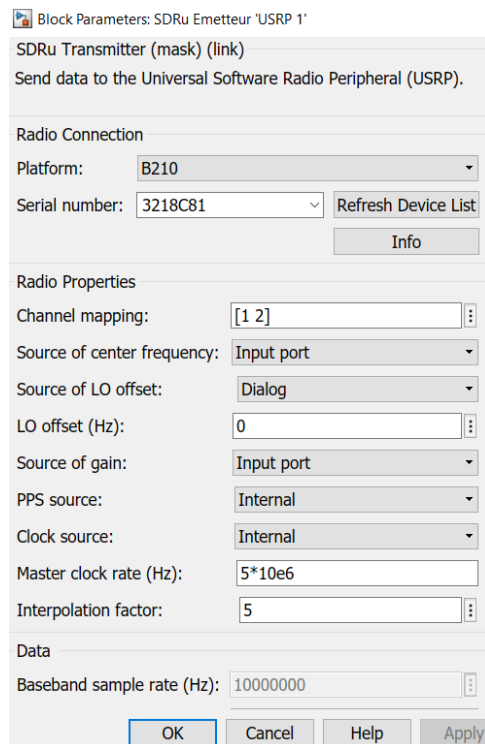


Figure 3. 20: Programmation de l'USRP via Simulink.

En utilisant le bloc "SDRu Transmitter" dans Simulink avec la configuration "[1 2]", on indique l'intention d'émettre deux flux de données, chacun étant transmis par l'une des deux antennes. Cette configuration s'avère particulièrement pertinente pour les systèmes MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) qui tirent parti des propriétés spatiales du canal de communication. Le "[1 2]" signifie qu'il y a deux antennes d'émission (transmettrices) dans le système MIMO. Chacune de ces antennes est capable de transmettre un flux de données indépendant.

Cette configuration revêt une grande importance, notamment dans le contexte des systèmes MIMO qui utilisent la technique de spatial multiplexing (SM). Le spatial multiplexing permet d'augmenter le débit de données en transmettant simultanément plusieurs flux de données indépendants via les antennes. Chaque antenne agit comme un "canal virtuel" distinct, autorisant ainsi la transmission parallèle de plusieurs flux de données.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

Dans ce cas particulier, avec la configuration "[1 2]", nous profitons des avantages du spatial multiplexing. Les données sont divisées en deux flux, et ces flux sont transmis simultanément via les deux antennes. Cette approche peut considérablement augmenter le débit de données du système, ce qui est particulièrement utile dans les applications nécessitant une transmission à haute capacité.

Cette configuration illustre également la flexibilité offerte par le MIMO pour exploiter les caractéristiques spatiales du canal. Cette flexibilité contribue à améliorer les performances, la fiabilité et la qualité de la transmission dans des environnements de propagation réelle.

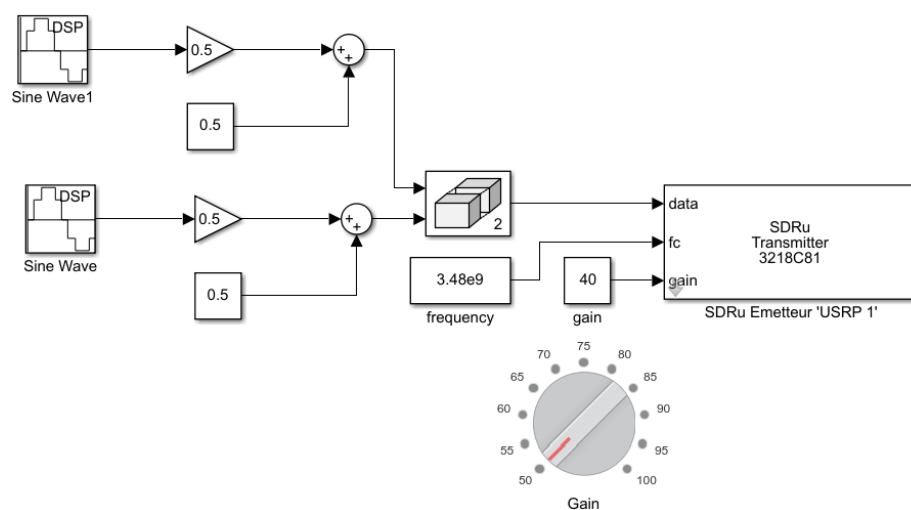


Figure 3. 21: La mise en œuvre de l'émetteur dans un système MIMO en utilisant Simulink et le périphérique USRP B210.

➤ Récepteur AM

La figure ci-dessous décrit le cadre de mise en œuvre matérielle pour le modèle MIMO 2x2. En effet, pour la partie réception, le même modèle SISO (récepteur AM) a été conservé, seule une légère modification en ajoutant un bloc appelé "sélection de colonne" afin de séparer les données et de traiter chaque canal séparément et simultanément. Pour recevoir les signaux, deux antennes sont placées en tant que récepteur, avec une distance de $\lambda/2$ séparant les deux antennes du récepteur pour garantir l'indépendance linéaire entre les canaux entre les antennes.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

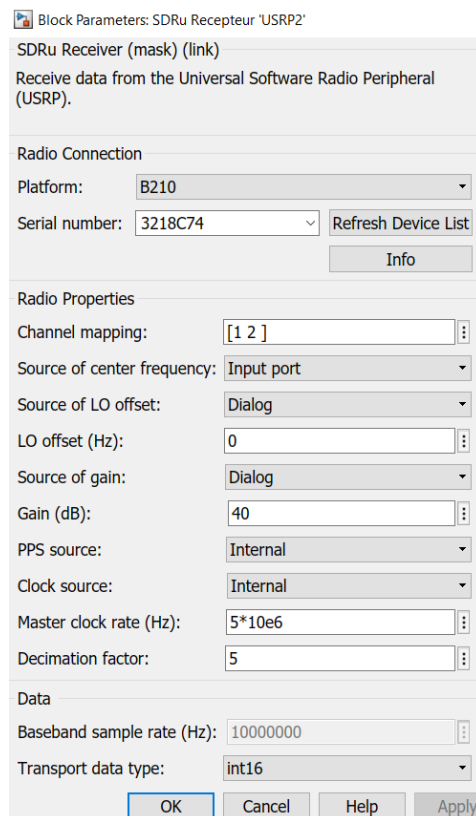
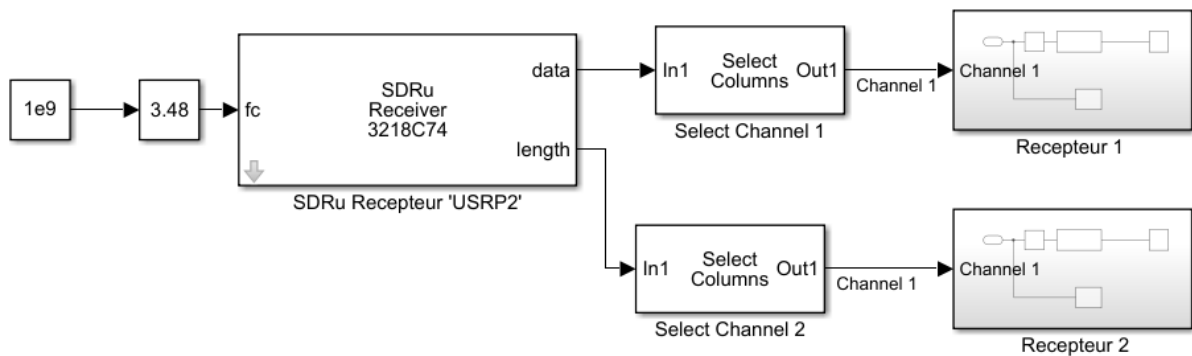


Figure 3. 22: Réception simultanée.

10. Résultats

Une fois le signal modulé, il est important de vérifier la transmission des informations du message. Pour ce faire, nous connectons la sortie de l'USRP à un analyseur de spectre. Lors de l'analyse, nous observons un signal porteur fort à la fréquence porteuse de 3,48 GHz, positionné au centre. De plus, deux bandes latérales symétriques sont présentes aux fréquences de 3,481 GHz et 3,479 GHz. Ce schéma de spectre correspond à la forme standard, confirmant que le signal a été généré et transmis correctement [3.21].

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

Une fois que le signal a été modulé et vérifié, nous connectons la sortie de l'USRP à l'antenne pour faciliter la transmission du signal. Cette connexion permet d'acheminer le signal modulé vers l'environnement de transmission, où il est propagé et reçu par les dispositifs récepteurs appropriés.

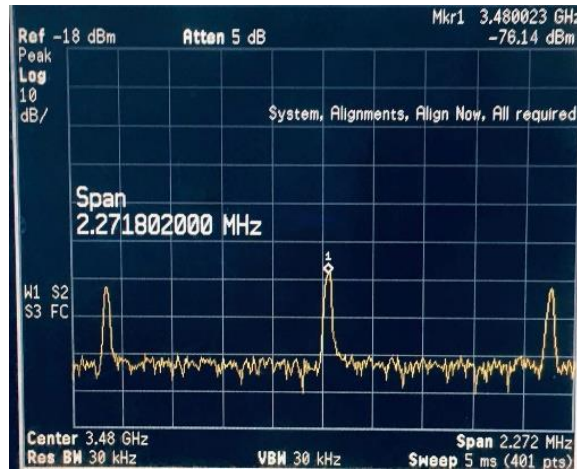


Figure 3. 23: Le spectre de fréquence du signal modulé.

De même, afin de vérifier la réception du signal, un bloc Simulink appelé "Spectrum Analyzer" d'analyseur de spectre a été ajouté pour visualiser les caractéristiques spectrales des signaux et examiner la réception du signal. L'affichage résultant montre généralement deux bandes latérales uniformément positionnées à ± 1 MHz, ainsi qu'un porteur central prédominant. Cela indique que le signal sinusoïdal a été reçu avec succès et peut être utilisé de manière efficace.

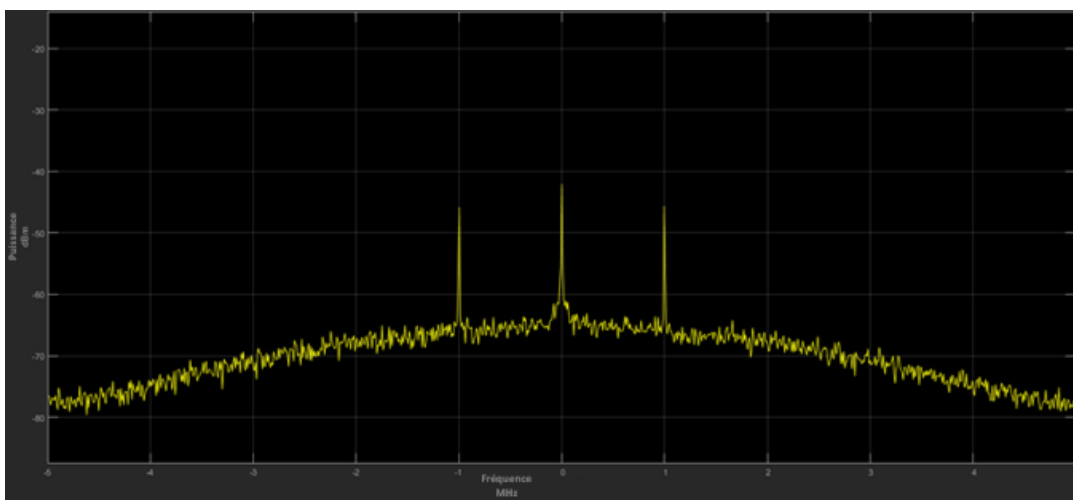


Figure 3. 24: Le spectre de fréquence du signal démodulé.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

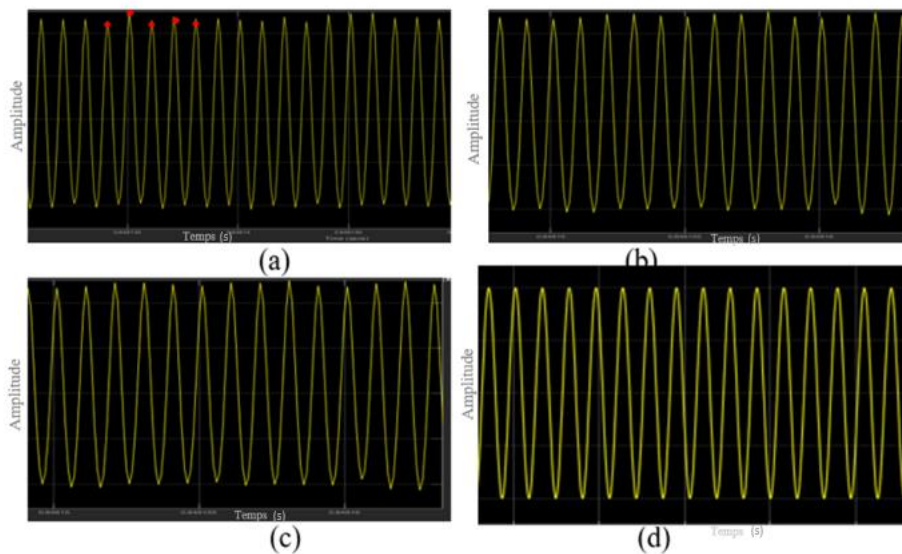


Figure 3. 25: Signal récupéré par (a) le système SISO, (b)le système MISO (c)le système SIMO (d) le système MIMO.

La figure 3.23 fournit une représentation détaillée de la manière dont le signal est reçu et traité par différents types de systèmes : SISO (Single Input Single Output), SIMO (Single Input Multiple Output), MISO (Multiple Input Single Output) et MIMO (Multiple Input Multiple Output). Chaque configuration est décrite visuellement, mettant en évidence comment les signaux sont produits dans chaque système respectif.

La comparaison entre le système SISO et les différentes configurations d'antennes des systèmes MIMO est effectuée. En réalité, les systèmes multi-antennes améliorent considérablement la qualité de la transmission en utilisant plusieurs antennes à l'émission ou à la réception. Il sera démontré qu'il existe une différence substantielle de performance du système MIMO par rapport aux autres. Le système MIMO produit le meilleur signal sinusoïdal sans atténuation ni distorsion. Il y a une dégradation importante d'amplitude au niveau SISO et fluctuation de la crête Les systèmes MISO (Multiple-Input Single-Output) et SIMO (Single-Input Multiple-Output) présentent des performances intermédiaires. Une différence substantielle de performance du système MIMO par rapport aux autres a été démontrée. Le système MIMO produit le meilleur signal sinusoïdal sans atténuation ni distorsion. Il y a une dégradation importante d'amplitude au niveau SISO et fluctuation de la crête Les systèmes MISO (Multiple-Input Single-Output) et SIMO (Single-Input Multiple-Output) présentent des performances intermédiaires. Il est démontré qu'il existe une différence substantielle de performance du système MIMO par rapport aux autres. Le système MIMO produit le meilleur signal sinusoïdal

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

sans atténuation ni distorsion. En permettant la transmission redondante des mêmes données sur le réseau, les problèmes tels que l'atténuation causée par la perte ou la chute de paquets peuvent être réduits, ce qui permet de récupérer l'ensemble des données résultantes. Donc, en plus du calcul du Rapport Signal-Bruit (SNR) et du Taux d'Erreur Binaire (BER), ces mises en œuvre servent également de démonstration. Elles démontrent que le MIMO offre de meilleures performances, notamment une augmentation du débit de données, une amélioration de la qualité du signal, une portée accrue, une utilisation plus efficace de la bande passante, et une meilleure résistance aux interférences.

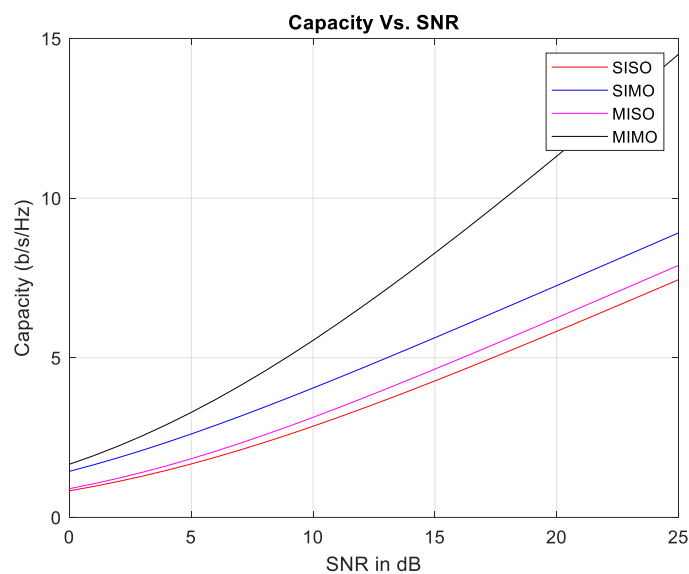


Figure 3. 26 : Comparaison de la capacité entre SISO, SIMO, MISO et MIMO

Les résultats de mesure confirment la validité des résultats des simulations réalisées avec MATLAB en utilisant le code MATLAB [3.22] tout en mettant en évidence les distinctions entre les configurations MIMO, SIMO, MISO et SISO. Plus précisément, le MIMO se distingue par son meilleur taux d'erreur binaire (BER), suivi du SIMO, du MISO et enfin du SISO. Un exemple illustratif de cette distinction est également fourni par le biais du rapport signal/bruit (SNR).

L'illustration montre clairement une différence significative de performance entre le système SIMO et les système multi antennes. Le système MIMO surpasse le système SISO en générant un signal sinusoïdal de meilleure qualité sans subir d'atténuation ni de distorsion. En recevant les mêmes données de manière redondante à travers le réseau, les problèmes tels que l'atténuation causée par la perte ou la chute de paquets peuvent être atténués, garantissant ainsi la récupération de l'ensemble des données. Cela aide à atténuer les effets de l'atténuation, des

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

interférences et de la propagation multipath en combinant les signaux reçus. En utilisant plusieurs antennes à la réception et en émission, le système bénéficie de la diversité spatiale et améliore la qualité et la fiabilité des signaux reçus. La combinaison de la transmission à partir d'une antenne et de la réception à partir de deux antennes améliore les performances du système en termes de réception du signal et de qualité globale de la communication. Ces implantations présentent des preuves qui remettent en question l'idée selon laquelle les systèmes MIMO sont meilleurs uniquement sur la base de la diversité ou des calculs du taux d'erreur binaire (BER). Au lieu de cela, il met en évidence le fait que les systèmes MIMO offrent des performances supérieures dans différents aspects, tels qu'une augmentation du débit de données, une amélioration de la qualité du signal, une portée de transmission étendue, une utilisation plus efficace de la bande passante et une meilleure résistance aux interférences. Ces avantages ne se limitent pas à la diversité ou aux mesures du BER, mais englobent un large éventail.

Critère	SISO	MISO 2x1	SIMO 2x1	MIMO 2x2
Capacité	Petite	Petite	Grande	La plus grande
SNR	Faible	Faible	Élevé	Le plus élevé
Complexité	Faible	Faible	Moyenne	La plus grande
Applications	Réduite	Réduite	Large	Large
Coût	Faible	Faible	Moyen	Le plus élevé

Tableau 3. 2 : Tableau comparatif entre les différentes configurations

Conclusion

Ce chapitre a exploré différents concepts et technologies liés aux systèmes de communication logicielle (SDR) et aux configurations d'antennes SISO, MISO, SIMO et MIMO, en mettant l'accent sur l'utilisation de l'environnement de modélisation Simulink. Nous avons d'abord examiné les principes fondamentaux du SDR, qui permettent la flexibilité et l'adaptabilité des systèmes de communication en utilisant des logiciels pour effectuer des opérations de modulation, de démodulation et de traitement du signal.

Dans un premier temps nous avons exploré les différentes configurations d'antennes, commençant par le système SISO, qui utilise une seule antenne à la fois pour la transmission et la réception. Bien qu'il soit simple, il présente des limitations en termes de qualité de signal et de capacité à gérer les interférences.

Le système MISO a ensuite été présenté. Il utilise plusieurs antennes à l'émetteur et une seule antenne au récepteur. Cela permet d'améliorer la qualité du signal en utilisant la diversité spatiale pour compenser les effets de fading et d'interférences.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

Le système SIMO a été discuté ensuite, avec une seule antenne à l'émetteur et plusieurs antennes au récepteur. Cette configuration offre également la diversité spatiale et permet une meilleure réception du signal en utilisant plusieurs chemins de propagation.

Enfin, nous avons exploré le système MIMO, qui utilise plusieurs antennes à la fois à l'émetteur et au récepteur. Le MIMO offre des avantages significatifs, notamment une augmentation du débit de données, une amélioration de la qualité du signal, une meilleure utilisation de la bande passante et une résistance accrue aux interférences. L'utilisation de Simulink comme outil de modélisation a permis de mettre en œuvre et de comparer ces différentes configurations de manière pratique et efficace.

Ce chapitre a souligné l'importance des systèmes de communication logicielle et des configurations d'antennes multiples pour améliorer les performances des systèmes de communication. La sélection de la configuration appropriée dépend des exigences spécifiques de chaque application et des contraintes techniques

MIMO, MISO et SIMO sont des systèmes de communication sans fil performants et robustes utilisés pour améliorer la performance de la transmission des données en fonction des conditions du canal et des besoins de l'applications. La performance d'une antenne est déterminée par sa capacité à améliorer les performances d'un système de communication. Les antennes intelligentes utilisent des techniques de traitement du signal pour exploiter les propriétés spatiales des ondes radio.

- Dans le cas de MIMO, les antennes utilisent le multiplexage spatial pour transmettre plusieurs flux de données simultanément sur la même fréquence. Cela permet d'augmenter la capacité du système et de réduire la latence.
- Dans le cas de MISO, les antennes utilisent la diversité d'émission pour améliorer la fiabilité du système. Cela permet de réduire le nombre d'erreurs de transmission.
- Dans le cas de SIMO, les antennes intelligentes utilisent la diversité de réception pour améliorer la fiabilité du système. Cela permet de réduire le nombre d'erreurs de réception.

On peut utiliser des systèmes MISO, SISO et MIMO en conjonction avec des techniques de formation de faisceaux (beamforming) pour améliorer les performances des antennes. Le beamforming est une technique qui permet de concentrer l'énergie du signal dans une direction particulière tout en réduisant la puissance rayonnée dans d'autres directions. Cela peut

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

augmenter la qualité du lien de communication, augmenter la portée ou la capacité, ou réduire les interférences.

Les antennes intelligentes sont une technologie importante qui est en train de transformer le monde des communications sans fil. Dans notre cas on s'intéresse au beamforming avec une configuration SIMO (Single-Input Multiple-Output) implique l'utilisation d'une seule antenne d'émission (entrée) et de plusieurs antennes de réception (sorties) pour concentrer l'énergie du signal dans une direction spécifique du récepteur.

Références bibliographiques

[3.1] Drissi, M., Benjelloun, N., Descamps, P., & Gharsallah, A., "Designing the MIMO SDR-based Antenna Array for 5G Telecommunication," *Advances in Science, Technology, and Engineering Systems Journal (ASTESJ)*, 2022, vol. 7, pp. 167-173.

[3.2] Drissi, M., Benjelloun, N., Descamps, P., & Gharsallah, A., "Analysis & Implementation of SISO, SIMO, MISO, and MIMO in 5G Communication Systems Based on SDR," *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 2023, vol. 23, pp. 140-146.

[3.3] Ulversoy, T., "Software defined radio: Challenges and opportunities," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2010, vol. 12, no. 4, pp. 531-550.

[3.4] Sarangi, A. K., et Datta, A., "Capacity Comparison of SISO, SIMO, MISO & MIMO Systems," 2018 ICCMC, pp. 798–801.

[3.5] Joshi, A. D., et Joshi, H. H., "Spatial diversity techniques for wireless communication - A comparative analysis," *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 93-97.

[3.6] Sarangi, A. K., et A. Datta, "Capacity comparison of SISO, SIMO, MISO & MIMO systems," 2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), Erode, 2018, pp. 798-801.

[3.7] Verdecia-Pena, R., et Alonso, J. I., "A comparative experimental study of MIMO A&F and D&F relay nodes using a software-defined radio platform," *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 5, p. 570.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

[3.8] Stanko, D., Sommerkorn, G., Ihlow, A., et Del Galdo, G., "Enable software-defined radios for real-time MIMO channel sounding," In 2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE, 2021, pp. 1-5.

[3.9] Palchak, D. R., et Farhang-Boroujeny, B., "A software-defined radio testbed for MIMO systems," (Doctoral dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Utah), 2007.

[3.10] Akeela, R., et Dezfouli, B., "Software-defined Radios: Architecture, state-of-the-art, and challenges," *Computer Communications*, 2018, vol. 128, pp. 106-125.

[3.11] Drissi, M., Benjelloun, N., Descamps, P., & Gharsallah, A., "Design of digital beamforming for 5G access point Applications," *Microw Opt Technol Lett*, 2023, pp. 1-10.

[3.12] Dardaillon, M., Marquet, K., Risset, T., & Scherrer, A., "Software defined radio architecture survey for cognitive testbeds," In 2012 8th international wireless communications and mobile computing conference (IWCMC), IEEE, 2012, pp. 189-194.

[3.13] Gunawan, M. W., Priambodo, N. A., Gulo, M. M., Arifin, A., Moegiharto, Y., & Briantoro, H., "Evaluations of the predistortion technique by neural network algorithm in MIMO-OFDM system using USRP," *Jurnal Infotel*, 2022, vol. 14, no. 4, pp. 287-293.

[3.14] Reis, A. L. G., Barros, A. F., Lenzi, K. G., Meloni, L. G. P., & Barbin, S. E., "Introduction to the software-defined radio approach," *IEEE Latin America Transactions*, 2012, vol. 10, no. 1, pp. 1156-1161.

[3.15] Patton, L. K., "A GNU radio based software-defined radar," 2007.

[3.16] Del Barrio, A. A., Manzano, J. P., Maroto, V. M., Villarín, Á., Pagán, J., Zapater, M., ... & Hermida, R., "HackRF+ GNU Radio: A software-defined radio to teach communication theory," *The International Journal of Electrical Engineering & Education*, 2023, vol. 60, no. 1, pp. 23-40.

[3.17] Stewart, R. W., Crockett, L., Atkinson, D., Barlee, K., Crawford, D., Chalmers, I., ... & Sozer, E., "A low-cost desktop software-defined radio design environment using MATLAB, simulink, and the RTL-SDR," *IEEE Communications Magazine*, 2015, vol. 53, no. 9, pp. 64-71.

[3.18] Liuski T., "AM- ja DSB-modulaatioiden toteuttaminen Simulink- ohjelmistolla USRP- ohjelmistoradioalustalle," PhD thesis, University of Oulu, 2019.

Chapitre 3 : Validation des systèmes multi antennes

[3.19] Hiari O, Mesleh R., "A Reconfigurable SDR Transmitter Platform Architecture for Space Modulation."

[3.20] Izydorczyk, T., Tavares, F. M., Berardinelli, G., & Mogensen, P., "A USRP-based multi-antenna testbed for reception of multi-site cellular signals," IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 162723-162734.

[3.21] Gallagher, K., Galanos, D., Hedden, A., Cutitta, R., McNamara, D., Freeman, S., & Ranney, K., "Software-defined radios for the implementation of randomized arrays," In Radar Sensor Technology XXII, 2018, vol. 10633, pp. 301-308.

[3.22] MathWorks. (2023). MATLAB: A Language for Technical Computing. Disponible à l'adresse [<https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/246112-how-can-i-plot-the-channel-capacity-for-mimo-iso-simo-and-miso>].

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

1. Introduction

Dans le domaine des communications sans fil, l'une des avancées technologiques les plus significatives est le beamforming, une technique qui permet d'améliorer considérablement la qualité et la portée des transmissions sans fil en adaptant la direction du signal émis ou reçu. Le beamforming peut être considéré comme une approche de communication intelligente qui optimise la manière dont les antennes interagissent avec les signaux radio.

Dans le cadre de ce chapitre, nous allons explorer en détail la mise en place du processus de beamforming numérique en se basant sur une carte USRP étant donné que la solution doit être reconfigurable, flexible, polyvalente et rentable pour les systèmes de formation de faisceaux, tout en permettant de tester facilement différents algorithmes de formation de faisceaux.

Cette section se concentrera sur une analyse en profondeur des différentes étapes et composants indispensables à la réalisation de ce projet. Pour commencer, nous procéderons à une brève évaluation des algorithmes évolutifs employés pour l'estimation de l'angle d'arrivée (DOA). Ensuite, nous explorerons le processus de calcul et d'ajustement des poids du faisceau en fonction de l'analyse de la DOA. Cette approche nous permettra d'illustrer comment cette combinaison stratégique peut être mise à profit pour optimiser les performances de la communication sans fil, nous aborderons les étapes clés du processus de beamforming numérique, notamment la collecte des données RF, le traitement numérique du signal, la formation du faisceau, et l'ajustement des poids du faisceau en fonction de l'analyse de la direction d'arrivée (DOA). Cette combinaison de techniques permettra d'optimiser la communication sans fil dans une variété de scénarios, qu'il s'agisse de réseaux 5G exigeants ou d'applications radar avancées nécessitant une précision extrême."

Des mesures expérimentales sont réalisées à l'aide de la radio logicielle (Software-Defined Radio - SDR) afin de démontrer l'utilisation de cette technologie pour réduire les interférences dans un canal de communication. Nous présentons des résultats simulés et expérimentaux pour un système DBF à quatre éléments, utilisant deux paires de USRP B210 et deux paires d'antennes plaquées.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

2. Techniques d'estimation de l'angle d'arrivée

2.1. Introduction

La plupart des systèmes de télécommunications mobiles fonctionnent sans que l'émetteur ni le récepteur connaissent respectivement leur position. Par conséquent, l'émetteur doit générer un rayonnement électromagnétique omnidirectionnel pour assurer la transmission des données vers le récepteur. Cependant, cette approche entraîne une dépense d'énergie considérable puisque l'énergie est rayonnée dans toutes les directions de l'espace, même celles qui ne sont pas liées au récepteur.

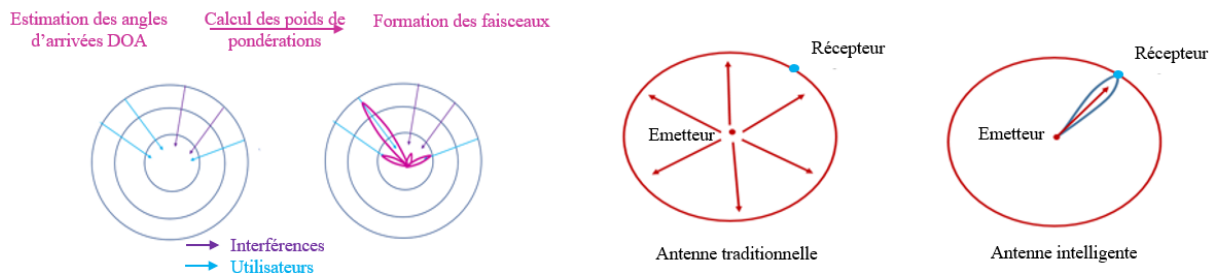


Figure 4. 1 : Comparaison entre antenne classique et antenne intelligente en se basant sur DOA.

Une solution consiste à utiliser un dispositif capable de localiser la direction du récepteur, suivi d'une technique de pointage électronique pour concentrer l'énergie rayonnée vers cette direction spécifique comme montre la figure ci-dessus. Cela permet de réaliser des économies d'énergie importantes et de limiter la pollution électromagnétique dans l'environnement. Une antenne intelligente qui est associée à un tel dispositif complet permet la détection de l'angle d'arrivée et la formation du diagramme de rayonnement en direction du récepteur. Cela contribue au développement durable en optimisant l'utilisation de l'énergie électromagnétique. Le premier élément de la chaîne de traitement du signal est un dispositif de détection de la position du récepteur, qui peut être réalisé lors de la demande de communication, avant même que le correspondant ne soit localisé. [4.1-4.5]

2.2. Le principe de fonctionnement

La méthode DOA (détection d'angle d'arrivée) est au cœur de la technologie des systèmes d'antennes intelligentes qui fournissent des informations précises sur la direction des sources de signal pour les réseaux de communication sans fil [4.1].

La plupart des systèmes de mise en œuvre avancés d'antennes intelligentes cherchent à maximiser les signaux souhaités tout en supprimant simultanément les sources d'interférences. Dans les systèmes de communication mobile cellulaire, une station de base doit localiser les

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

téléphones mobiles qui tentent d'accéder au réseau et suivre les téléphones qui sont en fonctionnement dans cette cellule. Par conséquent, l'opérateur de réseau peut fournir des services supplémentaires tels que la localisation des téléphones et la localisation automatique de l'appelant pour les appels d'urgence qui peuvent également être réalisés. La réalisation de ces tâches dépend principalement des directions estimées des signaux reçus.

Jusqu'à présent, il existe trois catégories utilisées pour mesurer les angles d'arrivée, à savoir : la mesure d'amplitude, la mesure de phase et la mesure spatiale. La première catégorie utilise uniquement les informations d'amplitude fournies par le réseau d'antennes. Elle est basée sur la différence d'amplitude entre les éléments du réseau pour estimer l'angle d'arrivée ; par conséquent, elle n'est pas sensible aux erreurs de phase entre les canaux ou ça peut également être plus sujette aux variations d'amplitude dues à des facteurs environnementaux, à la distance de la source, aux propriétés du milieu de propagation. La mesure d'amplitude peut être considérée comme une méthode moins complexe puisqu'elles nécessitent moins de capteurs. Cependant, elle pourrait avoir des limitations en termes de résolution angulaire par rapport à des techniques plus avancées telles que le traitement de phase et les méthodes spatiales et elle pourrait offrir une résistance accrue aux conditions défavorables.

La deuxième catégorie estime l'angle d'arrivée en se basant sur les données de phase fournies par le réseau d'antennes. La figure [4.2] décrit un exemple de ce type qui est l'algorithme de l'interféromètre, qui exploite la différence de phase entre les éléments du réseau. Ce type de mesure d'angle d'arrivée est très précis et insensible au bruit. Cependant, elle nécessite plusieurs capteurs et peut être sensible aux erreurs de synchronisation et aux erreurs d'amplitude entre les éléments des réseaux.

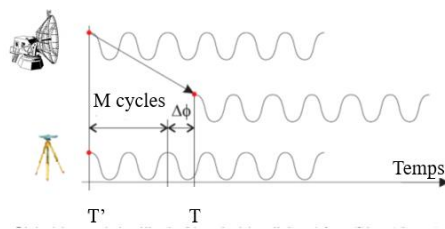


Figure 4. 2: Principe de mesure de phase.

La dernière catégorie utilise à la fois les informations de magnitude et de phase fournies par le réseau d'antennes simultanément pour trouver l'angle d'arrivée. Les méthodes spatiales sont plus puissantes que les techniques de mesure de phase ou basées sur l'amplitude pour estimer avec précision les angles d'arrivée des signaux dans des scénarios complexes et

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

relativement résistantes au bruit. Cependant, elles peuvent être plus complexes à mettre en œuvre et peuvent nécessiter des données de haute qualité pour obtenir des résultats optimaux.

Caractéristiques	Mesure - d'Amplitude	Mesure de Phase	Méthodes Spatiales
Principe de base	Différences d'amplitude entre antennes	Différences de phase entre antennes	Exploitation de l'information spatiale
Sensibilité aux erreurs de phase	Non sensible	Sensible	Faible
Sensibilité aux erreurs d'amplitude	Élevée	Non sensible	Modérée
Résolution angulaire	Faible	Modérée à élevée	Élevée
Gestion de signaux multiples	Modérée	Modérée	Élevée
Adaptation aux environnements complexes	Faible	Modérée	Élevée
Exigences de calibrage	Faible	Modérée	Modérée
Complexité algorithmique	Faible	Faible	Modérée à élevée
Utilisation de ressources informatiques	Faible	Faible	Modérée à élevée
Sensibilité au bruit	Modérée à élevée	Élevée	Modérée
Adaptation aux environnements dynamiques	Modérée à élevée	Modérée	Modérée à élevée

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

Adaptation aux signaux en mouvement rapide	Modérée à élevée	Modérée	Modérée à élevé
Sensibilité au bruit	Modérée à élevée	Élevée	Modérée
Pertinence pour le Beamforming	Modérée	Faible à modérée	Élevée
Utilisation pour diriger le faisceau	Limitée	Limitée	Fondamentale
Adaptation aux signaux en mouvement rapide	Modérée à élevée	Modérée	Modérée à élevée

Tableau 4. 1 : Comparaison entre les différentes méthodes

Dans la mise en œuvre réelle, les systèmes de détection de direction font face à une série de défis complexes engendrés par l'environnement de propagation. Parmi ces défis figurent la propagation multi-trajets, qui résulte en des retards variables des signaux réfléchis, ainsi qu'une disponibilité limitée de données instantanées pour effectuer des mesures. L'environnement de propagation présente également une variabilité temporelle qui peut fluctuer en fonction de facteurs tels que les conditions météorologiques et les changements environnementaux. Un obstacle supplémentaire provient des propriétés du canal à fading, où la puissance des signaux reçus subit des variations aléatoires et rapides due aux obstructions et aux réflexions des ondes, conduit souvent à un faible rapport signal sur bruit ce qui complique davantage la tâche de détecter précisément la direction des signaux émanant de sources spécifiques.

Dans certaines situations, il se produit une proximité considérable entre les émetteurs, et il devient essentiel de déterminer avec précision la direction ou la position de ces sources. Cela s'avère particulièrement crucial dans des applications à la fois militaires et civiles, telles que les systèmes radar, les opérations de sécurité publique et la localisation des appels d'urgence. L'objectif est d'améliorer la communication, d'accroître la qualité des transmissions, d'optimiser la réception et d'augmenter les performances des systèmes sans fil, tout en réduisant au minimum les interférences. Ces efforts se traduisent par une expérience utilisateur améliorée, une utilisation plus efficace des ressources, et une plus grande fiabilité des systèmes de communication.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

L'efficacité des systèmes de localisation reposent principalement sur le choix d'une méthode d'estimation d'DOA appropriée. La précision, la vitesse d'exécution et la complexité computationnelle de l'algorithme doivent être prises en compte en fonction des besoins spécifiques de l'application.

2.2. Modélisation de l'angle d'arrivée (DOA)

Dans ce rapport, nous avons entrepris une évaluation expérimentale de trois algorithmes distincts visant à estimer les angles d'arrivée (DOA) de manière précise. Les méthodes examinées sont Beamscan, MUSIC et MVDR. Ces choix ont été délibérés pour aborder différents aspects des défis liés à l'estimation d'angle d'arrivée, couvrant ainsi un large éventail de scénarios et de besoins.

✚ L'algorithme Beamscan

C'est une technique de détection de l'angle d'arrivée des signaux utilisés dans les systèmes d'antennes intelligentes. Son objectif principal est d'estimer avec précision la direction des signaux reçus. L'algorithme Beamscan est mis en œuvre en suivant trois étapes principales. Tout d'abord, la formation du faisceau consiste à ajuster les poids des éléments du réseau d'antennes de manière à créer un faisceau étroit dirigé vers une direction spécifique. Cela permet de concentrer la réception des signaux provenant de cette direction, améliorant ainsi la sensibilité de la détection. Ensuite, l'algorithme effectue un balayage de l'espace en évaluant la puissance du signal reçu pour différentes directions. Pendant cette phase, la puissance du signal est mesurée dans chaque direction candidate. Cela permet à l'algorithme de collecter des informations sur les différentes directions d'arrivée possibles des signaux. Dans l'algorithme Beamscan, plusieurs équations mathématiques sont utilisées pour la formation du faisceau et la détection de l'angle d'arrivée des signaux. Lors de la formation du faisceau, les poids des éléments du réseau d'antennes sont ajustés pour créer un faisceau étroit dans une direction spécifique.

Cela peut être réalisé en utilisant des équations :

$$w = R^{-1} * a \quad \text{Equation 4.1}$$

Où w représente le vecteur des poids des éléments du réseau,

R est la matrice de covariance des signaux reçus

Et a est le vecteur des coefficients d'excitation des éléments du réseau.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

Une fois le faisceau formé, l'algorithme effectue un balayage de l'espace en mesurant la puissance du signal reçu pour différentes directions. Cette mesure de puissance peut être calculée à l'aide d'équation :

$$P = |w^H * x|^2 \quad \text{Equation 4.2}$$

Où P représente la puissance du signal reçu,

w est le vecteur des poids des éléments du réseau,

x est le vecteur des signaux reçus

Et H représente l'opération de transposition conjuguée.

Enfin, la détection de la direction d'arrivée se fait en sélectionnant la direction quand la puissance du signal reçu est maximale. Cette direction correspond à l'angle d'arrivée estimé du signal. En identifiant la direction avec la puissance maximale, l'algorithme détermine la direction d'où provient le signal avec la plus grande probabilité.

L'avantage de l'algorithme Beamscan réside dans sa capacité à détecter avec précision la direction d'arrivée des signaux, même dans des environnements complexes avec des signaux d'interférence. Cependant, La méthode Beamscan, présente certains défis à prendre en compte. La directivité du faisceau résultant peut parfois être limitée par les propriétés du réseau d'antennes, ce qui peut réduire la précision des estimations d'angle. De plus, en présence d'interférences ou de signaux indésirables, la méthode peut être sujette à des confusions entre différentes sources, ce qui pourrait altérer les résultats. Enfin, une calibration précise du réseau d'antennes est essentielle pour éviter les erreurs d'estimation dues à des décalages de phase ou d'amplitude.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

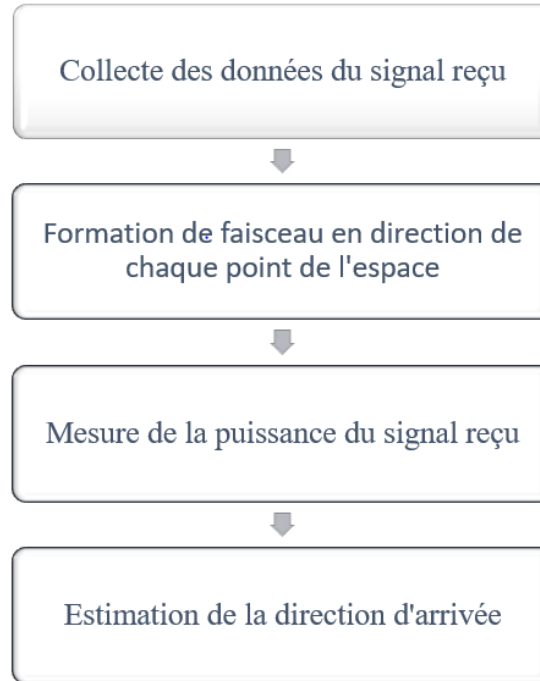


Figure 4. 3 : Les étapes pour détecter les angles d'arrivées en utilisant Beamscan.

✚ Algorithme de réponse sans distorsion à variance minimale (MVDR)

Cet algorithme MVDR est également appelé estimateur du maximum de vraisemblance ou méthode de Capon, du nom de la personne qui l'a proposé. L'idée de cette méthode est similaire à celle de la méthode du maximum de vraisemblance, qui estime la puissance des signaux provenant d'une direction donnée et considère tous les autres signaux comme des interférences. Dans l'approche de localisation, la méthode MVDR utilise la méthode du maximum de vraisemblance pour déterminer la direction des sources entrantes plutôt que leur puissance.

$$P_{MVDR}(\theta, \phi) = \frac{1}{\mathbf{a}(\theta, \phi)^H \mathbf{R}^{-1}_{xx} \mathbf{a}(\theta, \phi)} \quad \text{Equation 4.3}$$

Dans cette équation, $P_{MVDR}(\theta, \phi)$ représente la puissance estimée du signal dans la direction (θ, ϕ) .

$\mathbf{a}(\theta, \phi)$ est le vecteur des poids associés à cette direction,

\mathbf{R}^{-1}_{xx} est la matrice inverse de covariance des signaux reçus (estimée),

Et \mathbf{H} représente l'opération de transposition conjuguée.

Cette équation est utilisée pour calculer la puissance du signal après qu'il ait été passé par les poids du filtre P_{MVDR} . Elle permet de mesurer la puissance du signal dans une direction spécifique, en prenant en compte la suppression des interférences provenant d'autres directions. L'algorithme de Capon est intensif en termes de calcul en raison de l'inversion d'une matrice de

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

rang complet. Dans l'algorithme MVDR (Minimum Variance Distortionless Response), l'objectif principal est de déterminer la direction des sources entrantes plutôt que leur puissance. L'algorithme parvient à cela en ajustant les poids pour supprimer les interférences provenant de directions non souhaitées. Pour déterminer la direction des sources entrantes, l'algorithme MVDR utilise le concept de suppression spatiale. Il vise à minimiser la puissance des signaux provenant de directions non désirées tout en maximisant la puissance du signal provenant de la direction souhaitée. En adaptant les poids du filtre en fonction de la matrice de covariance estimée des signaux reçus, l'algorithme MVDR oriente le faisceau principal du réseau d'antennes vers la direction souhaitée. Cela permet de réduire efficacement les interférences provenant d'autres directions. Contrairement aux techniques basées sur la puissance, telles que le beamforming, l'algorithme MVDR se concentre sur l'extraction d'informations directionnelles plutôt que sur les niveaux de puissance globaux. Cela le rend particulièrement adapté aux applications où une estimation précise de la direction est essentielle, comme la localisation de sources ou le beamforming adaptatif dans les systèmes de communication sans fil.

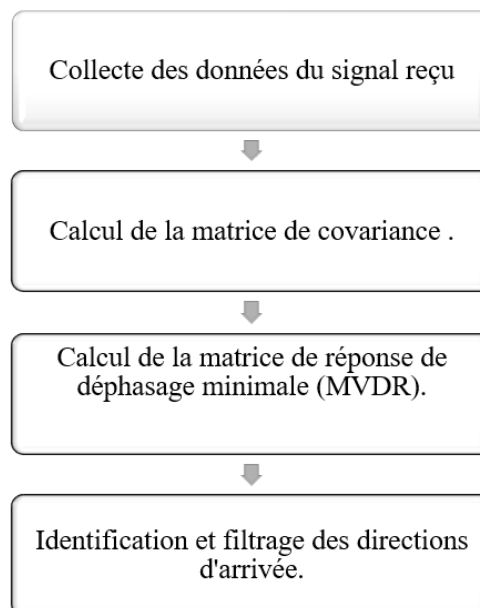


Figure 4. 4: Les étapes pour détecter les angles d'arrivées en utilisant MVDR.

✚ L'algorithme MUSIC (Multiple Signal Classification)

C'est une méthode utilisée pour estimer les angles d'arrivées des signaux provenant de différentes sources. Cette méthode est largement utilisée dans le domaine du traitement du signal et de la détection d'angles d'arrivée dans les antennes. L'idée principale de l'algorithme MUSIC repose sur la décomposition en valeurs propres de la matrice de covariance des signaux

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

reçus par le réseau d'antennes. En utilisant cette décomposition, l'algorithme peut identifier les sous-espaces associés aux signaux de bruit et aux signaux d'intérêt.

L'algorithme MUSIC calcule un spectre de pseudo-puissance qui représente la contribution de chaque angle d'arrivée aux signaux reçus. Plus précisément, il est basé sur l'inversion de la matrice de covariance des signaux de bruit pour estimer les vecteurs propres correspondant aux signaux d'intérêt. Ensuite, il évalue la puissance associée à chaque angle d'arrivée en utilisant ces vecteurs propres. En comparant les valeurs de puissance obtenues pour différents angles d'arrivées, l'algorithme MUSIC peut déterminer les directions des sources de signal. Les angles correspondant aux valeurs de puissance maximales sont considérés comme les angles d'arrivée estimés.

L'algorithme MUSIC est apprécié pour sa capacité à détecter les angles d'arrivées même en présence de signaux de bruit et d'interférences. Il est couramment utilisé dans des domaines tels que la localisation des sources, la communication sans fil, le radar et d'autres applications nécessitant une estimation précise des angles d'arrivée des signaux. (Voir figure ci-dessous)

$$PMUSIC(\theta) = \frac{1}{a(\theta, \phi)^H Q Q^H a(\theta, \phi)} \quad \text{Equation 4.4}$$

Où $a(\theta, \phi)$ correspond à la direction d'arrivée des signaux reçus des utilisateurs.

Et Q est la matrice de covariance du bruit.

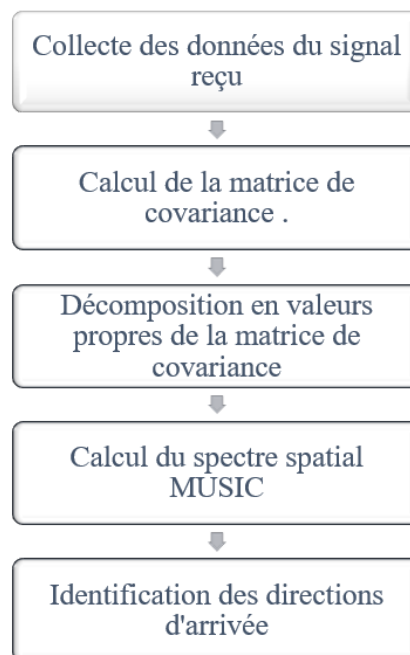


Figure 4. 5: les étapes pour détecter les angles d'arrivées EN UTILISANT MUSIC.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

3. Comparaison entre différentes méthodes de détection des angles d'arrivés

Dans cette étude, trois approches distinctes ont été employées pour la détection de signaux, à savoir Beamscan, MVDR et MUSIC, chacune offrant une méthode unique pour estimer la direction d'arrivée (DOA) des signaux. La méthode Beamscan repose sur un processus de balayage avec un faisceau conventionnel pour balayer l'espace et d'identifier les directions d'arrivée des signaux. Le Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) est une variante avancée de Beamscan, mais il sert à minimiser la variance du signal reçu dans la direction d'intérêt ce qui permet de mieux distinguer ce signal du bruit., améliorant ainsi la précision de la DOA. Enfin, l'algorithme MUSIC repose sur une méthode de sous-espace qui distingue les directions d'arrivée en analysant les pics du spectre spatial, grâce à la décomposition en valeurs propres de la matrice de corrélation. Dans l'ensemble de ces approches, les pics dans le spectre spatial jouent un rôle crucial en représentant les directions d'arrivée des signaux reçus, fournissant ainsi des informations essentielles pour la détection et l'analyse des signaux.

Dans cette étude, nous avons évalué les performances des techniques Beamscan, MVDR et MUSIC en utilisant à la fois un réseau linéaire uniforme (ULA) et un réseau rectangulaire uniforme (URA). Ces évaluations ont été réalisées pour un ensemble donné d'angles d'azimut et d'élévation [4.18].

Prenons le premier exemple concret : considérons un ULA composé de 4 éléments d'antennes isotropes, espacés de $\lambda/2$ les uns des autres. Supposons également que deux signaux sont incidentes sur chaque réseau, l'un avec un de 45° et l'autre avec un angle de -20° . Ces paramètres définissent les conditions dans lesquelles nous avons testé les méthodes Beamscan, MVDR et MUSIC [4.18].

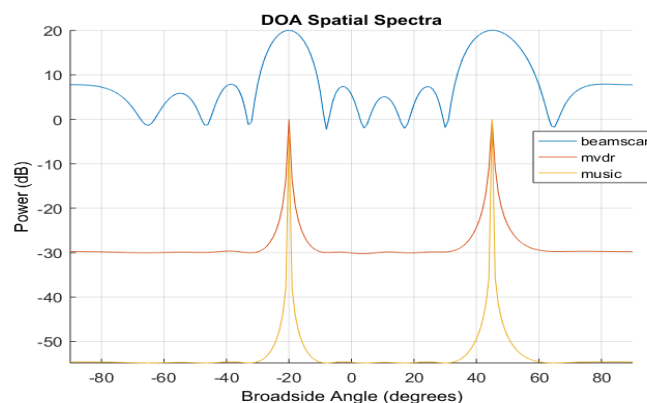


Figure 4. 6: Estimation des angles d'arrivée des deux signaux largement espacés.

Comme illustré dans la figure, les trois algorithmes parviennent clairement à détecter les deux signaux en question. L'estimateur MVDR se distingue par une bande passante plus étroite

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

par rapport à la méthode de l'algorithme Beamscan, mais il offre en contrepartie une résolution plus élevée. En termes de performances, l'algorithme MUSIC se démarque en offrant des résultats supérieurs en matière de résolution et de précision. L'estimation de la direction d'arrivée obtenue grâce à l'algorithme MUSIC dépasse celle obtenue à l'aide des techniques MVDR et Beamscan. En effet, les pics obtenus avec l'algorithme MUSIC sont plus pointus et présentent des amplitudes supérieures, comme le montre la figure.

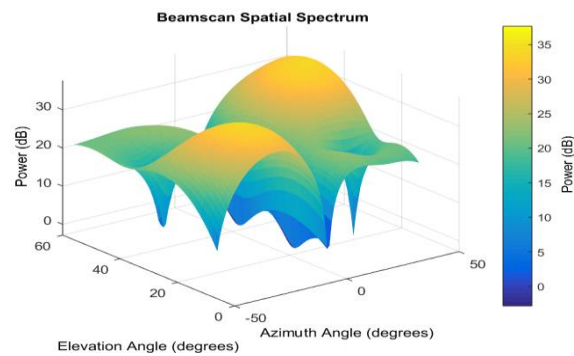


Figure 4. 7: Diagramme en 3D de détection des angles d'arrivées largement espacées par Beamscan.

De manière équivalente, pour illustrer le même exemple sous forme de diagramme tridimensionnel, si nous employons une zone de balayage préalablement définie, l'estimateur Beamscan effectue son balayage exclusivement dans cette région. En conséquence, il génère le spectre spectral qui se restreint à cette zone spécifique. Les crêtes du spectre se matérialisent en deux endroits distincts, reflétant la transmission de seulement deux signaux, comme représenté dans le schéma précédent.

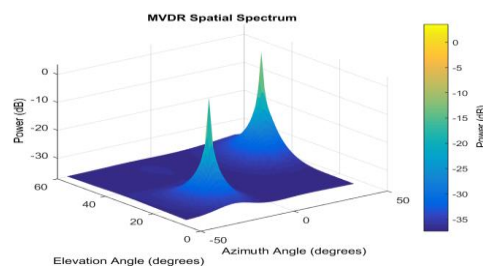


Figure 4. 8: Diagramme en 3D de détection des angles d'arrivées largement espacées par MVDR.

L'estimateur MVDR est reconnu pour sa capacité à offrir une bande passante étroite et une résolution élevée par rapport à l'algorithme Beamscan. Son fonctionnement repose sur la minimisation de la variance de la puissance de sortie, tout en conservant une réponse non déformée pour le signal ciblé. En ajustant les poids du réseau d'antennes, l'estimateur MVDR peut renforcer le signal désiré tout en éliminant les interférences et le bruit. Cette adaptation

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

favorise une meilleure distinction entre des signaux étroitement espacés. Cette caractéristique est bien illustrée efficacement à l'aide d'un diagramme tridimensionnel.

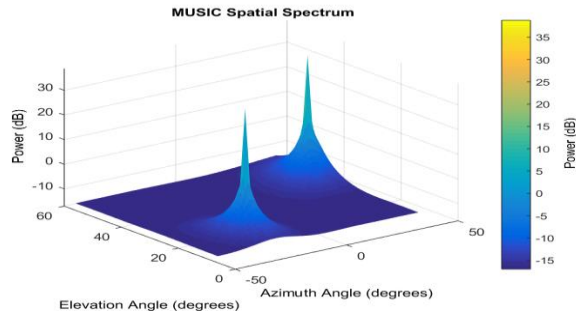


Figure 4. 9: Diagramme en 3D de détection des angles d'arrivées largement espacées par MUSIC.

L'algorithme MUSIC présente des performances encore plus supérieures en matière de résolution et de précision comparativement aux algorithmes MVDR et Beamscan, puisque le diagramme 3D présenté ci-dessous du modèle MUSIC révèle des pics plus prononcés que ceux observés dans les autres algorithmes. Cet algorithme repose sur l'utilisation de sous-espaces et exploite le sous-espace du signal pour estimer les directions d'arrivée de multiples sources. En procédant ainsi, il génère un spectre spatial en projetant les signaux reçus sur le sous-espace associé au bruit, puis identifie les pics dans ce spectre correspondant aux directions d'arrivée. L'algorithme MUSIC se révèle particulièrement efficace pour résoudre les signaux étroitement groupés et il est en mesure de fournir des estimations précises même dans des situations complexe.

Dans le cadre du deuxième scénario, Ces méthodes de détection d'angles d'arrivée, à savoir Beamscan, MVDR et MUSIC, ont été examinées pour leur capacité à résoudre les signaux entrants étroitement espacés, arrivant respectivement à 40° et 43° , Les analyses ont été menées en utilisant à la fois une représentation en deux dimensions (2D) et en trois dimensions (3D), afin de déterminer la précision et la résolution des estimations d'angles dans différents contextes dimensionnels. La figure ci-dessus illustre une confrontation de ces trois algorithmes, il est manifeste que l'algorithme MUSIC présente des pics plus nets qui coïncident avec les directions des signaux entrants. À présent, pour procéder à l'estimation de ces signaux, nous adoptons une autre configuration d'antennes connue sous le nom de "uniform rectangular array" (URA), qui désigne un réseau uniforme d'antennes disposées en forme rectangulaire. Nous optons pour une configuration URA avec une matrice de 4 par éléments, où la distance entre les éléments est de $\lambda/2$.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

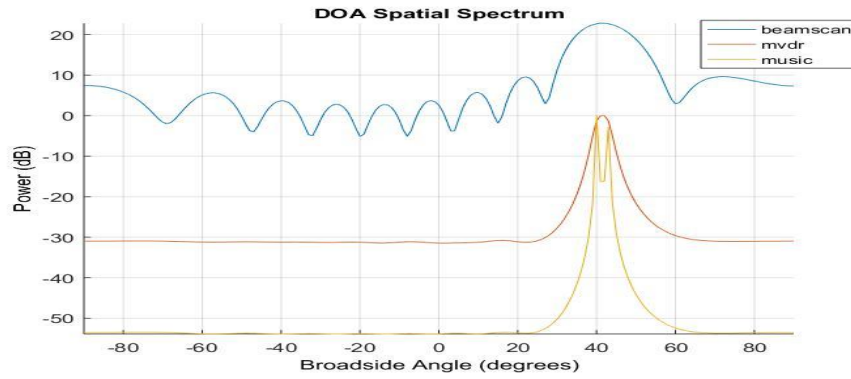


Figure 4. 10: Estimation des angles d'arrivée des deux signaux étroitement espacés.

Si la distance entre les deux signaux est plus courte que la largeur du faisceau, l'algorithme Beamscan se trouve dans l'incapacité de les discerner correctement. Ceci implique que lorsque les signaux sont émis à des angles d'arrivée de 43° et 40° , l'algorithme peut interpréter de manière erronée les orientations des signaux en question, aboutissant à la détection d'un unique pic au lieu de deux. En conséquence, le spectre spatial obtenu ne met en évidence qu'un seul pic, correspondant à une direction approximative.

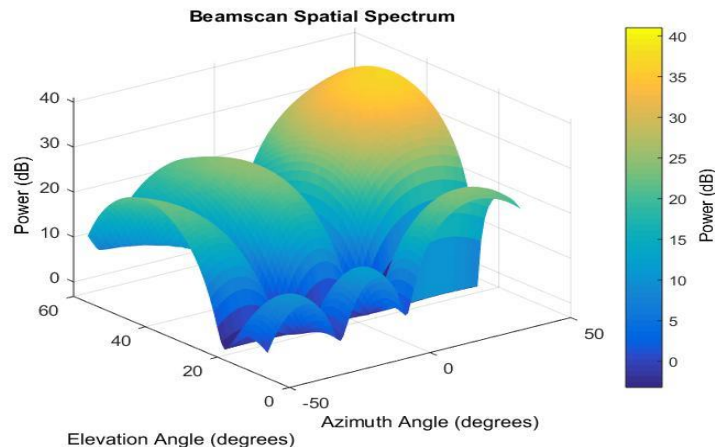


Figure 4. 11: Estimation des angles d'arrivée des deux signaux étroitement espacés.

L'algorithme Beamscan est une méthode utilisée dans le domaine du traitement du signal pour estimer la direction à partir de laquelle les signaux sont reçus par un réseau d'antennes. Toutefois, cette méthode présente des limitations lorsque les signaux sont rapprochés les uns des autres ou proviennent de la même direction. Cette problématique est clairement illustrée dans l'image ci-dessous.

La restriction de performance de l'algorithme Beamscan est attribuée à sa sensibilité à la résolution angulaire et à la largeur du faisceau. Lorsque deux signaux sont très proches l'un de l'autre, avec un écart angulaire inférieur à la résolution angulaire de l'algorithme ou à la largeur

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

du faisceau, l'algorithme éprouve des difficultés à les distinguer avec précision. En conséquence, il tend à identifier uniquement un seul pic au lieu de réussir à discriminer les deux pics correspondant à deux directions distinctes.

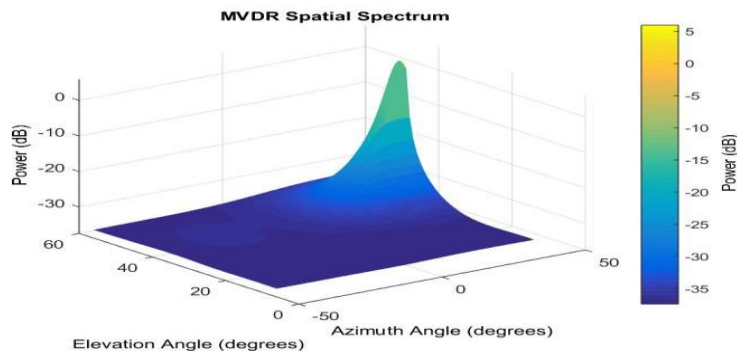


Figure 4. 12: Diagramme en 3D de détection des angles d'arrivées largement espacées par MVDR

En situation de proximité des signaux, leurs influences se superposent, engendrant une difficulté à les discriminer. Tant l'algorithme MVDR que l'algorithme Beamscan ne parviennent pas à détecter de manière satisfaisante les deux signaux étroitement espacés et à établir une distinction nette entre les deux signaux distincts. Cette situation se traduit par l'apparition d'une seule estimation approximative de pic.

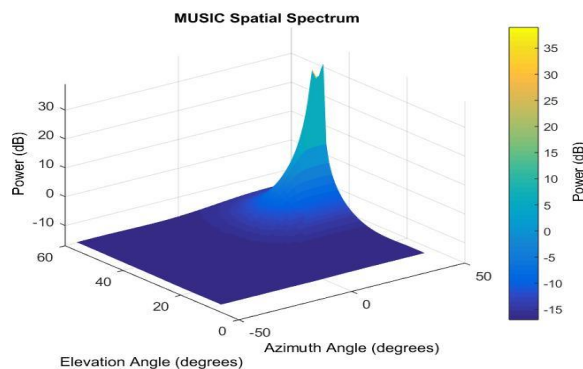


Figure 4. 13 : Diagramme en 3D de détection des angles d'arrivées largement espacées par MUSIC.

La représentation graphique présentée illustre de manière évidente les améliorations substantielles apportées par l'algorithme MUSIC en comparaison avec les méthodes Beamscan et MVDR. Les résultats obtenus en termes d'estimation de la direction d'arrivée grâce à l'algorithme MUSIC se révèlent nettement plus performants, soulignant sa compétence à résoudre de façon précise les situations impliquant plusieurs signaux ainsi que la localisation minutieuse d'émetteurs en proximité. Cette observation met en lumière l'efficacité intrinsèque de l'algorithme MUSIC lorsqu'il s'agit de résoudre des scénarios complexes où les signaux sont étroitement rapprochés.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

Afin de surmonter cette problématique, notre choix s'est porté sur l'utilisation de l'algorithme MUSIC, en raison de sa capacité à identifier de manière précise deux signaux en proximité. L'algorithme MUSIC se démarque des autres approches existantes grâce à sa fiabilité dans la séparation et l'identification de ces signaux. Notre approche sophistiquée pour résoudre ce défi spécifique repose sur l'utilisation de l'algorithme MUSIC. Ce dernier tire parti des caractéristiques spectrales des signaux pour estimer leur position et leur espacement, en s'appuyant sur une analyse de la matrice de corrélation des signaux reçus.

En détaillant le processus, l'algorithme MUSIC commence par la construction d'une matrice de covariance basée sur les échantillons des signaux capturés. Ensuite, il procède à la décomposition en valeurs propres de cette matrice, permettant l'extraction des vecteurs propres associés aux valeurs propres les plus faibles. Ces vecteurs propres sont ensuite utilisés pour établir l'espace de sous-espace du signal. En utilisant cet espace de sous-espace du signal, l'algorithme MUSIC détecte les pics dans le spectre de puissance qui correspondent aux emplacements des signaux recherchés. Ces pics indiquent de manière précise les positions des signaux étroitement espacés, résolvant ainsi le problème rencontré.

En résumé, pour l'estimation d'angle d'arrivée, le choix d'utiliser MUSIC repose sur une évaluation minutieuse des avantages qu'elles apportent en termes de précision, de vitesse d'exécution et de complexité algorithmique. Cet estimateur a été sélectionné pour répondre aux besoins spécifiques des scénarios envisagés tout en maximisant l'efficacité de l'analyse et de trianguler avec précision la position des utilisateurs.

Les blocs DOA jouent un rôle clé dans l'optimisation des antennes intelligentes et l'amélioration des fonctionnalités avancées nécessaires pour atteindre ces objectifs. Tout d'abord, les blocs DOA sont essentiels pour la formation de faisceaux adaptatifs dans les antennes intelligentes de la 5G. En détectant avec précision les angles d'arrivée des signaux, ces antennes peuvent concentrer leur énergie dans la direction des utilisateurs ciblés, ce qui permet d'améliorer la qualité du signal et d'augmenter la capacité du réseau. Cela permet également de réduire l'interférence entre les utilisateurs et d'améliorer la couverture globale du réseau. De plus, les blocs DOA contribuent à la gestion efficace de l'interférence dans les systèmes 5G. En identifiant les directions des sources indésirables, ces systèmes peuvent appliquer des techniques avancées de suppression de l'interférence, telles que l'annulation de faisceau et le filtrage spatial, pour atténuer les signaux indésirables et améliorer la qualité de la communication.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

4. Conception du système de formation des faisceaux

Ce travail se concentre sur la présentation en détail d'un système de beamforming numérique d'une flexibilité et d'une reconfigurabilité notables. Ce système est spécialement élaboré en utilisant un réseau d'antennes conjointement avec des cartes USRP, opérant dans la plage de fréquences C. Ce système est doté de la capacité remarquable de manipuler et de diriger le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes par le biais de réglages électroniques et numériques. Cette capacité lui permet de s'adapter de manière dynamique à son environnement, cela signifie qu'il peut ajuster la direction et la forme du faisceau de communication sans nécessiter de mouvement physique des antennes avec l'objectif ultime de maximiser les performances, la capacité et l'efficacité du réseau et d'optimiser la communication avec les dispositifs distants en focalisant l'énergie du signal dans la direction souhaitée tout en minimisant les interférences et en améliorant la qualité du signal reçu. Un autre avantage mentionné est la prise en charge des communications full-duplex. Le mode full-duplex permet à un système de transmettre et de recevoir simultanément sur la même fréquence. Cela peut augmenter l'efficacité spectrale et permettre une communication plus rapide et fluide. En outre le système comprend également un bloc de détection de faisceaux. Cela signifie qu'il peut surveiller les conditions environnementales, les signaux reçus et d'autres paramètres pour ajuster dynamiquement le modèle de rayonnement afin de maintenir des performances optimales même lorsque les conditions changent [4.6-4.10].

En mettant l'accent sur la création ciblée d'applications de beamforming numérique spécifiquement conçues pour la 5G, ce système se distingue. Grâce à son adaptabilité exceptionnelle, il offre une plateforme idéale pour une expérimentation rapide de nouvelles approches en utilisant des radios logicielles (SDR). Par ailleurs, une caractéristique essentielle réside dans sa capacité à effectuer des ajustements peu complexes de la fréquence de l'oscillateur local (LO). Étant un élément crucial des récepteurs radio, l'oscillateur local détermine la fréquence à laquelle le signal est converti en vue de son traitement ultérieur. La possibilité de moduler cette fréquence se révèle indispensable pour s'aligner sur différentes bandes de communication ainsi que pour s'adapter aux conditions environnementales variables.

L'USRP est reconnu comme une solution de radio logicielle (SDR) économique en comparaison avec les radios conventionnelles. Sa conception vise à être à la fois flexible et configurable, donnant aux utilisateurs la possibilité de personnaliser leur système en fonction de leurs besoins et des applications visées. Grâce à l'USRP, les utilisateurs ont la liberté d'exploiter différentes fréquences radio, modulations et protocoles de communication, tout en

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

étant capables de passer aisément entre diverses configurations qui fonctionnent dans une plage de fréquences allant de 70 MHz à 6 GHz.

Ces dispositifs s'alignent avec les fréquences sub-6 GHz, qui sont largement répandues et ont déjà servi de base à d'autres technologies de communication sans fil comme la 5G, la 4G, IoT, Radars et le Wi-Fi. Cette compatibilité leur permet de s'intégrer aisément dans les infrastructures existantes, ce qui rend le déploiement de réseaux 5G exploitant la bande C plus abordable, efficace et économique. Cela offre un compromis favorable entre la couverture et la capacité.

En revanche, l'exploitation des ondes millimétriques requiert l'ajout d'un émetteur-récepteur agissant comme passerelle entre les antennes et l'USRP. Cette démarche entraîne une augmentation des coûts et de la complexité par rapport aux fréquences sub-6 GHz.

Notre système de beamforming numérique repose sur une architecture à deux volets distincts, chacun jouant un rôle essentiel dans le processus.

-La première partie est de nature analogique, et elle est chargée de la gestion initiale du signal. Elle se consacre à la réception et l'émission des signaux bruts provenant des antennes du réseau, elle proposé comprend deux paires d'antennes multicouches, une antenne d'angle et un générateur de signal VXG. Cette phase est cruciale pour garantir la qualité et la stabilité du signal initial. L'élément analogique du prototype.



Figure 4. 14: VXG.

-La deuxième partie, quant à elle, relève de la composante numérique du système. Elle s'occupe du traitement du signal reçu précédemment. Cette étape englobe des processus complexes tels que la démodulation, la conversion analogique-numérique (CAN), la détection des angles d'arrivées, la multiplication, l'addition, le calcul des poids, la formation de faisceau

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

numérique et la gestion des algorithmes de traitement du signal. Cette partie numérique permet une personnalisation précise du modèle de rayonnement des antennes, en ajustant la direction du faisceau et en optimisant la communication en fonction de l'environnement et des objectifs spécifiques.

En reliant habilement ces deux volets, l'analogique et le numérique, notre système de beamforming numérique parvient à orchestrer un processus fluide et cohérent, allant de la réception des signaux bruts à leur traitement avancé et ciblé, le tout dans le but d'optimiser la qualité, la portée et l'efficacité des communications dans des environnements divers.

Notre système de formations de faisceau se distingue de cette application [4.7] (qui présente application système de formation de faisceau SDR (radio logicielle) à 28 GHz pour la 5G). Tous les modules analogiques et numériques ont été correctement développés et décrits, ce qui nous a permis d'obtenir un système fonctionnant dans la bande C. L'utilisation d'USRP a permis une architecture flexible et polyvalente, car toutes ses caractéristiques pouvaient être ajustées numériquement. Les résultats expérimentaux ont montré une bonne concordance entre les diagrammes de rayonnement simulés et mesurés, avec la possibilité de vérifier des techniques pour façonner le faisceau du réseau, ainsi que pour le diriger, de manière simple, en contrôlant l'amplitude du signal et la phase de chaque canal dans l'USRP. Ce système présente une grande flexibilité et une grande évolutivité pour être utilisé dans une large gamme d'équipements en deux points principaux. Tout d'abord, nous avons ajouté un bloc DOA (Direction of Arrival) pour déterminer la direction d'arrivée des signaux, dans ce cas on parlera des applications en temps réel. De plus, nous avons éliminé les transceivers (émetteur-récepteur) car nous travaillons dans la bande C, dans ce cas on a réduit le cout et les pertes. Enfin, notre choix de carte se démarque également, car elle prend en charge la réception et l'émission simultanées, ce qui vous permet d'utiliser une seule carte pour deux canaux au lieu de deux cartes distinctes. La figure montre un système DBF a 4 éléments au récepteur. Le système utilise un algorithme de formation de faisceaux pour combiner les signaux reçus des 4 antennes afin de former un faisceau pointé vers la source du signal.

Notre système SDR se distingue également du système de [4.16] qui utilisé de déphaseurs numériques commandés (phase Shifters), de démodulateurs AD8347, d'un modulateur AD8349, d'une antenne réseau, et de cartes de commande STM8S-Discovery intégrant une description en langage C pour générer des phases synthétisées. L'étude approfondie de leur système a conduit à un nouveau système de télécommunication intelligent, démontrant des performances particulièrement intéressantes pour les antennes des stations de base des réseaux de télécommunications. Toutefois, le système de AMOR présente des lacunes, notamment le manque d'algorithmes de localisation des sources (DOA) et

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

des problèmes tels que le couplage entre les antennes, ainsi que la nécessité d'intégrer l'ensemble du système dans une seule carte, en utilisant des cartes STM8S-Discovery et FPGA Spartan 3E. Notre système se distingue également par sa reconfigurabilité et son agilité, offrant ainsi une flexibilité supplémentaire dans les applications en temps réel.

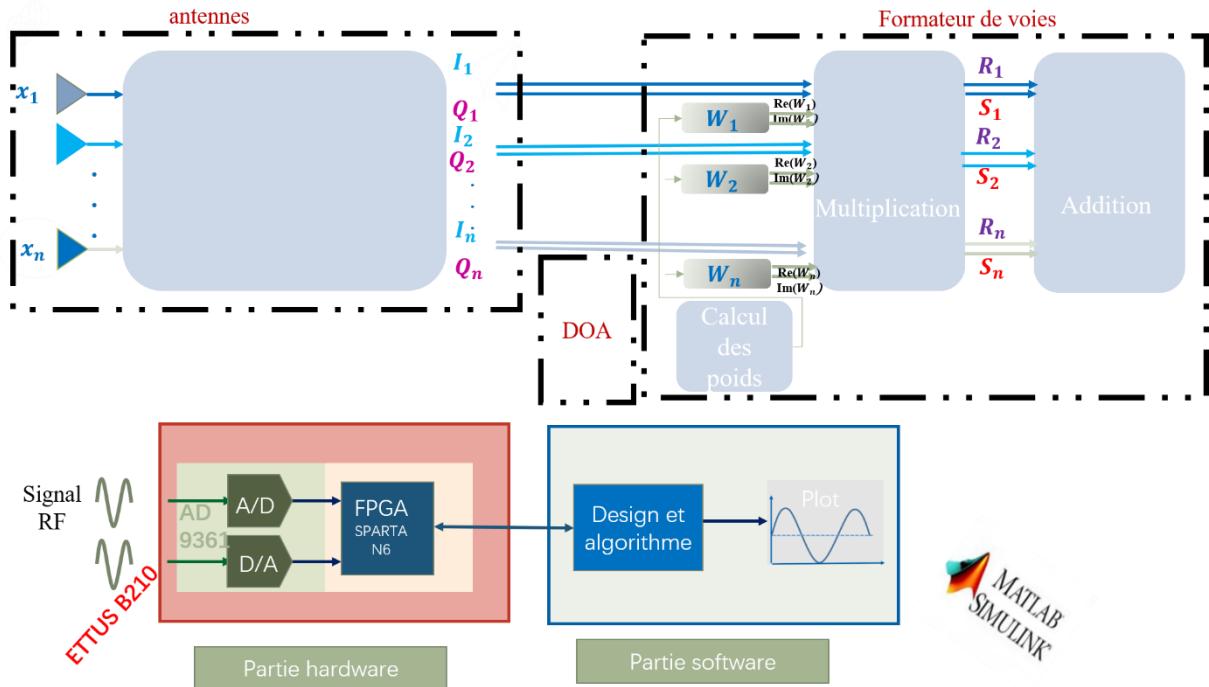


Figure 4. 15: Architecture à deux volets système de beamforming numérique : Analogique et numérique.

5. Implémentation du beamforming

Dans notre configuration expérimentale, nous avons testé la transmission, le traitement des données et la réception dans la chambre anéchoïque de l'IRSEEM, sans aucun autre élément entre l'émetteur (Tx) et le récepteur (Rx). Pour que le signal puisse être transmis de manière adaptée au canal de transmission, nous avons ajusté les paramètres d'amplitude d'un signal sinusoïdal à l'aide des générateurs de signal VXG, qui prennent en charge les fréquences RF de 1 MHz à 31,8 GHz. Nous avons choisi de réaliser la transposition de fréquence à 3,48 GHz, qui correspond à la fréquence de résonance de notre antenne conçue qui a été choisie pour que l'antenne puisse être directement connectée à un USRP et opérer efficacement dans cette plage de fréquence, ce qui est essentiel pour le bon fonctionnement de l'application de communication sans fil ou de traitement des signaux prévue. La modulation a été sélectionnée en raison de son faible coût, de sa flexibilité en matière de prototypage et de sa facilité de mise en œuvre avec le générateur de signal VXG. Ce signal est envoyé d'un angle d'incidence de 40 degrés capté par un système DBF qui sera décrit dans la section suivante. Ce signal est transmis avec un angle d'incidence de 40 degrés.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

Une fois que le signal est modulé avec succès, nous interconnectons l'antenne cornet au générateur de signal VXG pour transmettre le signal. L'antenne cornet utilisée dans notre expérimentation est le QRH18 (QUAD RIDGEDHORN).

Dans la section précédente, nous avons exposé en détail les éléments analogiques et numériques, en fournissant une description approfondie de chaque composant utilisé. Cette partie se consacre à présenter les fonctionnalités essentielles des systèmes de beamforming numérique (DBF) dans le contexte de la 5G, et elles peuvent être synthétisées comme suit : la maximisation du signal pertinent tout en adaptant la suppression des interférences, l'optimisation du rapport signal sur bruit (SNR) et l'assurance d'une directivité précise du lobe principal.

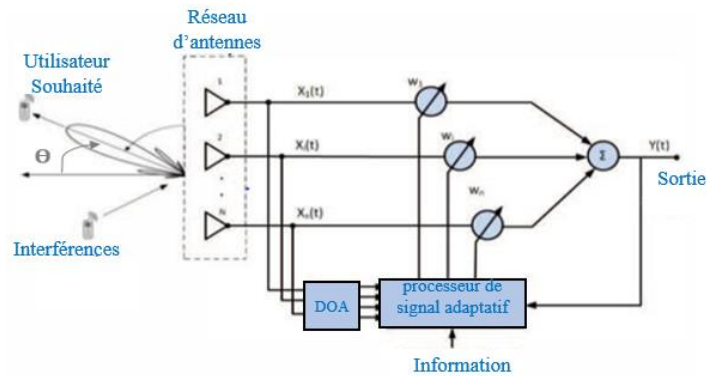


Figure 4. 16: Architecture du système DBF.

Les systèmes d'antennes intelligentes adaptatives répondent de manière optimale à ces critères, grâce à la fusion ingénieuse d'éléments d'antenne et de méthodes de traitement numérique du signal. Pour illustrer cette idée, la Figure ci-dessous représente un prototype DBF conçu pour quatre éléments linéaires. Ce prototype intègre trois composantes majeures, débutant par l'unité radio, suivie par l'unité de traitement du signal, et se concluant par le réseau de formation de faisceau.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

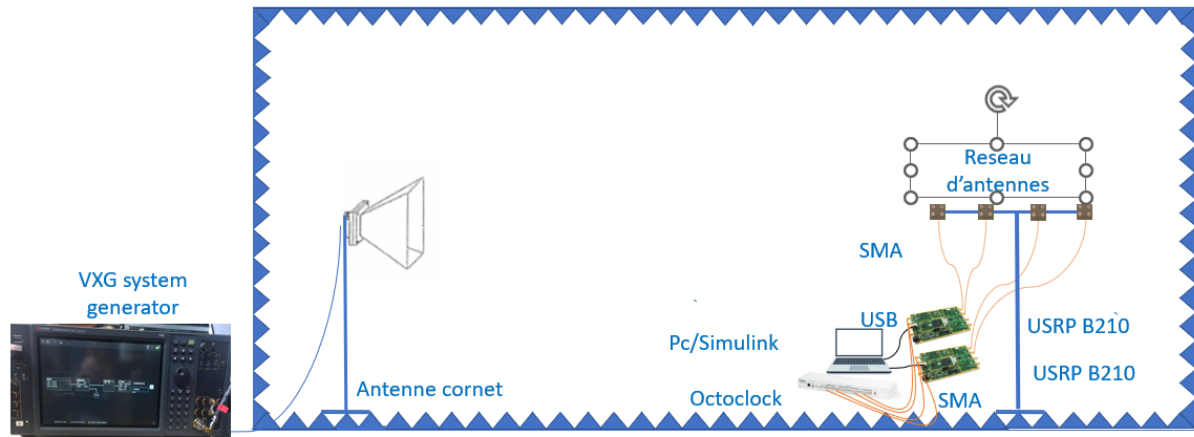


Figure 4. 17 Implémentation du système DBF a 4 éléments

✚ L'unité radio

Au sein de l'unité radio du système DBF à 4 éléments, une configuration de quatre antennes multicouches est exploitée pour la réception des signaux radio. Ces antennes ont été spécialement conçues pour être compatibles avec les entrées des USRP B210, des dispositifs radio logiciels polyvalents. Le signal capté est soumis à une démodulation au moyen d'une paire d'USRP B210, associés à un modèle du récepteur Simulink.

Le processus de démodulation consiste à extraire le signal d'information d'origine d'un signal porteuse modulé. Les dispositifs USRP se chargent des tâches de traitement du signal embarqué telles que la conversion numérique-analogique (DAC/ADC), le filtrage, l'interpolation, la décimation et la décomposition en traitement d'échantillons I/Q. Le signal démodulé est un signal numérique complexe avec une partie réelle et imaginaire, contenant les informations utiles extraites du signal reçu.

Pour démoduler un signal à l'aide d'un USRP, la communication entre le PC hôte et l'USRP est établie en utilisant l'interface UHD (USRP Hardware Driver), disponible dans Simulink/MATLAB avec les pilotes et bibliothèques appropriés installés.

Dans le modèle Simulink, le bloc récepteur SDRU est utilisé pour interagir avec l'USRP. Il est configuré en sélectionnant la plateforme et le périphérique correspondant au numéro de série. Des paramètres tels que la fréquence centrale, le débit d'échantillonnage et le gain sont définis pour optimiser la qualité du signal. La configuration des canaux est définie sur [1 2] pour permettre la réception simultanée sur les deux canaux, en exploitant la capacité MIMO 2×2 et la fonctionnalité full-duplex du USRP B210.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

La sortie du bloc récepteur SDRU est un signal numérique complexe, qui est ensuite connecté au bloc "Select Column" dans Simulink pour distinguer les données de chaque canal et traiter chaque canal séparément et de manière synchrone. La sortie des deux canaux de chaque USRP B210 est connectée à l'entrée des blocs de traitement du signal.

Un sous-système de démodulation est utilisé dans le logiciel pour extraire le signal d'information de la porteuse. Il sépare les composantes en phase (I) et en quadrature (Q) du signal complexe de chaque canal. Un filtre passe-bas est inséré pour éliminer les signaux haute fréquence et laisser passer les signaux basse fréquence. Enfin, le signal démodulé peut être connecté à un analyseur de spectre pour visualiser le spectre et déterminer si les informations du message ont été correctement récupérées et reçues.

Unité de traitement du signal :

L'unité de traitement du signal est responsable de différentes tâches dans le système de formation de faisceaux numérique (DBF). Ces tâches comprennent notamment la détection de l'angle d'arrivée du signal, le calcul des poids de formation de faisceaux et la multiplication des signaux reçus par ces poids.

-Détection de l'angle d'arrivée : L'une des fonctionnalités essentielles du DBF est de déterminer l'angle d'arrivée du signal. L'une des capacités fondamentales du DBF réside dans sa capacité à identifier l'angle d'incidence du signal. Cette donnée est cruciale pour orienter le faisceau du système dans la direction voulue. L'introduction de ce bloc de détection revêt une importance majeure, et le choix s'est porté sur la méthode MUSIC.

-Calcul des poids :

Après la détection de l'angle d'arrivée du signal, la procédure de calcul des coefficients de pondération pour la formation de faisceaux est enclenchée. Ces coefficients de pondération jouent un rôle crucial en déterminant la part respective de chaque antenne dans le processus de formation du faisceau. La détermination de ces coefficients implique l'emploi d'équations spécifiques ainsi que de coefficients particuliers, notamment les coefficients de pondération spatiale. La valeur de chaque coefficient est attribuée en fonction de l'angle d'arrivée précédemment identifié [4.17]. Cette étape délicate influence directement la performance et la précision du faisceau formé.

Afin d'atteindre une directivité spécifique ou de cibler un angle de rayonnement principal particulier, on fait appel à des algorithmes pour calculer les coefficients de pondération assignés à chaque élément d'un réseau d'antennes. Ces algorithmes jouent un rôle crucial dans la

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

conception de diagrammes de rayonnement adaptés aux besoins spécifiques d'une application. Dans notre cas, nous avons opté pour la simplicité de la facilité d'utilisation et de la flexibilité en sélectionnant un algorithme de calcul des coefficients de pondération qui satisfait nos besoins. Nous avons exécuté cette méthode en utilisant MATLAB [4.17] pour accomplir notre objectif. Cependant, nous gardons la flexibilité d'adopter n'importe quel autre algorithme adaptatif pour le calcul des coefficients de pondération. Après avoir établi l'algorithme adéquat pour calculer les coefficients de pondération, il est possible de transférer et de charger les poids calculés dans Simulink. Cette opération est réalisée à l'aide de blocs tels que "From Workspace", qui autorisent l'incorporation de ces poids dans la simulation globale du système. L'exemple initial vise à orienter le faisceau d'antennes vers une direction de 40 degrés. Il met en place un récepteur DBF qui utilise un réseau d'antennes linéaire composé de quatre éléments. Au cœur de cette technique de récepteur DBF se trouve la manipulation intelligente des signaux reçus par chaque antenne. L'objectif est de les combiner de manière constructive dans une direction donnée, tout en réduisant l'influence des signaux indésirables provenant d'autres directions. Pour réaliser cette orientation souhaitée, des calculs de poids et de phases sont exécutés. Des coefficients de pondération spécifiques sont assignés à chaque antenne pour ajuster les signaux reçus, permettant d'obtenir le diagramme de faisceau désiré.

Ce tableau présente les poids associés à chaque antenne pour piloter le faisceau vers 40 degrés.

W_1	$-0.223083466137435 + 0.112843994683404i$
W_2	$0.089820061774881 - 0.233307429163232i$
W_3	$0.089820061774881 + 0.233307429163232i$
W_4	$-0.223083466137435 - 0.112843994683404i$

Tableau 4. 2 : Le calcul des poids de pondération

Ces coefficients guident la modification et la combinaison des signaux pour concentrer la sensibilité du récepteur dans la direction de 40 degrés, améliorant ainsi la réception des signaux de cette direction.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

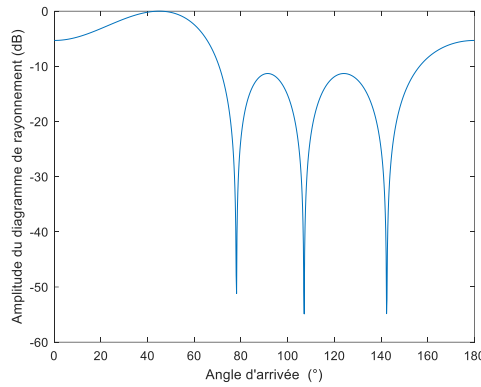


Figure 4. 18: Graphique rectangulaire de la magnitude du diagramme de faisceau pour un réseau linéaire à 4 éléments pointant vers 40 degrés.

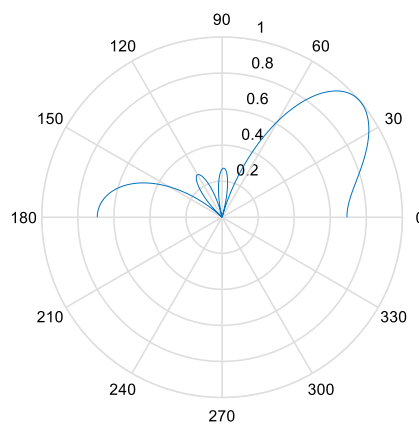


Figure 4. 19: Graphique polaire de la magnitude du diagramme de rayonnement pour un réseau linéaire à 4 éléments pointant vers 40 degrés.

Il est à noter que si l'angle d'arrivée calculé diffère, par exemple autour de 40 degrés, l'algorithme de calcul des coefficients de pondération[4.17] serait ajusté en conséquence pour aligner le faisceau dans la nouvelle direction ciblée. Le temps total de simulation utilisé pour ce récepteur DBF était de 2×10^{-5} secondes. En effet les figures 4.18 et 4.19 présente l'orientation du faisceau vers la direction désirée (40°).

Le deuxième exemple de filtre spatial utilisé dans le récepteur DBF pour un réseau d'antennes linéaire à quatre éléments génère un motif de faisceau avec trois nulls positionnés à différentes positions angulaires : 30°, 60° et 90° depuis l'extrémité latérale droite. Le calcul des coefficients de pondération a été réalisé en utilisant la méthode de placement des nulls basée sur les polynômes de Schelkunoff, qui peut positionner un maximum de $N-1$ nulls pour un réseau d'antennes à N éléments. Un programme MATLAB a été créé pour calculer les coefficients de pondération d'un réseau d'antennes linéaire avec des spécifications de placement des directions d'annulation sur son diagramme de rayonnement[4.17]. Le calcul des coefficients

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

de pondération implique la résolution d'un système linéaire contenant des informations sur la position des directions d'annulation (nulls).

Le Tableau ci-dessous présente les coefficients de pondération obtenus pour les paramètres spécifiés du faisceau.

W_1	$0.710179717842185 - 0.460179717842186i$
W_2	$-0.710179717842186 - 0.960179717842186i$
W_3	$-0.710179717842185 + 0.960179717842186i$
W_4	$0.710179717842186 + 0.460179717842186i$

Tableau 4. 3 : Le calcul des poids de pondération

Dans ce cas, le calcul des coefficients de pondération a été effectué en utilisant la méthode de placement de nuls par polynômes de Schelkunoff (Annexe 4.4)

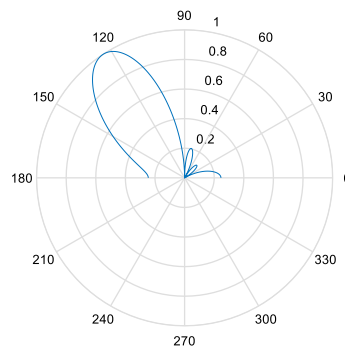


Figure 4. 20: Graphique polaire de la magnitude du diagramme de rayonnement pour un réseau linéaire à 4 éléments avec des zones d'annulations de diagramme de faisceau positionnés à 30° , 60° et 90° .

La Figure ci-dessus illustre un graphique polaire de l'amplitude théorique du diagramme de rayonnement avec les coefficients de pondération indiqués dans le Tableau ci-dessus.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

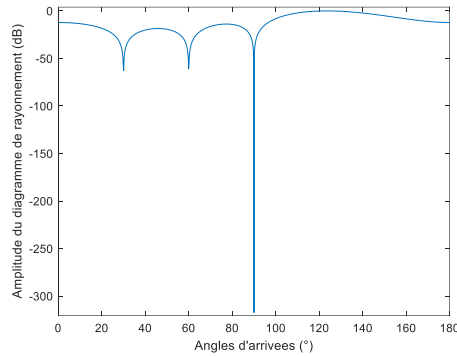


Figure 4. 21: Graphique rectangulaire de la magnitude du diagramme de rayonnement pour un réseau linéaire à 4 éléments avec des nuls de diagramme de faisceau positionnés à $30,06^\circ$, $59,94^\circ$ et $90,08^\circ$.

La figure ci-dessus montre une représentation graphique rectangulaire de l'amplitude du faisceau en unités dB, révélant des nuls placés aux angles d'arrivée de $30,06^\circ$, $59,94^\circ$ et $90,08^\circ$ depuis l'extrémité latérale droite, avec une profondeur de null de -62 dB, -56 dB et -200 dB respectivement.

-Multiplication :

Lors de l'étape de multiplication, les signaux captés par chaque antenne subissent une multiplication avec les poids de formation de faisceaux associés. Cette action vise à amplifier le signal souhaité tout en réduisant l'amplitude des signaux non désirés ou des interférences provenant d'autres directions. Les signaux d'entrée sont multipliés par les coefficients de poids, agissant à la fois en phase et en amplitude.

-Addition :

Finalement, lors de l'ultime étape du système DBF, les signaux en phase et en quadrature, obtenus après la multiplication, sont sommés. Cette action combine les signaux provenant des diverses antennes afin de constituer le signal de sortie définitif du système DBF.

Synchronisation :

Afin de garantir le fonctionnement optimal du système DBF, une synchronisation précise entre les antennes et les composants s'avère essentielle. L'Octo Clock se positionne comme un outil efficace dans la réalisation de cette synchronisation en diffusant des signaux temporels et fréquentiels de grande précision. La configuration uniforme des paramètres des cartes, tels que la fréquence centrale, l'horloge maître, le gain et la répartition des canaux, revêt une importance cruciale pour établir une synchronisation cohérente entre les antennes et les dispositifs.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

6. Validation expérimentale

Conformément à l'illustration ci-dessous, la mise en place de la configuration du prototype DBF a été accomplie au sein d'une chambre anéchoïque IRSEEM. Celle-ci englobe plusieurs composants essentiels, dont un générateur de signal VXG dont un générateur de signal VXG dédié à la génération du signal, qui est ensuite modulé à une fréquence de 3,48 GHz. Cette émission est orchestrée en reliant le VXG par une antenne cornet déjà trouvée dans la chambre IRSEEM. Du côté de la réception, cette configuration inclut quatre réseaux d'antennes patch, soigneusement interconnectés à deux cartes USRP B210. Ces cartes sont reliées à une horloge Octo Clock afin d'assurer une synchronisation précise entre les divers canaux. L'ensemble de cette configuration est complété par un ordinateur hôte (Host-PC) qui joue également un rôle central.

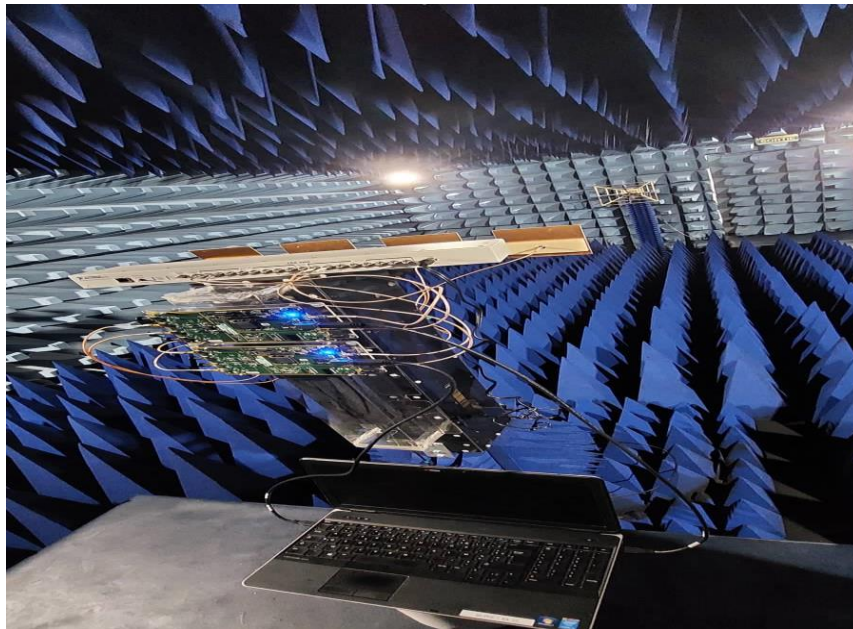


Figure 4. 22: système de Beamforming a 4 éléments

6.1.Transmission

Dans l'objectif de proposer une solution de formation de faisceau numérique abordable et adaptable, nous prévoyons d'utiliser un signal sinusoïdal d'une fréquence $f_m=1MHz$. Pour réaliser cette transmission, nous allons configurer le générateur de signal VXG de manière à émettre ce signal sinusoïdal, qui sera créé à l'aide de MATLAB et injecté dans l'entrée du VXG.

Afin de permettre la transmission du signal, une opération de modulation est appliquée, consistant à superposer les informations du message sur une porteuse ayant une fréquence considérablement plus élevée, précisément à $f_p=3.48$ GHz. Cette fréquence correspond à la

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

fréquence de résonance spécifique de l'antenne multicouche que nous utilisons pour cette transmission.

6.2. Réception

Afin de recevoir des signaux, un total de quatre antennes sont déployées dans une configuration de récepteur DBF (Digital Beamforming) à quatre éléments. Chaque paire d'antennes réceptrices est connectée à un dispositif USRP distinct. Cette disposition spécifique permet au système de recevoir simultanément des signaux à partir des quatre antennes. Les antennes sont soigneusement positionnées à une distance de $\lambda/2$ les unes des autres. Cette configuration est essentielle pour garantir que les canaux de réception sont linéairement indépendants les uns des autres, ce qui est fondamental pour une réception précise et fiable des signaux afin d'améliorer la qualité de réception du signal, renforcer la réception du signal et offrir une performance de réception optimale.

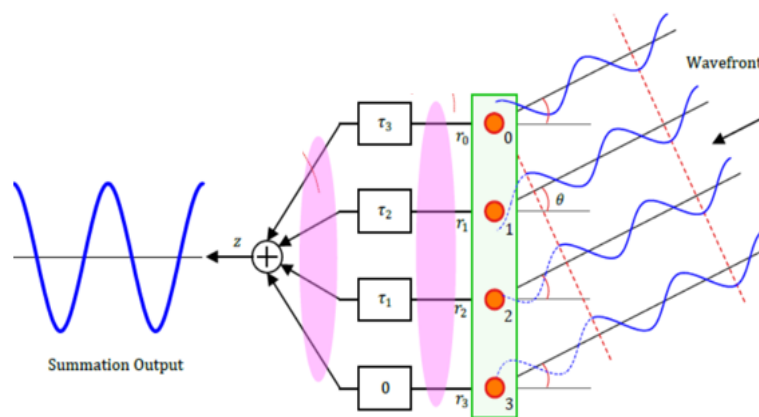


Figure 4. 23: Transmission du signal

Une fois que le signal entrant a été capté par les quatre antennes du système de formation de faisceau numérique (Figure 4.23), il est soumis à une étape de démodulation RF en utilisant UHD (Universal Hardware Driver) et Simulink. Le modèle Simulink spécifique à DBF comprend deux blocs "sdr receiver", chacun correspondant à une carte USRP B210, et chaque carte étant connectée à deux antennes distinctes. Cette configuration permet la réception simultanée de signaux grâce à la définition du "channel mapping" à [1 2] pour chaque bloc "sdr receiver" (Figure 4.23). Cela signifie que chaque bloc "sdr receiver" contrôle une carte USRP B210, et chaque carte est reliée à deux antennes, ce qui permet de recevoir des signaux simultanément à partir de toutes les antennes. L'ajustement du "channel mapping" à [1 2] assure que les deux ports récepteurs de chaque bloc "sdr receiver" sont utilisés pour la réception du signal. Cette configuration complexe permet une réception simultanée et coordonnée à partir

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

de toutes les antennes, améliorant ainsi la capacité du système DBF à traiter efficacement les signaux reçus, exploitant le principal avantage du USRP B210 qui réside dans sa double fonctionnalité, offrant à la fois deux émetteurs (TX) et deux récepteurs (RX).

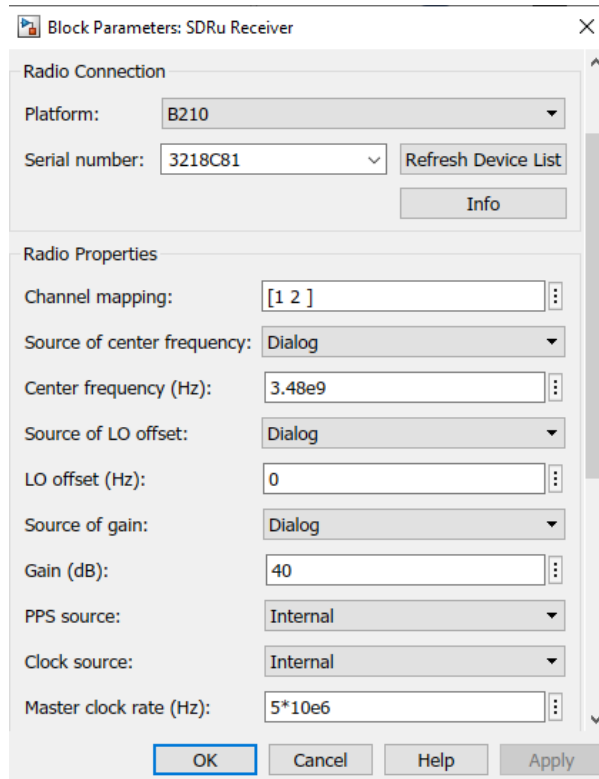


Figure 4. 24: Programmation du bloc sdru

Afin de réaliser une démodulation précise en utilisant un USRP et Simulink, la première étape consiste à configurer correctement le bloc "Sdru Receiver". Une fois cette configuration effectuée, un bloc de démodulation est intégré dans le modèle Simulink pour poursuivre le processus. Le bloc "Sdru Receiver" est essentiel car il permet de définir des paramètres cruciaux tels que la fréquence centrale, la largeur de bande et le taux d'échantillonnage, qui sont tous nécessaires pour la réception du signal en provenance de l'USRP. Cette étape préliminaire garantit que le signal est correctement acquis pour la démodulation ultérieure. En effet, le bloc "Sdru Receiver" effectue une transposition de fréquence (ou down-conversion) en utilisant la fréquence centrale spécifiée. Cela permet d'ajuster la fréquence du signal RF reçu à la fréquence centrale définie dans le bloc, de sorte que le signal soit à une fréquence appropriée pour la numérisation. La sortie de ce bloc produit des signaux complexes, généralement sous la forme de signaux en phase et en quadrature (I et Q) pour chaque canal. Ces signaux I et Q représentent les composantes en phase et en quadrature du signal reçu. Ils sont essentiels pour le traitement ultérieur, notamment la démodulation et la récupération des informations du message. Ces

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

signaux complexes sont souvent utilisés pour extraire les données du signal porteur, ce qui permet de récupérer efficacement les informations transmises à partir du signal reçu par l'USRP.

Une fois que le bloc "Sdr Receiver" est configuré, en incorporant le bloc "Select Column", les signaux reçus par les quatre antennes peuvent être traités de manière indépendante. Cela permet un traitement et une analyse séparés de chaque canal, ce qui permet le traitement simultané de plusieurs signaux reçus. Cette capacité permet au système de traiter et de démoduler simultanément les signaux provenant des quatre antennes. Ces signaux extraits, une fois correctement préparés, sont ensuite acheminés vers le bloc de démodulation 'démodulateur' qui est ensuite ajouté au modèle Simulink pour extraire ces informations du signal porteur.

Ce sous-système contient habituellement deux fréquences, dont la plus élevée est éliminée grâce à un filtre passe-bas. La fréquence résiduelle, plus basse, contient les informations du message.

Le modèle Simulink, spécialement adapté pour fonctionner avec l'USRP B210, a été élaboré dans le but de réaliser la démodulation du signal en bande de base et de produire des signaux en phase et en quadrature en sortie. Ce modèle offre également la possibilité de régler les signaux générés et reçus en termes de forme d'onde. La prochaine étape dans le développement du prototype pour la formation de faisceau numérique (DBF) implique l'intégration d'un calculateur de poids ainsi que des opérations de multiplication et d'addition. Ces éléments sont essentiels pour l'étalonnage du système et pour superviser le processus de formation du faisceau.

6.3. Synchronisation

L'Octoclock, une solution fiable, joue un rôle essentiel dans la distribution précise du temps et de la fréquence en fournissant des signaux de 10 MHz et 1 PPS (impulsions par seconde). Pour garantir une synchronisation harmonieuse entre les deux antennes Rx des deux dispositifs et favoriser l'interopérabilité entre les deux USRP B210, il est impératif que les quatre antennes Rx fonctionnent de manière parfaitement synchronisée. Après avoir transmis le signal sinusoïdal depuis l'antenne d'angle, il est indispensable d'ajuster uniformément divers paramètres sur les deux cartes, notamment en s'assurant que la fréquence centrale (3,48 GHz), la fréquence maître, le gain, la correspondance des canaux et l'interpolation ont la même valeur.

6.4. Unité de traitement des données et évaluation des performances

Une fois que le signal a été émis à l'aide de VXG et transmis par l'antenne cornet, notre système de beamforming a été conçu dans le but d'améliorer et d'optimiser la réception des

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

signaux. Ce système repose sur l'utilisation d'un modèle Simulink en combinaison avec deux dispositifs USRP. La figure ci-dessous présente le schéma de ce nouveau modèle Simulink, mettant en évidence la séquence du processus de beamforming.

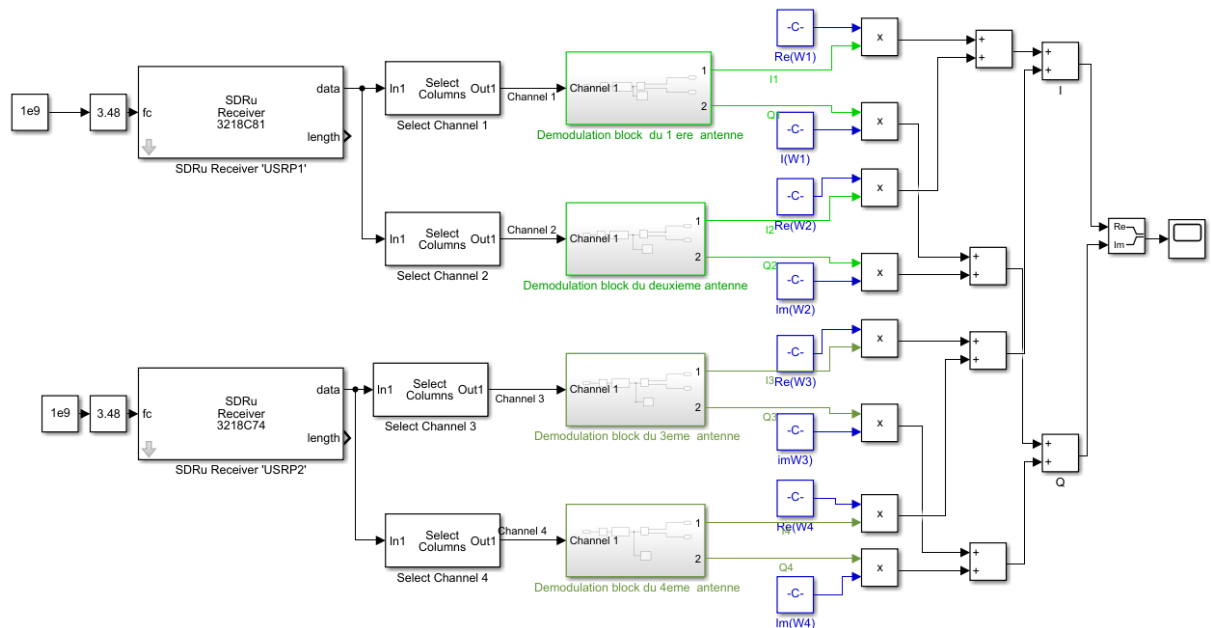


Figure 4. 25: Implementation du digital Beamforming en utilisant Simulink.

Ce système implique quatre éléments qui sont connectés à deux cartes USRP B210. Dans le modèle Simulink, déjà décrit dans la figure 4.25, le bloc "SDRu Receiver" assure la transposition en fréquence en bande de base et génère les signaux en phase (I) et en quadrature (Q), essentiels à la récupération des données. Utilisant une fréquence porteuse de 3,48 GHz, le bloc "Select Column" sépare les deux canaux de chaque USRP B210 associé à chaque antenne réceptrice, et un sous bloc démodulation qui intervient ensuite pour éliminer les fréquences supérieures à la fréquence porteuse, éliminer ainsi les interférences et le bruit et acheminer les signaux i et q séparément pour un traitement ultérieur. Cela génère quatre signaux en phase et quatre signaux en quadrature en sortie. Le calcul des poids est également effectué via un script MATLAB et ces poids sont ensuite intégrés dans Simulink. Les signaux I/Q, ainsi que les poids de pondération, sont soumis à une multiplication pondérée dans le processus de formation de faisceaux numérique. Finalement, les signaux en phase et en quadrature en bande de base sont combinés à l'aide d'une opération d'addition dans Simulink, produisant ainsi le signal I/Q final en sortie du récepteur de formation de faisceaux numérique. Ces signaux I/Q combinés sont ensuite utilisés pour analyser les données reçues du prototype de formation de faisceaux numérique.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

Afin d'évaluer les performances de la transmission de signaux sinusoïdaux sous un accès fréquentiel dynamique, nous avons soumis ce système à un test. Un réseau linéaire de 4 antennes est uniformément réparti avec une distance de λ sur 2 entre chaque antenne. Nous avons injecté un signal sinusoïdal d'une fréquence de 1 MHz que nous avons transposé en fréquence à 3,48 GHz à l'aide du VXG. Ce signal a été ensuite transmis à l'aide d'antennes cornet avec un angle d'incidence de 40 degrés. Il a été reçu par un réseau linéaire de 4 antennes espacées de $\lambda/2$, avec chaque paire d'antennes connectée à une carte USRP. Dans cette évaluation, nous avons examiné deux scénarios : le premier avec l'utilisation du Beamforming Numérique (DBF) et le deuxième sans DBF.

Dans le premier scénario avec beamforming, les poids de pondération sont calculés avec une grande précision en utilisant un script MATLAB, en tenant compte de l'angle d'incidence de 40 degrés, comme indiqué dans le tableau. Chaque poids est soigneusement déterminé en fonction de cet angle, puis associé à un canal spécifique. Une fois ces poids calculés, ils sont ensuite intégrés dans le modèle Simulink pour être utilisés dans le processus de formation de faisceaux. Ces poids sont employés pour multiplier les signaux en phase (I) et en quadrature (Q) respectivement, et les produits sont ensuite additionnés. Cette séquence d'opérations permet de récupérer de manière satisfaisante le signal sinusoïdal d'une fréquence de 1 MHz.

La figure 4.26 (a) illustre de manière significative les avantages d'un système de formation de faisceaux numérique (DBF). Dans cette représentation, nous pouvons observer que le système DBF a bien reçu le signal sinusoïdal de manière précise et sans déformation notable.

Plus précisément, la figure montre que le récepteur équipé du DBF a été en mesure de diriger son diagramme vers la source du signal sinusoïdal, lui permettant ainsi de capter le signal directement et avec une grande précision. Cela se traduit par une réception claire et robuste du signal, sans les distorsions ou interférences qui peuvent être présentes dans un système traditionnel où l'antenne est fixe et ne peut pas être orientée. Cela démontre que les poids associés à chaque antenne sont correctement attribués.

En conséquence, cette démonstration visuelle met en évidence l'une des principales capacités du DBF : la capacité de focaliser la réception sur une direction spécifique, ce qui se traduit par une réception plus puissante, de meilleure qualité et plus fiable des signaux, comme le signal sinusoïdal présenté dans la figure.

Les récepteurs DBF améliorent considérablement le rapport signal sur bruit et appliquent une filtration spatiale aux signaux reçus, ce qui permet d'éliminer les signaux indésirables et

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

d'améliorer la qualité de la réception. Les récepteurs DBF permettent de calculer le rapport signal sur bruit (SNR) et d'appliquer une filtration spatiale aux signaux reçus. Cela leur permet de supprimer les signaux parasites et indésirables qui pourraient affecter la qualité de la réception.

Dans le deuxième scénario, comme l'illustre la figure ci-dessous, sans un système de formation de faisceaux numérique (DBF), le signal subit une déformation et une distorsion lors de sa propagation. En effet, le signal est considéré comme du bruit dans ces conditions.

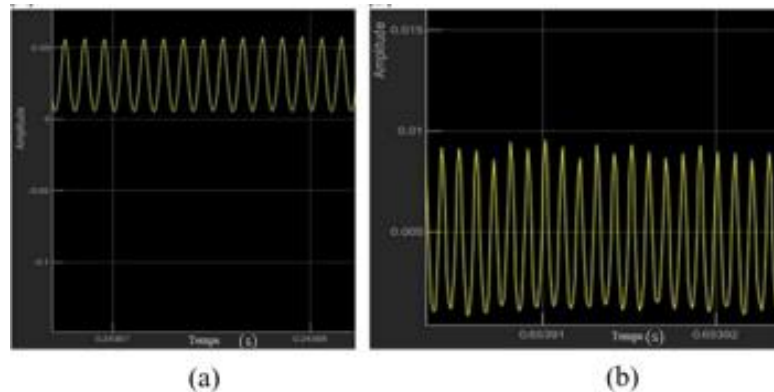


Figure 4. 26: signal récupéré : (a) avec DBF (b) sans DBF.

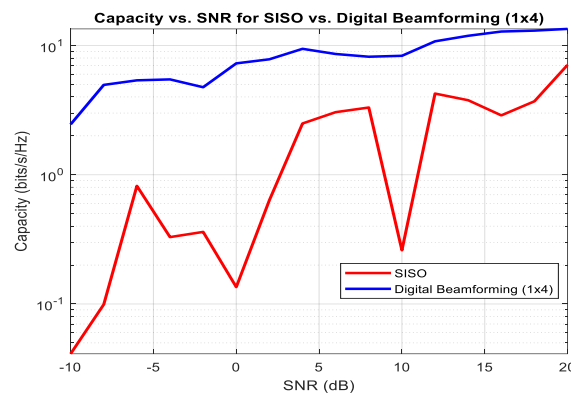


Figure 4. 27: Rapport signal bruit

La comparaison entre un système traditionnel de réception sans formation de faisceaux numérique (DBF) et un système équipé de DBF est notable à plusieurs égards. Dans un système traditionnel, recevant ainsi le signal de toutes les directions, même celles indésirables. Cette configuration expose le récepteur à des interférences et des distorsions potentielles, ce qui peut considérablement réduire la puissance du signal reçu, la qualité de la communication et la fiabilité globale. En revanche, un système DBF permet d'orienter son diagramme de rayonnement avec précision et dynamiquement vers la direction souhaitée, éliminant ainsi ou réduisant considérablement les interférences et les distorsions. Cette focalisation améliore la

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

puissance du signal reçu, la qualité de la communication et la fiabilité de la transmission. En résumé, un système DBF offre des avantages significatifs par rapport à un système traditionnel en optimisant la réception des signaux sans fil. Le système DBF offre généralement un SNR plus élevé par rapport au système traditionnel, car il permet de réduire le bruit et d'isoler plus efficacement le signal d'intérêt. Cela se traduit par une réception de meilleure qualité, une communication plus fiable et une meilleure performance globale du système (Augmentation de la portée du système, hausse du débit du système et Amélioration de la qualité de service du système)

Une méthode de formation de faisceau a été développée pour gérer la réception de signaux cohérents par un réseau d'antennes linéaires. Nous avons analysé les impacts de paramètres tels que le rapport signal sur bruit (SNR) en tenant compte du signal reçu. Il est important de souligner qu'après le processus de formation de faisceau, le signal reçu présentait une caractéristique beaucoup plus proche d'une onde sinusoïdale, contrairement à la situation où aucune formation de faisceau n'était effectuée, où les effets de l'interférence étaient clairement perceptibles.

Notre approche consistait à mettre en œuvre ce système de formation de faisceau sur une architecture composée de plusieurs périphériques radio logiciels universels (USRPs). L'objectif était de réaliser un filtrage spatial visant à éliminer les signaux d'interférence cohérente, tout en préservant le signal d'intérêt.

Ce récepteur DBF peut être employé comme étant une small cell. Le récepteur DBF est capable de former un faisceau dans la direction du signal souhaité, ce qui est essentiel pour une small cell. En outre, le récepteur DBF est capable de réduire les effets de l'interférence, ce qui est important pour les réseaux de small cells qui peuvent être densément déployés.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mis en place les éléments nécessaires pour un système de formation de faisceau numérique SDR (Software-Defined Radio) fonctionnant à 3,48 GHz a été conçu pour des applications 5G en utilisant des cartes USRP B210.

Par la réalisation de ce prototype, nous avons prouvé la faisabilité d'un tel système.

Le système de formation de faisceau numérique (DBF) offre une meilleure efficacité, améliore le rapport signal/bruit (SNR) en détectant et en traitant de manière adéquate les signaux proches. Ce prototype démontre une grande flexibilité, reconfigurabilité et robustesse pour les applications 5G, et il peut être utilisé dans un large éventail de domaines tels que le

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

radar, l'IoT et les systèmes de télécommunication. Cette étude complète a permis de mettre à jour un nouveau système de formation de faisceau SIMO (Single-Input Multiple-Output) flexible, reconfigurable et robuste.

Références bibliographiques

[4.1] Li, F., & Vaccaro, R. J. "Unified analysis for DOA estimation algorithms in array signal processing". *Signal processing*, 1991, 25(2), 147-169.

[4.2] Ruan, N., Wang, H., Wen, F., & Shi, J. "DOA estimation in B5G/6G". *Trends and challenges. Sensors*, 2022, 22(14), 5125.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

[4.3] Chung, H., Park, H., & Kim, S. "Leveraging Deep Learning for Practical DoA Estimation: Experiments with Real Data Collected via USRP. *Sensors*, 2022, 22(19), 7578.

[4.4] Tabassam, A. A., Ali, F. A., Kalsait, S., & Suleman, M. U. . "Building software-defined radios in MATLAB simulink-A step towards cognitive radios. " In 2011 UkSim 13th International Conference on Computer Modelling and Simulation , 2011 pp. 492-497

[4.5] Krishnaveni, V., Kesavamurthy, T., & Aparna, B. . "Beamforming for direction-of-arrival (DOA) estimation-a survey". *International Journal of Computer Applications*,2013, 61(11).

[4.6] Drissi M, Benjelloun N, Descamps P, Gharsallah A., "Design of digital beamforming for 5G access point Applications," *Microw Opt Technol Lett*, 2023, pp. 1-10.

[4.7] Marinho, D.; Arruela, R.; Varum, T.; Matos, J.N., "Software-Defined Radio Beamforming System for 5G/Radar Applications," *Appl. Sci.* 2020, 10, 7187.

[4.8] Chen, Y.-H.; Juang, J.-C.; Seo, J.; Lo, S.; Akos, D.M.; De Lorenzo, D.S.; Enge, P., "Design and Implementation of Real-Time Software Radio for Anti-Interference GPS/WAAS Sensors," *Sensors* 2012, 12, 13417-13440.

[4.9] C. Codau et al., "Experimental Evaluation of a Beamforming-capable System using NI USRP Software Defined Radios," 2019 18th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet), Galati, Romania, 2019, pp. 1-6.

[4.10] Codau, C., Buta, R., Pastrav, A., Palade, T., Dolea, P., & Puschita, E. "An overview of digital beamforming implemented on SDR platforms". In 2020 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), 2020, pp. 1-4.

[4.11] Drissi M, Benjelloun N, Descamps P, Gharsallah A., "Multilayer antenna dedicated to MIMO Beamforming antenna for 5G telecommunication applications," 2021 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications, 2021, pp. 183-188.

[4.12] Drissi M, Benjelloun N, Descamps P, Gharsallah A., "Designing the MIMO SDR-based Antenna Array for 5G Telecommunication," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ)*, 2022, 7, 167-173.

[4.13] Drissi M, Benjelloun N, Descamps P, Gharsallah A., "Analysis & Implementation of SISO, SIMO, MISO, and MIMO in 5G Communication Systems Based on SDR," *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 2023, 23, 140-146.

Chapitre 4 : Validation d'un système de Beamforming à 4 éléments

[4.14] Somanaidu, U., Telagam, N., Nehru, K., & Menakadevi, N., "USRP 2901 based FM transceiver with large file capabilities in virtual and remote laboratory". International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE), 2018, Vol. 14 No. 10.

[4.15] Xiong, W., Bogdanov, P., & Zheleva, M. (2019, April). "Robust and efficient modulation recognition based on local sequential iq features". In IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications, 2019, pp. 1612-1620.

[4.16] Smida, A., "Synthèse et implémentation de la méthode de Taguchi Application dans les antennes intelligentes," Mémoire de mastère, Électronique, Laboratoire de Physique de la Matière Molle, Unité de Recherche des Circuits et Systèmes d'Electroniques à Haute Fréquence, FST-Tunis, Tunis, Tunisie, 2013.

[4.17] Torres-Rosario, Juan A. IMPLEMENTATION OF A PHASED ARRAY Antenna using digital beamforming master of sciences.university of puerto rico,mayagüez campus. 2005

[4.18] MathWorks. (2023). MATLAB: A Language for Technical Computing. Disponible à l'adresse [<https://www.mathworks.com/help/phased/ug/direction-of-arrival-estimation-with-beamscan-mvdr-and-music.html>].

Conclusion générale

Conclusion générale

L'application du concept d'antennes intelligentes à un réseau de communication permet d'optimiser le diagramme de rayonnement dans toutes les directions de l'espace. L'économie de puissance rayonnée dans certaine direction autorise des communications avec des mobiles lointains qui ne seraient pas joignable dans le cas d'une antenne isotrope pour une puissance totale rayonnée donnée. L'annulation de certaines directions permet d'éliminer des émissions parasites qui sinon perturberaient les autres communications ou diminueraient le débit de transmission de données. Enfin, le fait d'être capable de ne rayonner que dans certaines directions évite d'interagir avec d'autres systèmes ou d'endommager certains équipements et "préserve" l'environnement.

Le travail de cette thèse contribue à concentrer l'énergie du signal reçu dans une direction donnée, Une approche basée sur un algorithme d'optimisation a été développée pour implémenter la technique de formation de faisceau et pour calculer les phases les amplitudes des excitations en fonction des spécifications désirés.

L'objectif principal était d'introduire un nouvel système reconfigurable, programmable, en temps réel, et à prix réduit de formation de faisceau, dans basant sur des antennes réseaux intelligentes pour répondre aux exigences du standard 5G. Cette thèse visait principalement à concevoir, optimiser et caractériser un système antennaire intelligent qui permet d'améliorer la qualité de la réception des signaux, en concentrant l'énergie du signal reçu dans une direction particulière, le beamforming augmente la sensibilité du récepteur dans cette direction, ce qui facilite la détection et la récupération de signaux faibles ou bruités. De plus, cette technique réduit les interférences provenant d'autres directions, ce qui améliore considérablement la qualité de la communication en minimisant les signaux indésirables. Le beamforming en réception est utilisé pour augmenter la portée de communication, suivre des sources mobiles, réduire le bruit, et même augmenter la capacité de transmission. Dans l'ensemble, il s'agit d'un outil puissant pour améliorer les performances des systèmes de communication sans fil 5G.

Le premier chapitre avait pour but de mettre en avant la nécessité d'adopter un nouveau standard pour les systèmes de communication des réseaux mobiles. Nous avons retracé l'évolution des générations précédentes de réseaux mobiles, puis nous avons exposé les multiples exigences du nouveau standard 5G. Ces exigences incluait l'augmentation de la

Conclusion générale

capacité, la réduction de la consommation d'énergie et la minimisation de la latence, parmi d'autres. Pour répondre à ces besoins, nous avons examiné diverses technologies sur lesquelles le nouveau standard 5G devrait s'appuyer. Nous avons montré comment l'utilisation de beamforming pouvait améliorer la qualité du signal. De plus, nous avons expliqué comment la technologie MIMO massive contribuerait à répondre aux exigences de débit accru et d'efficacité spectrale. Nous avons également présenté le concept du full duplex, qui permet une utilisation bidirectionnelle complète de la bande passante.

Dans le deuxième chapitre, Nous avons réalisé une analyse théorique des structures de réseau linéaires, planes et circulaires. Cette étude nous a permis de déterminer le facteur de réseau associé à chaque structure. Ce facteur de réseau caractérise la manière dont le gain varie en fonction du nombre d'éléments rayonnants. Nous avons conçu réseaux d'antennes destinées à être utilisées dans les Small Cells. Dans la seconde partie du chapitre, nous avons approfondi les diverses techniques de commutation de faisceau qui ont été documentées dans la littérature. La méthode la plus couramment utilisée à ce jour pour le repositionnement du faisceau est la technique du réseau phasé. Elle repose sur des modifications de l'amplitude et de la phase de pondération de chaque élément rayonnant du réseau. En conclusion, nous avons dressé un tableau synthétique de l'ensemble de ces techniques, résumant les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles.

Dans le troisième chapitre, un tout nouveau modèle Simulink a été développé pour la mise en œuvre de systèmes SISO (Single Input Single Output), SIMO (Single Input Multiple Output) et MISO (Multiple Input Single Output). Ce modèle a été créé afin de fournir une plateforme de simulation robuste et flexible pour étudier et évaluer ces différentes configurations de systèmes de communication. Le modèle Simulink permet de moduler et de démoduler les signaux, de simuler les canaux de transmission, d'appliquer des techniques de traitement du signal telles que la formation de faisceau, la diversité spatiale et d'analyser les performances du système en termes de taux d'erreur de bit, de rapport signal sur bruit, et d'autres métriques pertinentes.

Dans le dernier chapitre, nous avons abordé la conception et la mise en œuvre d'un système de formation de faisceau numérique. Tout d'abord, nous avons procédé à une comparaison des différentes directions d'arrivée (DOA). Ensuite, Un système d'antenne de formation de faisceau SDR (Software-Defined Radio) pour la bande C a été proposé pour des applications la 5G, Tous les modules analogiques et numériques ont été développés et décrits de manière adéquate.

Conclusion générale

L'utilisation d'USRP (Universal Software Radio Peripheral) a permis d'adopter une architecture flexible et polyvalente, car toutes ses caractéristiques pouvaient être ajustées numériquement.

Dans le cadre de cette thèse, un travail de beamforming en réception a été réalisé sur un système SIMO à 1x4 antennes. Les résultats ont montré que le beamforming permet d'améliorer la sensibilité et la sélectivité du système, ce qui se traduit par une amélioration de la qualité de la réception et une réduction de la probabilité d'erreur.

Les perspectives de cette thèse s'annoncent très prometteuses pour approfondir la compréhension et l'application du beamforming en réception. Les premiers résultats suggèrent que le beamforming peut significativement améliorer la qualité de la réception dans un système DBF à 4 éléments. L'optimisation du système, notamment en réduisant le niveau des lobes secondaires et en explorant d'autres algorithmes de beamforming, constitue une piste prometteuse pour des avancées significatives.

La refonte des systèmes avec OFDM et QPSK est une démarche pertinente, car ces modulations sont couramment utilisées dans les communications sans fil modernes. Elle permettra d'évaluer comment le beamforming peut être adapté aux besoins spécifiques de ces modulations.

L'étude du beamforming dans un système MIMO 4x4 est une extension naturelle qui pourrait révéler des avantages supplémentaires en termes de capacité et de qualité de la communication. Et l'exploration du beamforming dans un système SDR 4x4 offre une perspective pratique et réaliste pour évaluer les performances du beamforming dans des conditions réelles de communication.

En fin l'adaptation de ce système de Beamforming (DBF - Digital Beamforming) conçu pour la bande de fréquence C vers la bande millimétrique sera un défi, mais elle est certainement réalisable avec des ajustements appropriés.

Productions scientifiques

Productions scientifiques

[1] Drissi M, Benjelloun N, Descamps P, Gharsallah A. Multilayer antenna dedicated to MIMO Beamformig antenna for 5G telecommunication applications. 2021 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications, 2021; 183-188. DOI: 10.1109/CAMA49227.2021.9703463

[2] Drissi M, Benjelloun N, Descamps P, Gharsallah. Designing the MIMO SDR-based Antenna Array for 5G Telecommunication. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ).2022;7: 167-173.

DOI: 10.25046/aj070617

[3] Drissi M, Benjelloun N, Descamps P, Gharsallah A Analysis & Implementation of SISO, SIMO, MISO and MIMO in 5G Communication Systems Based on SDR. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security.2023;23:140-146.

DOI:10.22937/IJCSNS.2023.23.2.15

[4] Drissi M, Benjelloun N, Descamps P, Gharsallah A. Design of digital beamforming for 5G access point Applications. Microw Opt Technol Lett. 2023;1-10.

[5] Drissi M, Benjelloun N, Descamps P, Gharsallah . Design and Implementation of Multi-Antenna Systems in a USRP-Based Software-Defined Radio Using Simulink. MMS, 2023. ‘Cette conférence a été acceptée mais n'a pas encore été rendue publiée.’

Doi.org/10.1002/mop.33744

