



Mémoire de Master

Filière Électronique
Spécialité systèmes de télécommunications

Présenté par
Bahamid Hadjer

Technique beamforming avec MIMO-OFDM pour la transmission de données

Proposé par : Dr. ANOU

Année Universitaire 2018-2019

J'adresse mes remerciements, en premier, à mon bon dieu pour la volonté, la santé, le courage et la patience qui m'ont donné pour mener ce travail à terme.

A Mon père : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A Ma mère : Tu représentes pour moi, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mes chers frères et sœurs : Ismail, Sihem et ses adorables filles Lola et Batoul et son époux Ahmed, Nassima et son fils aimé Hichem, Hassiba, Zhor, Insaf et Karima : de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et réussite.

A mes grand-mères : Grace à ses conseils et ses prières je suis une personne meilleure. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de longue vie.

A Reda : pour leur encouragement et prières, je vous souhaite que du bon.

A mes tantes : Kheira, Houria, Fatima Zahra, Lila et Imene, ma belle-mère Nacira et ma belle-sœur Nihed : Elles vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien

A tous mes cousins et mes cousines maternelles et paternelles.

A mes ami(e)s de section : Yousra, Khawla, Soumia, Assia, Radia, Maroua, Asma, Fahima, Hadjer, Braham, Amine, Mohamed, Abd allah... : vous allez trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

Baba el hachemi et yama khadidja : J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait tes âmes dans sa sainte miséricorde

ملخص:

يعتمد هذا العمل على نقل المعلومات باستخدام تقنية تشكيل الشعاع beamforming ، وبعض المعدات الضرورية مثل MIMO ، والهوائيات الذكية وتعديل OFDM ، من أجل تركيز قدرة الإشارة واتجاهها في الفص الرئيسي للإشارة ، وتوجيهها في الاتجاه المرغوب ، وبالتالي تقليل الفصوص الجانبية للشعاع المبعوث من أجل تقليل التداخل بين الإشارات الطفيلية الأخرى ، وزيادة التدفق إلى أقصى حد مهما كانت المنطقة الجغرافية.

كلمات المفاتيح : تشكيل الشعاع؛ هوائي؛ OFDM .

Résumé :

Ce travail est basé sur la transmission de l'information en utilisant la technique beamforming et la modulation OFDM, et quelques équipement nécessaires telles que MIMO et les antennes intelligentes, afin de focaliser la puissance du signal transmis et la directivité dans le lobe principale, et le diriger dans une direction désirée, ainsi pour réduire les lobes secondaires dans le but de diminuer au maximum les interférences entre les autres signaux parasites, et maximiser le débit quel que soit la zone géographique.

Mots clés : Beamforming (formation de faisceaux) ; Antenne intelligentes ; OFDM ; MIMO

Abstract:

This work is based on the transmission of information using beamforming and OFDM modulation, and some necessary equipment such as MIMO and intelligent antennas, to focus signal power and directivity in the main lobe of the signal, and direct it in a desired direction, thus reducing lobes side effects in order to minimize interference between other parasitic signals, and the workflow is based on the transmission of information using the beamforming technique, and some necessary equipment such as MIMO, intelligent antennas and OFDM modulation, in order to focus the power of the signal and the directivity in the main lobe of the signal, and direct it in a desired direction, thus to reduce side lobes in order to minimize interference between other spurious signals, and maximize the rate regardless of the geographical area.

Keywords : Beamforming ; antenna ; OFDM

Listes des acronymes et abréviations

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
5G	La 5ème génération.
AF	Array factor
AVR	Average
B	La puissance du bruit.
BPSK	Bi Phase-shift keying.
C	Vitesse de la lumière.
c	La capacité.
D	La plus grande dimension de l'antenne.
d	La distance entre les antennes.
dB	Décibel.
det	Déterminant.
dP	La puissance rayonnée.
$ds \rightarrow$	La surface élémentaire.
$d\Omega$	Angle solide.
$E \rightarrow$	Le champ électrique.
e_c	Les pertes de conducteur.
e_d	Les pertes de diélectrique.
E_{eff}	Le champ électrique efficace.
e_r	Les pertes de réflexion.
EVM	Error vector magnitude.
f	La fréquence.
F_A	Facteur d'antenne.
$fn(\theta, \varphi)$	La fonction du rayonnement.
FFT	La transformée de Fourier.
G	Le gain.
I	L'intensité.
IFFT	La transformée de Fourier inverse.
k	Constate de Boltzmann.
MER	Modulation error ratio.
MIMO	Multiple input multiple output.
msps	Mega samples per second.
N	Nombre de sources.
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing.
RMS	Root mean square.
QAM	Quadrature amplitude modulation.
QPSK	Quad phase-shift keying.
R	La zone lointaine.
r	Rayon de la sphère.
R_1	La zone très proche.
R_2	La zone proche.

R_p	Résistance de perte.
R_r	Résistance de rayonnement.
RFID	Radio frequency identification.
S_r	La densité surfacique.
SNR	Le rapport signal bruit.
T_B	Température de bruit d'une antenne.
$\vec{u}$	Le vecteur élémentaire.
V	Le voltage.
X	La réactance.
Z	Impédance du vide.
γ	SNR.
Δf	Bande de fréquence donnée.
ϵ_0	La permittivité du vide.
η	Le rendement.
θ	Angle azimutal.
λ	Longueur d'onde.
μ_0	La perméabilité magnétique du vide.
φ	Angle d'élévation.
Ψ_K	Le déphasage entre les ondes.
ω	La pulsation.

Table des matières :

Introduction générale.....	1
1.1 Introduction	3
1.2 La 5 ^e génération.....	3
1.2.1 Les innovations de la 5 ^e génération mobile	3
1.3 MIMO : multiple input multiple output.....	4
1.3.1 Massive MIMO.....	4
1.3.2 Capacité du canal MIMO	4
1.4 Le Beamforming.....	5
1.4.1 Utilisations du beamforming	5
1.5 La constellation	5
1.6 La transmission de l'information.....	7
1.7 OFDM : orthogonal frequency division multiplexing	7
1.7.1 Utilisations de l'OFDM	8
1.7.2 Schéma synoptique de la modulation OFDM.....	8
1.8 Les antennes	9
1.8.1 Antenne émettrice.....	Erreur ! Signet non défini.
1.8.2 Antenne réceptrice.....	Erreur ! Signet non défini.
1.9 Type d'antenne	9
1.9.1 Antenne dipolaire	9
1.9.2 Boucle magnétique	9
1.9.3 Antenne cornet.....	9
1.9.4 Réseau de fente.....	10
1.9.5 Antenne à réflecteur parabolique.....	10
1.9.6 Antenne de type Cassegrain	10
1.9.7 Antenne plaquée	11
1.10 Différentes zones de rayonnement	11
1.11 Fonction caractéristique de rayonnement	11
1.12 La densité surfacique de puissance.....	12
1.13 Diagramme de rayonnement.....	13
1.14 L'angle solide	14
1.15 Intensité	15
1.16 Directivité.....	15

1.17	Impédance d'entrée.....	15
1.18	Rendement d'antenne.....	15
1.19	Gain de l'antenne.....	16
1.20	Facteur d'antenne	16
1.21	Polarisation de l'antenne	16
1.22	La puissance du bruit.....	17
1.23	Conclusion.....	17
Chapitre 2	Réseau d'antennes	19
2.1	Introduction	Erreur ! Signet non défini.
2.2	Présentation du concept de réseau d'antennes.....	19
2.3	Le facteur de réseau (noté AF)	20
2.4	Alimentation d'un réseau d'antennes	20
2.5	Type de réseaux.....	21
2.5.1	Le réseau linéaire.....	22
2.5.2	Le réseau circulaire.....	22
2.5.3	Le réseau planaire.....	22
2.5.4	Le réseau quelconque	22
2.6	Domaines d'applications de réseau d'antennes	23
2.7	Réduction des lobes secondaires	23
2.8	Antennes intelligentes.....	24
2.9	Rayonnement transversal et rayonnement longitudinal.....	24
2.10	Rayonnement d'un groupe de source	25
2.10.1	Cas particulier : N antennes colinéaires équidistantes.....	28
2.11	Conclusion.....	29
Chapitre 3	Simulation et résultats.....	31
3.2	Initialisation du système	32
3.3	La modulation OFDM.....	34
3.4	Sondage de canal.....	35
3.5	Transmission de données.....	37
3.6	Transmission du lobe orienté.....	38
3.7	Résultat de simulation du signal transmis	39
3.7.1	Géométrie du réseau d'antenne (en émission).....	39
3.7.2	Diagramme de rayonnement de réseau d'antenne (côté émetteur).....	40
3.8	Propagation et visualisation.....	41

3.9	La constellation de diagramme	44
3.10	Conclusion.....	46
	Conclusion générale	47

Liste des figures

Figure 1.1 : Nouveautés de la 5 ^e génération mobile.	3
Figure 1.2: Fonctionnement du MIMO.....	4
Figure 1.3: le principe de beamforming.....	5
Figure 1.4: Exemple d'utilisations du beamforming.	5
Figure 1.5: constellations des modulations QAM.....	7
Figure 1.6: Spectre des ondes électromagnétiques [8].....	7
Figure 1. 7 : Exemples d'utilisations de l'OFDM.....	8
Figure 1.8: schéma synoptique de la modulation OFDM.	9
Figure 1.9: Antenne dipolaire.	9
Figure 1.10: boucle magnétique.....	9
Figure 1.11: Antenne cornet.....	10
Figure 1.12: Réseau de fente.....	10
Figure 1.13: Antenne à réflecteur parabolique.....	10
Figure 1.14: Antenne de type Cassegrain.	11
Figure 1.15: Antenne plaquée.	11
Figure 1.16: Situation de l'antenne par rapport au point M d'observation.	12
Figure 1. 17: Diagramme de rayonnement d'un dipôle en trois dimensions	14
Figure 1. 18: Diagramme de rayonnement normalisé d'un dipôle en 2D en fonction de θ	14
Figure 1. 19: polarisation de l'antenne.....	16
Figure 2.1: Association de plusieurs éléments rayonnants ou réseau d'antennes.....	20
Figure 2.2: Alimentation d'un réseau d'antennes patch.	21
Figure 2.3: les géométries d'un réseau d'antenne.....	21
Figure 2.4: les différentes configurations géométriques d'un réseau linéaire.	22
Figure 2.5: un réseau quelconque.	23
Figure 2.6: la différence entre la technologie standard et les antennes intelligentes	24
Figure 2. 7: Diagramme de rayonnement de 4 sources isotropes distantes de $\lambda/2$	25
Figure 2. 8: Groupe de sources sur une surface quelconque.....	25
Figure 2.9: Le diagramme de rayonnement d'un réseau.....	27
Figure 2.10: réseau composé de N antennes colinéaires équidistantes.....	28
Figure 3.1 : l'organigramme de paramètres de système	32
Figure 3.2 : l'organigramme de la modulation OFDM.....	34

Figure 3. 3 : Le schéma synoptique du sondage de canal	35
Figure 3.4 : l'organigramme de sondage de canal.	36
Figure 3.5 : l'organigramme de la transmission de données.....	37
Figure 3.6 : l'organigramme de pilotage de lobe.	38
Figure 3.7 : La géométrie du réseau d'antenne (en émission).	39
Figure 3.8 : le diagramme de rayonnement de réseau d'antenne (coté émettrice) en 3D.	40
Figure 3.9 : Diagramme de rayonnement de réseau d'antenne en coordonnées polaire (2D).	40
Figure 3.10 : propagation du signal émis et visualisation de signal reçu.....	41
Figure 3.11 : La géométrie du réseau d'antenne (en réception).....	42
Figure 3.12 : le diagramme de rayonnement à la réception en 3D.	42
Figure 3.13 : le diagramme de rayonnement à la réception en coordonnées polaire.....	43
Figure 3.14 : le diagramme de rayonnement à la réception en 3D à la position [300, 300,300] m. ..	43
Figure 3.15 : le diagramme de rayonnement à la réception en coordonnées polaire [300, 300,300].	44
Figure 3.16 : diagramme de constellation avec modulation 64QAM.	44

Liste des tableaux

Tableau (1. 1): nombre de bits de quelques constellations	6
Tableau (3. 1) : les paramètres du système utilisé.....	33
Tableau (3. 2) : Les paramètres utilisés dans la modulation OFDM.	35

Introduction

Depuis l'existence des êtres humains sur terre, ils n'ont jamais arrêté de trouver des moyens plus développés pour communiquer entre eux (gestes, symboles, dessins...etc.)

A travers des siècles successifs, l'homme a fait des efforts afin de trouver des méthodes de communication plus avancées. Ces efforts ont donné l'innovation du télégraphe électrique en 1885 qui a été le premier outil de télécommunications presque instantanée entre deux points relativement distants.

Durant la seconde guerre mondiale, des composants et circuits électromagnétiques ont été inventés, ses derniers donnent naissance à la révolution de monde de télécommunication. Avec cette révolution, la communication mobile naissait avec l'apparition des antennes et des réseaux d'antennes.

Ces dernières années, l'évolution sans précédent des systèmes de télécommunication, les antennes multifaisceaux apparaissent pour réaliser le multiplexage spatial où des utilisateurs dans des faisceaux différents peuvent utiliser simultanément le même système de communication, ce qui augmente la capacité de ce système.

Ce mémoire contient trois chapitres. Le premier fait l'objet des généralités et quelques définitions de notions de bases, et des rappels théorique sur le beamforming, et aux antennes et ses types et quelques caractéristiques d'antennes telles que l'intensité, la directivité, le facteur de réseau et le gain...etc.

Une présentation de réseau d'antennes sera faite Dans chapitre deux. On présentera le concept de réseaux d'antennes et ses types, ainsi leurs domaines d'applications. On cita brièvement les antennes intelligentes, la réduction du lobe secondaire et le rayonnement de réseaux d'antennes.

Le troisième chapitre est réservé pour la simulation et la discussion des résultats obtenus.

Enfin une conclusion générale clôturera ce mémoire et donnant des perspectives utiles pour le développement de la communication mobile à haut débit.

Chapitre 1

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va définir et expliquer le rôle et les caractéristiques de quelques notions de base (les antennes, la modulation OFDM, le MIMO, beamforming...etc) nécessaire pour comprendre le principe de la nouvelle génération mobile 5G d'une part, et d'autre part pour faciliter notre simulation.

1.2 La 5^e génération

La nouvelle technologie mobile 5G, possédant des fonctionnalités avancées plus large que les générations précédentes. Elle a promis aux utilisateurs de l'Internet de résoudre certains problèmes liés au faible débit, aux interférences et la bande passante [1] [2].

1.2.1 Les innovations de la 5^e génération mobile

Les nouveautés apportées par cette nouvelle génération mobile sont résumées dans le diagramme représenté par la figure (1.1).

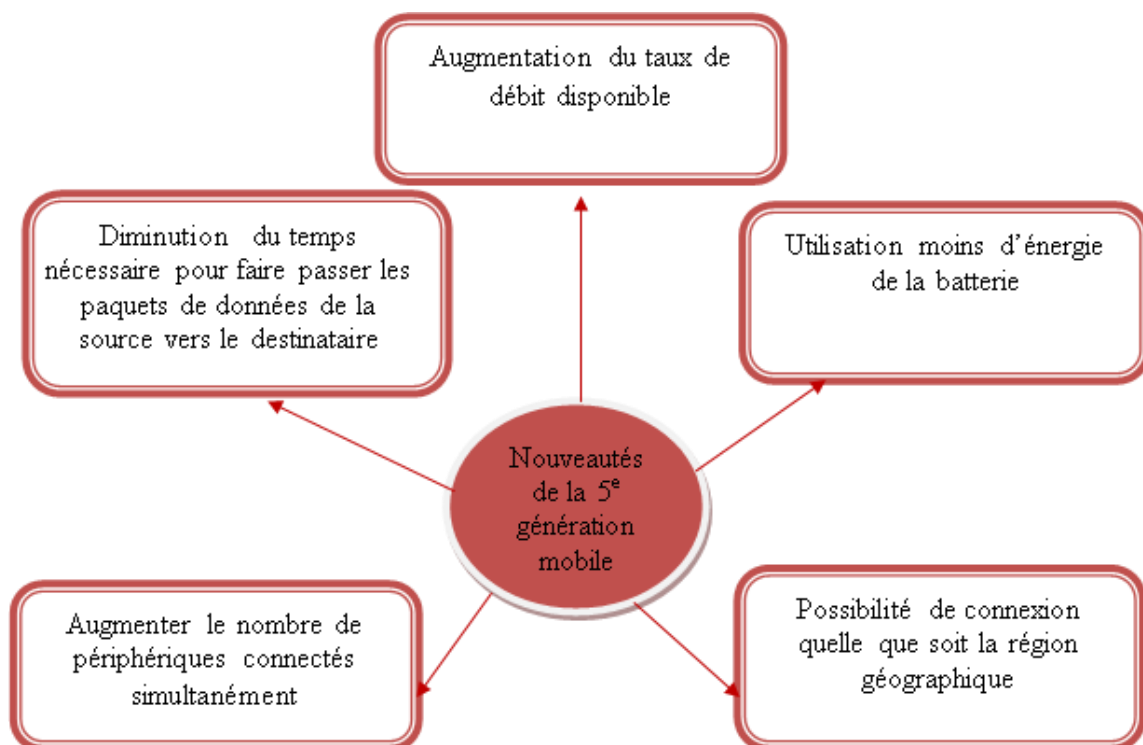


Figure 1.1 : Nouveautés de la 5^e génération mobile.

1.3 MIMO : multiple input multiple output

La technique MIMO signifie entrées multiples sorties multiples. La figure (1.2) montre que ce procédé de multiplexage utilise plusieurs antennes en émission (station de base) et en réception (périphérique). Elle est utilisée dans les réseaux mobiles afin d'augmenter le débit, la portée et la capacité du système, sans toucher à la bande passante et l'énergie du signal. Elle améliore ainsi la qualité du SNR, tout en réduisant la consommation de la batterie [3].

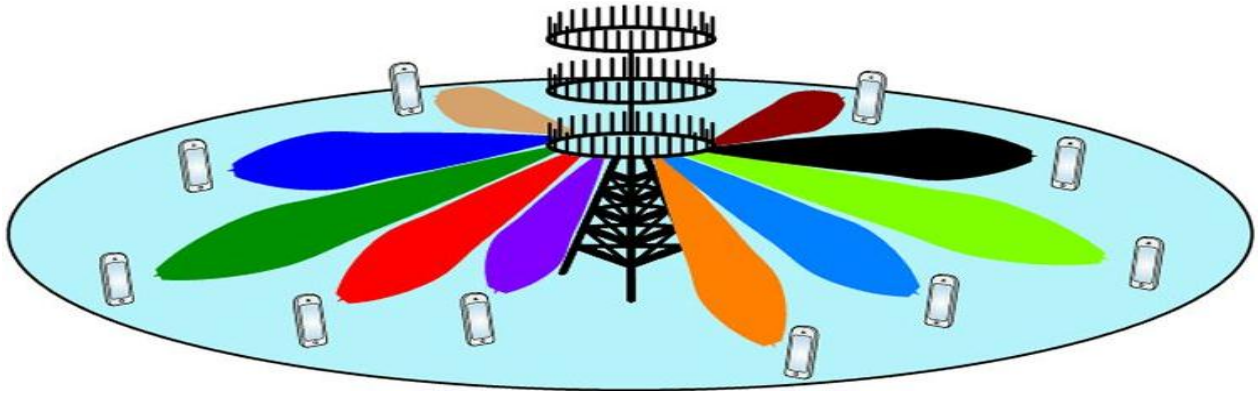


Figure 1.2: Fonctionnement du MIMO.

1.3.1 Massive MIMO

Elle équipe la station de base avec un nombre M élevé d'antenne pour servir le nombre d'utilisateur K à condition que : $M \gg K$ [3].

1.3.2 Capacité du canal MIMO

Soit un système MIMO avec :

- γ : SNR de l'antenne de réception.
- M : Antenne émettrice.
- N : Antenne réceptrice.
- Avec H : la matrice complexe du canal peut s'écrire [3] :

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M} \\ \vdots & h_{22} & \vdots \\ h_{N1} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Avec h_{ij} est le gain complexe du canal entre la $j^{\text{ème}}$ antenne émettrice et la $i^{\text{ème}}$ antenne réceptrice.

La capacité du système est citée dans l'équation (1.2) [3] :

$$C = \log_2 \left(\det \left[I_n + \frac{\gamma}{M} H H^h \right] \right) (\text{bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}) \quad (1.2)$$

1.4 Le Beamforming

Est une technique puissante pour améliorer les performances d'antennes, son but est de diriger le lobe principal de la puissance dans une direction précise, soit pour l'antenne émettrice ou réceptrice, et annuler de manière destructive les autres signaux non désirés [5] [8]. La figure (1.3) montre le principe de beamforming (où formation des faisceaux).

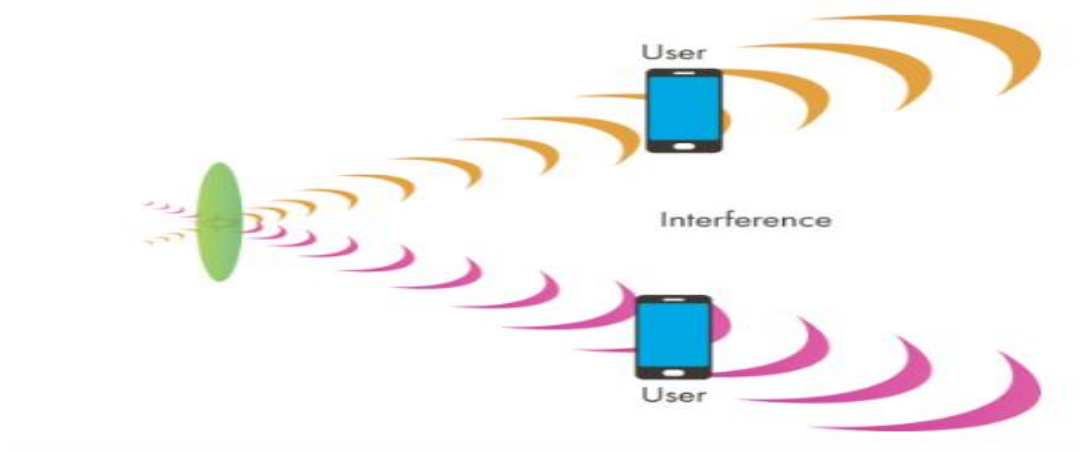


Figure 1.3: le principe de beamforming

1.4.1 Utilisations du beamforming

La figure (1.4) illustre quelques domaines d'utilisation du beamforming :

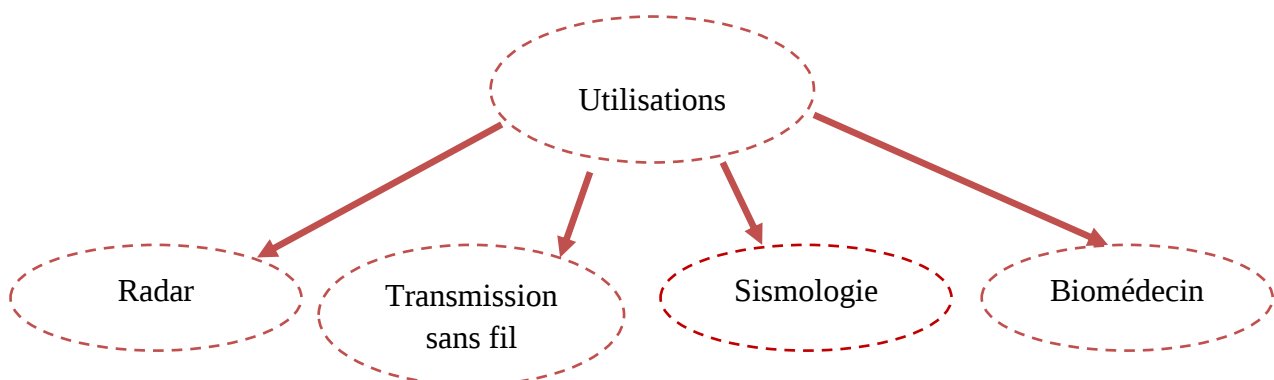


Figure 1.4: Exemple d'utilisations du beamforming.

1.5 La constellation

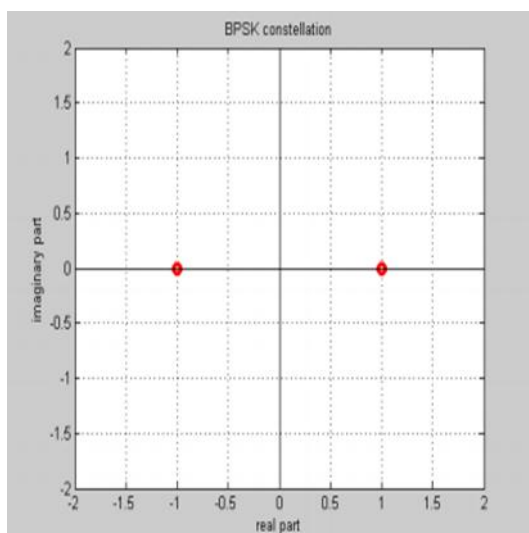
C'est la représentation du signal modulé avec une modulation numérique, le nombre de bits inclus dans chaque symbole désigne la taille de constellation [6].

Les constellations usuelles sont sous la forme de puissance de 2 et sont données dans le tableau (1.1) :

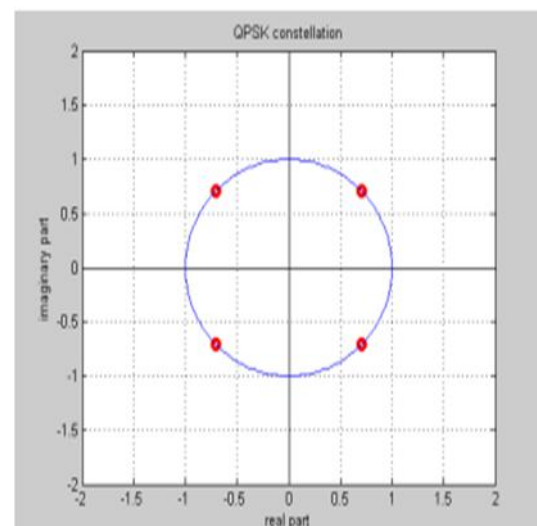
Constellation	Nombre de bits
BPSK	1
QPSK	2
16QAM	4
64QAM	6

Tableau (1.1) : nombre de bits de quelques constellations

La figure suivante (1.5) illustre les constellations de quelques modulations avec le programme MATLAB :



A : Constellation BPSK



B : Constellation QPSK

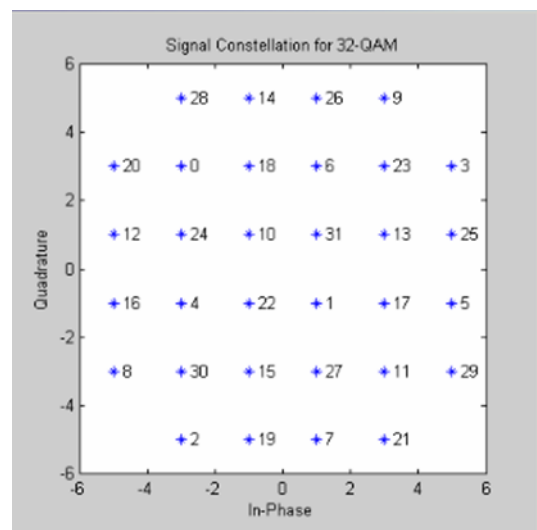
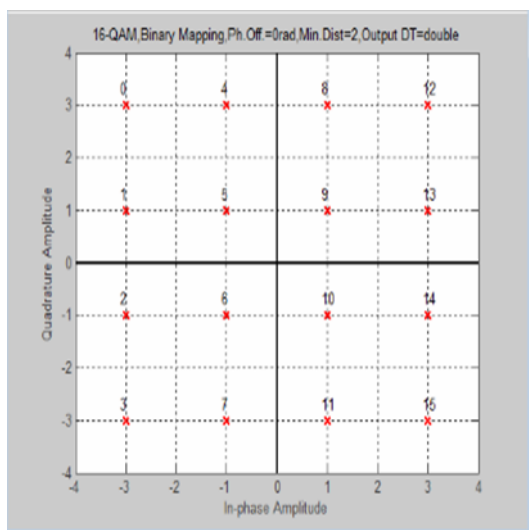


Figure 1.5: constellations des modulations QAM

1.6 La transmission de l'information

La transmission de l'information se fait avec une onde porteuse qui est sinusoïdale caractérisé par sa fréquence la modulation analogique ou numérique de cette porteuse par un signal de plus basse fréquence représente l'information à transmettre [8].

Les ondes porteuses trouvent sous différentes natures mais les plus fréquents sont l'onde acoustique et L'onde électromagnétique [8].

Cette dernière peut se propager dans ces milieux :

- Les conducteurs transmission filaire dans le téléphone filaire.
- La silice transmission par fibre optique dans la téléphonie fixe.
- L'air transmission hertzienne dans la téléphonie sans fil.

La figure (1.9) illustre le spectre des ondes électromagnétiques en fréquence et en longueur d'onde

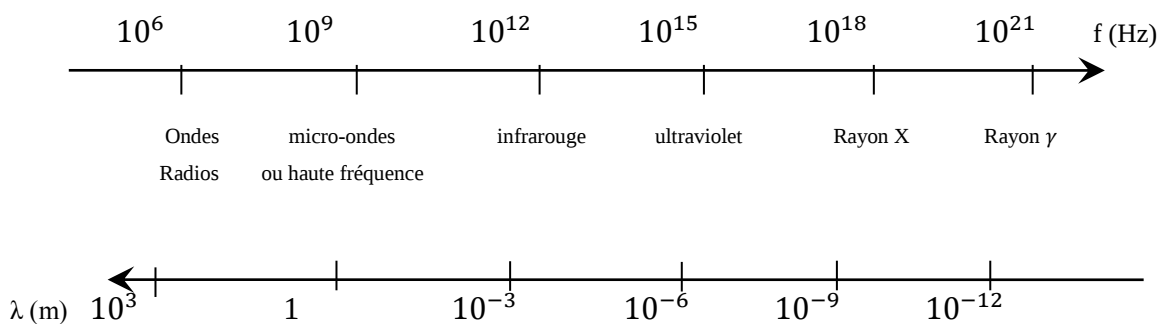


Figure 1.6: Spectre des ondes électromagnétiques [8].

1.7 OFDM : orthogonal frequency division multiplexing

Est une technique pour transmettre les données en parallèle. Elle utilise la modulation multi-porteuse dans lequel un bloc d'information est modulé par une transformée de Fourier. Elle introduit dans ces blocs un intervalle de garde, cela permet d'éliminer les interférences entre symboles de blocs successifs en présence de canaux à plusieurs trajets [6].

Elle transforme un canal multi-trajet large bande en un ensemble de sous-canaux mono-trajet très simple à égaliser, ses techniques lutte contre les canaux sélectifs en fréquence, à condition que l'intervalle de garde soit supérieur au temps d'arrivée du dernier trajet [6].

Les intervalles de garde utilisée sont :

- Le préfixe cyclique.
- Le bourrage de zéro.

1.7.1 Utilisations de l'OFDM

La technique OFDM a plusieurs utilisations, on va citer quelques utilisations dans la figure (1.10) :

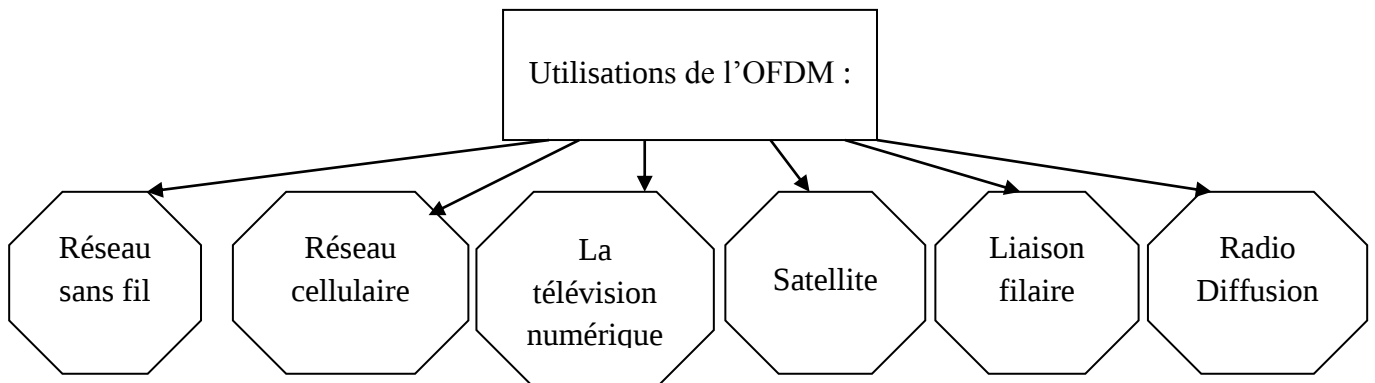


Figure 1. 7 : Exemples d'utilisations de l'OFDM.

1.7.2 Schéma synoptique de la modulation OFDM

La figure (1.11) ci-dessous représente le schéma synoptique de la modulation OFDM.

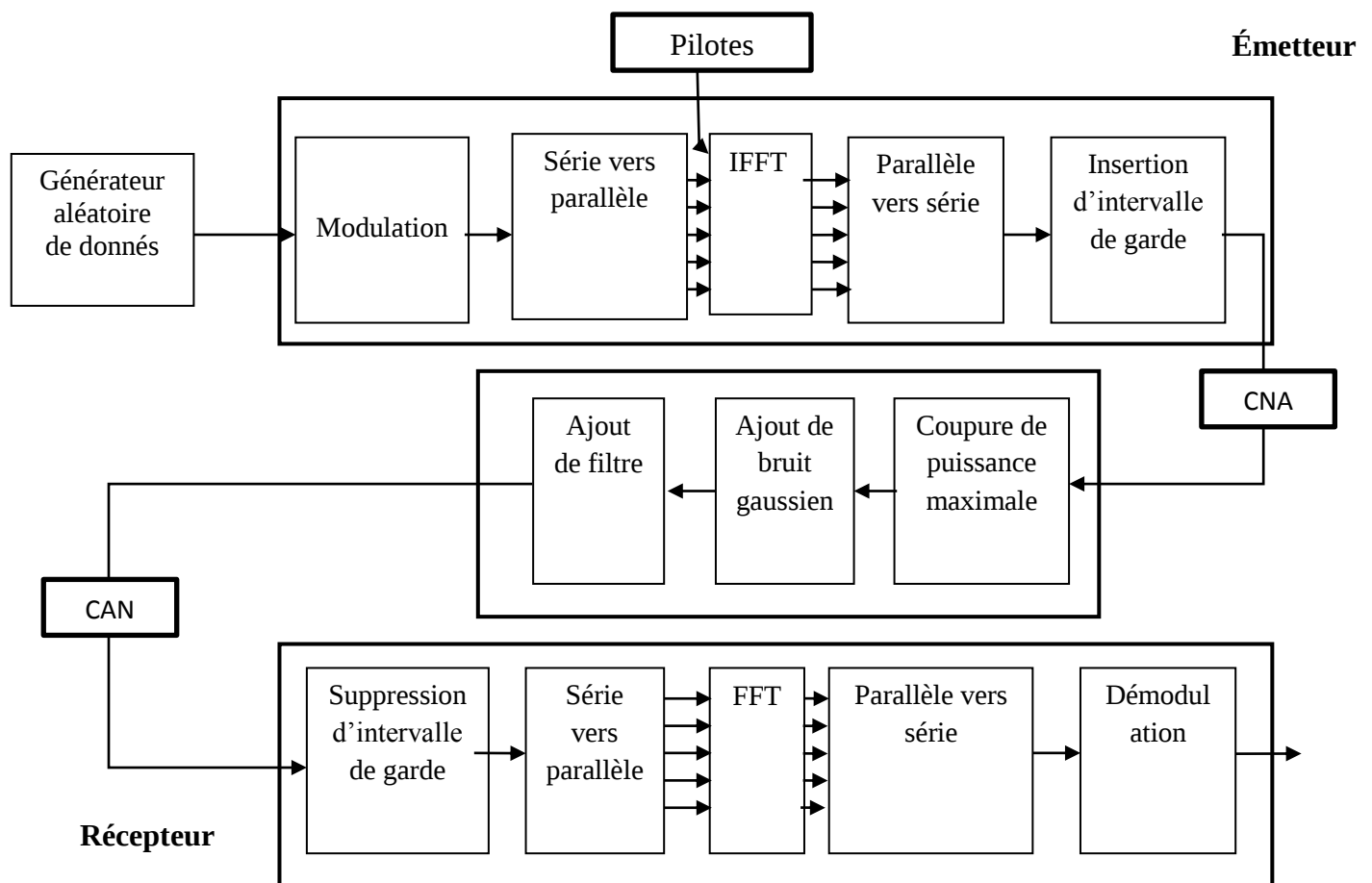


Figure 1.8: schéma synoptique de la modulation OFDM.

1.8 Les antennes

C'est un dispositif fondamental qui génère les ondes rayonnées dans le système de transmission d'information. Si l'antenne est émettrice, elle transforme la puissance électromagnétique en puissance rayonnée est fait la propagation de cette puissance en air. Sinon l'antenne est réceptrice et l'opération sera l'inverse. L'antenne émettrice peut prendre le rôle de l'antenne réceptrice donc c'est réciproque [8].

1.9 Type d'antenne

1.9.1 Antenne dipolaire

C'est deux fils alignés très court et relier chacun a des à 2 fils parallèles et très proches constituant une ligne bifilaire, elle est utilisée pour la réception radio et dans les Talkie-Walkie [8].

La figure (1.9) montre un schéma simple pour une antenne dipolaire.

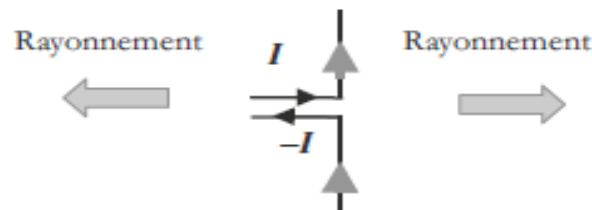


Figure 1.9: Antenne dipolaire.

1.9.2 Boucle magnétique

La figure (1.10) montre une boucle magnétique, c'est un fil conducteur qui permet le retour sur lui-même, la boucle est aussi branchée sur une ligne bifilaire relié au générateur. Elle est utilisée pour détection d'objets métalliques, dans la réception de grandes ondes radio et dans RFID (radio frequency identification) [8].

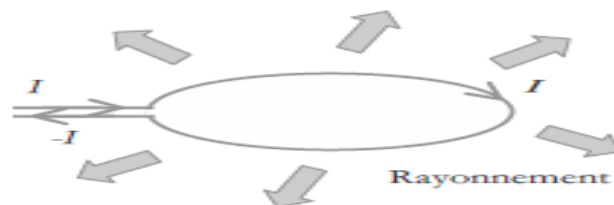


Figure 1.10: boucle magnétique.

1.9.3 Antenne cornet

Elle est utilisée dans les transmissions hautes fréquence grâce à sa qualité supérieure. On utilise cette antenne dans la propagation guidée, il fait transformer la puissance électromagnétique en puissance rayonnée. Elle est utilisée dans les radars et les satellites [8].

La figure (1.11) montre la direction du rayonnement d'une antenne cornet.

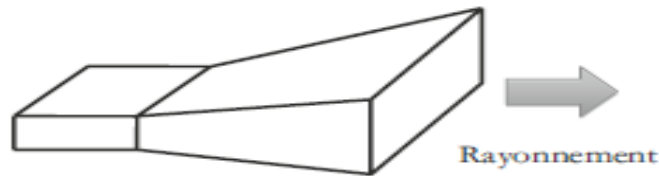


Figure 1.11: Antenne cornet.

1.9.4 Réseau de fente

À partir de dispositif d'onde guidé, on peut envisager un rayonnement dans une direction différente en usinant des fentes dans le guide. La figure (1.12) montre le rayonnement perpendiculaire au plan troué [8].

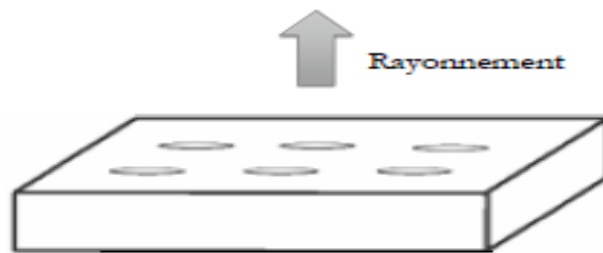


Figure 1.12: Réseau de fente.

1.9.5 Antenne à réflecteur parabolique

C'est un réflecteur circulaire qui a la forme de parabole, la source située au foyer de parabole envoie l'onde vers le réflecteur parabolique. Tous les rayons sont réfléchis parallèlement [4] [8].

Le schéma de cette antenne est donné dans la figure 1.13.

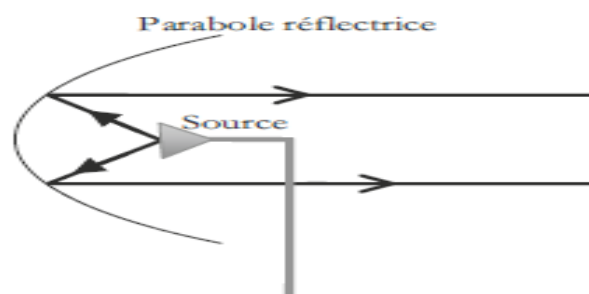


Figure 1.13: Antenne à réflecteur parabolique.

1.9.6 Antenne de type Cassegrain

Le nom de ce type d'antenne provient d'un télescope du même nom, qui utilise le même principe. Les rayons se réfléchissent sur un premier réflecteur en forme de hyperbolique, puis sur le réflecteur principal de forme parabolique comme il est montré dans la figure (1.14)[8].

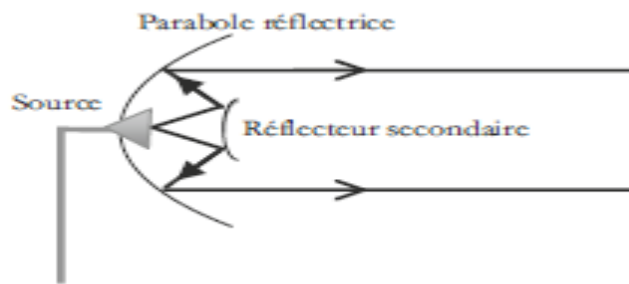


Figure 1.14: Antenne de type Cassegrain.

1.9.7 Antenne plaquée

Ou bien antenne patch, est une ligne micro ruban de forme particulière, elle se compose d'un plan de masse et d'un substrat diélectrique, dont la surface porte un ou plusieurs éléments métalliques [8]. La figure (1.15) représente un exemple de schéma d'une antenne patch.

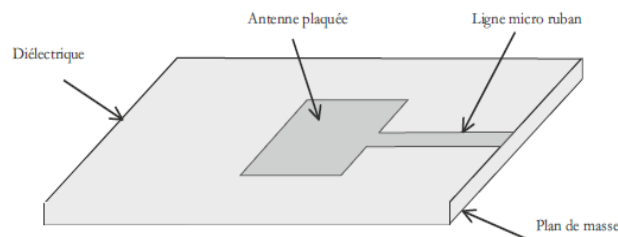


Figure 1.15: Antenne plaquée.

1.10 Différentes zones de rayonnement

- La zone très proche réactive où la zone de Rayleigh est montrée dans l'équation (1.3) [8] [10] :

$$R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (1.3)$$

- La zone proche rayonnée où la zone de Fresnel est montrée ci-dessous [8] [10] :

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1.4)$$

- La zone lointaine Fraunhofer [8] [10] :

$$R > R_2$$

1.11 Fonction caractéristique de rayonnement

La figure (1.16) montre la position d'une antenne par rapport au point de vue M. Les champs électriques et magnétiques sont contenus dans un plan perpendiculaire au vecteur de propagation.

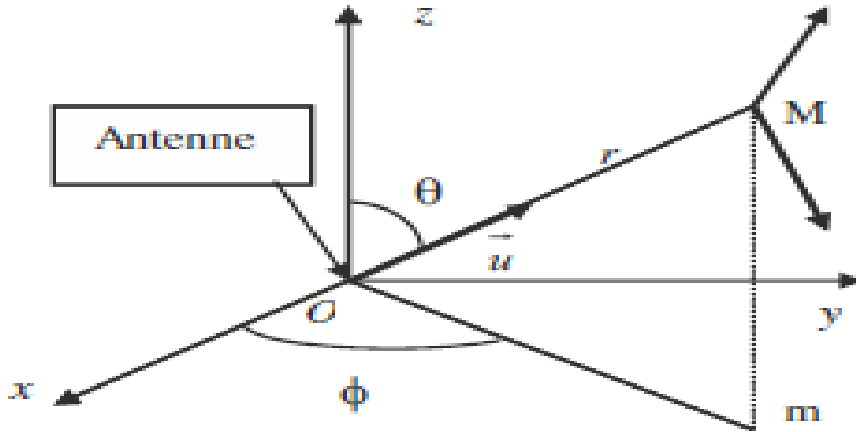


Figure 1.16: Situation de l'antenne par rapport au point M d'observation.

Avec :

- O : l'antenne.
- M : Le rayon observé dans Le champ lointain.

La formule complexe du champ électrique est donnée par [8] :

$$\vec{E} = E_{\theta} \vec{U}_{\theta} + E_{\phi} \vec{U}_{\phi} \quad (1.5)$$

La formule du champ magnétique est donnée par [8] :

$$\vec{H} = \frac{1}{Z} (\vec{u} \wedge \vec{E}) \quad (1.6)$$

Le champ électrique et le champ magnétique sont perpendiculaires entre eux.

Cette équation (1.7) donne la formule de l'impédance du vide [8] :

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega \quad (1.7)$$

1.12 La densité surfacique de puissance

C'est la grandeur fondamentale sur laquelle repose l'étude des rayonnements électromagnétiques de l'antenne. L'équation de la densité surfacique de puissance est montrée dans l'équation (1.8) [8] :

$$S_r = \frac{1}{2Z} (|E_{\theta}|^2 + |E_{\phi}|^2)$$

Les composants de champ électrique sont donnés ci-dessous [8] :

$$E_{\theta} = \frac{e^{-jkr}}{r} f_1(\theta, \varphi) \quad (1.9)$$

$$E_{\varphi} = \frac{e^{-jkr}}{r} f_2(\theta, \varphi) \quad (1.10)$$

La densité surfacique devient [8] :

$$S_r = \frac{1}{2Z} (|f_1(\theta, \varphi)|^2 + |f_2(\theta, \varphi)|^2) \quad (1.11)$$

La fonction caractéristique de rayonnement normalisé est [8] :

$$f_n(\theta, \varphi) = \frac{f(\theta, \varphi)}{f_{max}(\theta, \varphi)} \quad (1.12)$$

La fonction caractéristique de rayonnement en fonction de la densité surfacique [8] :

$$f_n(\theta, \varphi) = \frac{S_r(\theta, \varphi)}{S_{max}(\theta, \varphi)} \quad (1.13)$$

1.13 Diagramme de rayonnement

C'est la représentation graphique de la fonction caractéristique. L'axe de rayonnement est la direction maximum de rayonnement.

On a l'habitude de faire la représentation en deux plans perpendiculaires :

- Contenant l'axe d'antenne et le champ électrique.
- Contenant l'axe d'antenne et le champ magnétique.

La représentation en trois dimensions (figure 1.17) montre toutes les directions dans l'espace, la représentation peut-être en coordonnées rectangulaires et en coordonnées polaires [8].

Le diagramme contient :

- Le lobe principal.
- Le lobe secondaire.
- Les lobes latéraux.

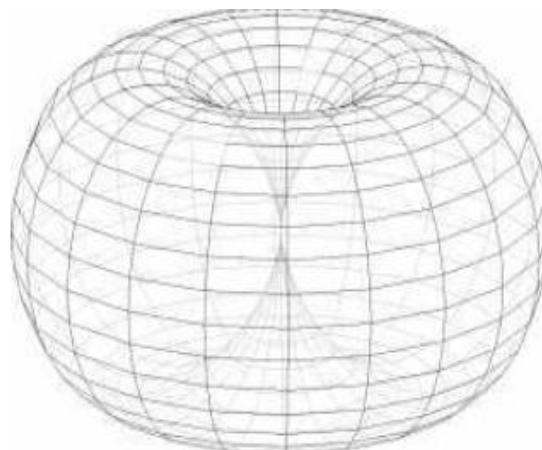


Figure 1.17: Diagramme de rayonnement d'un dipôle en trois dimensions

La figure (1.18) représente le diagramme de rayonnement normalisé en 2D.

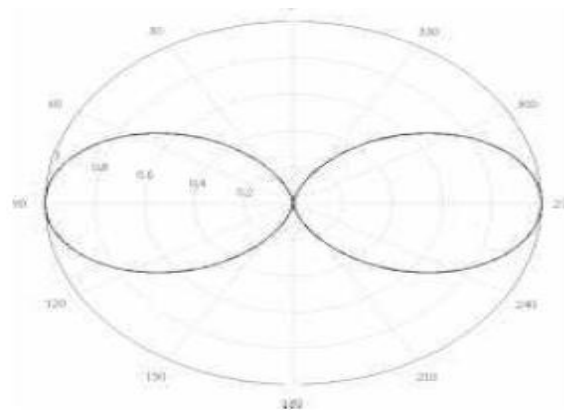


Figure 1.18: Diagramme de rayonnement normalisé d'un dipôle en 2D en fonction de θ

1.14 Caractéristiques d'une antenne

a- L'angle solide

C'est l'écart angulaire qui est situé entre les deux directions de chaque côté de l'axe, où la puissance est la moitié, elle donne la valeur moyenne dans lequel antenne émet [8].

$$d\Omega = \frac{\vec{u} \cdot \vec{ds}}{r^2} \quad (\text{stéradian } Sr) \quad (1.14)$$

Si l'angle solide est petit, alors l'antenne sera plus directive et inversement.

b- Intensité

Intensité est définie par la puissance rayonnée par unité d'angle solide, son expression est [8] :

$$dP = I(\theta, \varphi) d\Omega \quad (1.15)$$

c- Directivité

Et le rapport de la densité surfacique de puissance dans une direction donnée et d'une antenne isotrope émettant la même puissance totale. Son expression est [8] :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{S_r(\theta, \varphi)}{\frac{1}{4\pi} \iint S_r(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (1.16)$$

d- Impédance d'entrée

L'impédance complexe de l'antenne est [9] :

$$Z(\omega) = R(\omega) + jX(\omega) \quad (1.17)$$

L'équation (1.18) donne la formule de la réactance :

$$X = L\omega - \frac{1}{C\omega} \quad (\text{réactance}) \quad (1.18)$$

Et la formule de la résistance totale est :

$$R = R_r + R_p \quad (\text{résistance de rayonnement et résistance de perte})$$

e- Rendement d'antenne

L'expression du rendement d'antenne est donnée par [9] :

$$\eta = e_0 = e_r e_c e_d = e_r e_{cd} \quad (1.19)$$

Avec

$$e_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (1.20)$$

f- Gain de l'antenne

Le gain de l'antenne est la directivité de cette dernière multipliée par son rendement, donc [8] :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \cdot D(\theta, \varphi) \quad (1.21)$$

Le gain en décibel est [8] :

$$G(dB) = 10 \log_{10}(G) \quad (1.22)$$

g- Facteur d'antenne

Est le rapport entre champ électrique efficace rayonné et la tension mesurée juste derrière l'antenne [9].

$$F_A = \frac{E_{eff}}{V} \quad (1.23)$$

h- Polarisation de l'antenne

Il existe plusieurs polarisations de l'antenne comme elle montre la figure 1.19, on cite :

- La polarisation Rectiligne.
- La polarisation elliptique.
- La polarisation circulaire.

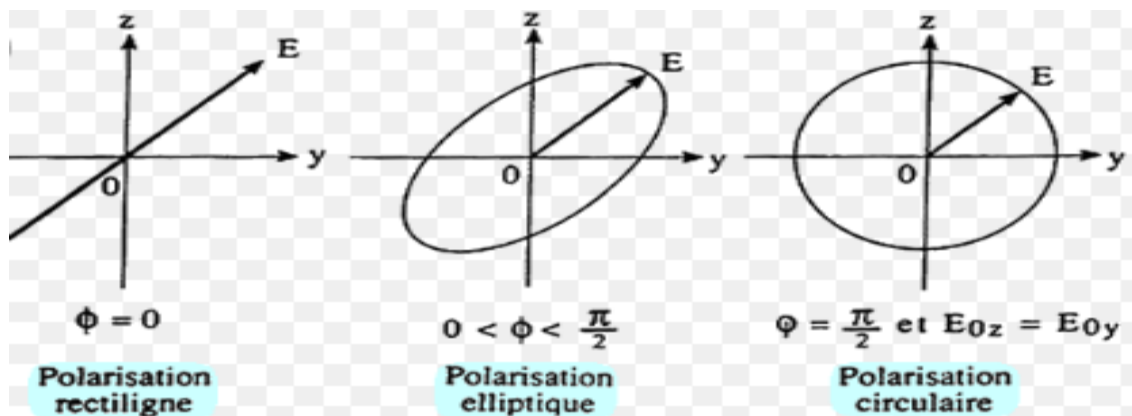


Figure 1.19: polarisation de l'antenne.

i- La puissance du bruit

La puissance de bruit capté par l'antenne est donnée par l'équation (1.24) [8] :

$$B = k.T_B.\Delta f \quad (1.24)$$

1.15 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de l'explication des techniques beamforming, le MIMO, l'OFDM et les différents types d'antennes, ainsi que leurs caractéristiques telle que l'intensité, la directivité, le gain, le rendement et le facteur d'antennes. Le chapitre suivant sera consacré au réseau d'antennes.

Chapitre 2

Chapitre 2 Réseau d'antennes

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, le principe de réseau d'antennes est examiné, son but est d'augmenter le rayonnement global par la combinaison judicieuse de plusieurs éléments rayonnants. Il permet de produire des diagrammes de rayonnement complexe et modifiable électriquement, on parle alors de 'beamforming ' (formation de faisceaux).

Le diagramme de rayonnement de réseaux d'antennes est plus étroit puisque sa directivité augmente avec sa surface.

2.2 Présentation du concept de réseau d'antennes

Les antennes élémentaires ont un diagramme de rayonnement relativement large ce qui réduit la directivité, mais les communications à longue distance requièrent des antennes à forte directivité.

Alors on fait la combinaison de rayonnement de plusieurs éléments rayonnant afin d'augmenter le rayonnement de l'antenne dans une direction précise.

En d'autres termes, il crée une interférence constructive entre les ondes électromagnétiques à partir de plusieurs sources, cette combinaison dépend de la disposition et de la séparation entre les éléments rayonnant et aussi des propriétés en amplitude et en phase de l'excitation.

Les réseaux d'antennes comprennent des éléments rayonnants et les structures qui permettent de modifier l'excitation de chaque élément rayonnant. Ses réseaux utilisent tous types d'éléments : patch, fente, plaquettes, antenne filaire...etc. à condition que leurs caractéristiques propres ne soient pas modifiées.

Le gain et l'angle d'ouverture du réseau d'antenne seront modifiés et sa bande passante est un peu plus large que celles d'antenne élémentaire, donc ce réseau est plus puissant et plus directif que l'antenne élémentaire.

La difficulté de modélisation d'un réseau est due à sa taille qui peut être importante lorsque le nombre d'éléments est élevé.

Habituellement, des éléments de réseau sont identiques pour que la conception et la fabrication soient simples et pratiques [9] [11] [12].

La figure (2.1) illustre l'association de plusieurs éléments rayonnants.

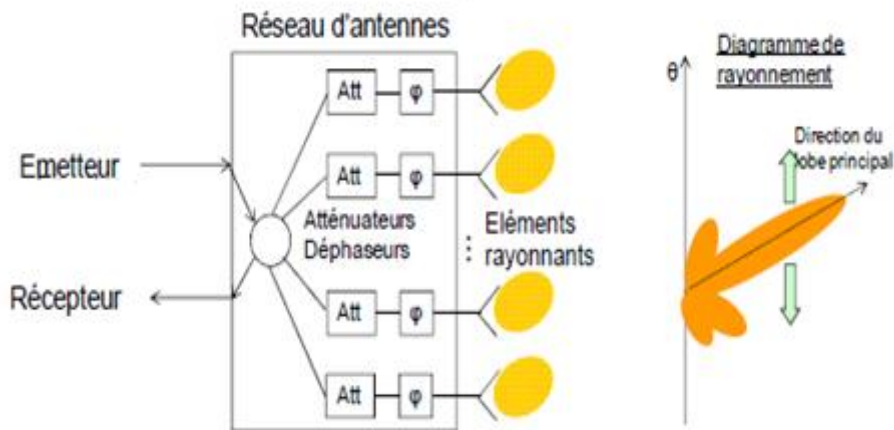


Figure 2.1

Figure 2.1: Association de plusieurs éléments rayonnants ou réseau d'antennes.

2.3 Le facteur de réseau (noté AF)

C'est l'espacement entre les sources ainsi que la phase et l'amplitude de l'excitation, Il traduit l'effet de la mise en réseau de plusieurs antennes sur le diagramme de rayonnement total.

Le diagramme de rayonnement d'un réseau est le produit du facteur de réseau par le diagramme de rayonnement d'une antenne élément isolé. Sa forme peut se simplifier par le choix du plan et de la configuration géométrique du réseau [12].

2.4 Alimentation d'un réseau d'antennes

On ne peut pas citer toutes les combinaisons possibles de l'alimentation de réseaux car les types de réseaux sont très variés. Les éléments seront regroupés par sous réseaux si le réseau est très complexe et contient un nombre élevé d'éléments.

On va citer un exemple de l'alimentation d'un réseau d'antenne patch, le principe de la répartition d'énergie se fait par des lignes micro rubans. Ses types d'alimentation de réseaux sont [12] :

- Alimentation série : les éléments rayonnants sont excités en série à travers une ligne de transmission. Entre chaque deux éléments il y a un déphaseur qui permet d'imposer la loi de phase appropriée.
- Alimentation parallèle : l'alimentation a une entrée et plusieurs sorties égales aux nombres des éléments rayonnants.

La figure (2.2) montre les alimentations possibles d'une antenne patch.

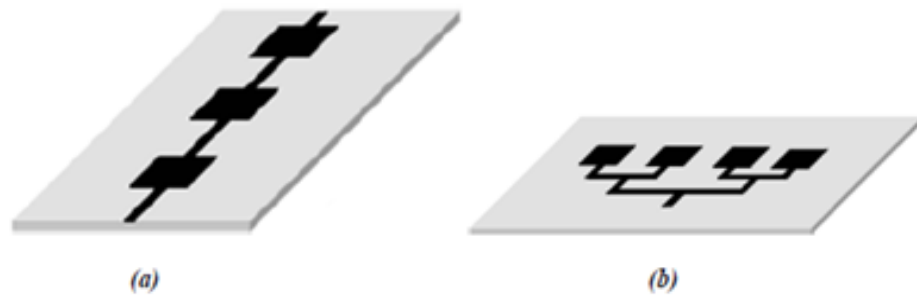


Figure 2.2: Alimentation d'un réseau d'antennes patch.

(a)-série (b)-parallèle

2.5 Type de réseaux

Il existe plusieurs types de réseaux, on peut citer :

- Le réseau linéaire.
- Le réseau circulaire.
- Le réseau planaire.
- Le réseau volumique.
- Le réseau quelconque...etc.

La figure (2.3) suivante montre quelques géométries d'un réseau d'antenne.

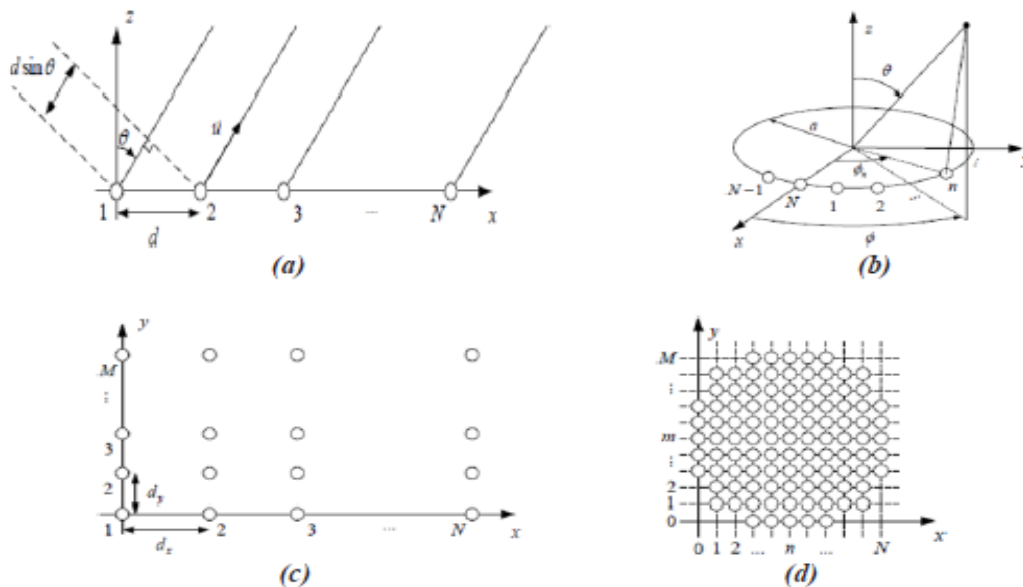


Figure 2.3: les géométries d'un réseau d'antenne

(a)-linéaire (b)-circulaire (c)-planaire (d)-volumique.

2.5.1 Le réseau linéaire

Ce sont des sources placées sur une ligne droite, espacé régulièrement par une distance d et alimentée par des courants dont les amplitudes sont égales et phase nul au linéament décalé [9].

- **La configuration du réseau linéaire :**

La configuration du réseau linéaire de réseau peut prendre 3 configurations possibles qui sont illustrées dans la figure (2.4) :

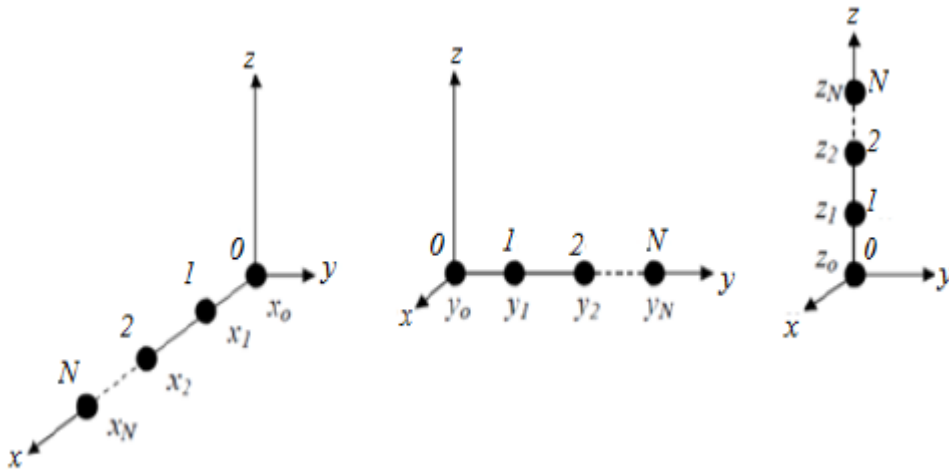


Figure 2.4: les différentes configurations géométriques d'un réseau linéaire.

2.5.2 Le réseau circulaire

Un réseau circulaire est un réseau où les éléments rayonnants sont répartis sur le périmètre d'un cercle et d'espacements égaux. Le plan de réseau qui se limite est le plan horizontal, il est caractérisé par les coordonnées polaires [12].

2.5.3 Le réseau planaire

Un réseau planaire contient plusieurs éléments rayonnants identiques arrangés sur une grille carrée de dimensions précise. Les éléments sont espacés horizontalement et verticalement.

Le diagramme de rayonnement du réseau planaire dans les plans principaux est identique à celui d'un réseau linéaire avec quelque modification [12].

2.5.4 Le réseau quelconque

Il contient N sources identiques et indépendantes placées sur une surface quelconque. On

Suppose que les couplages entre ces différentes sources sont nuls (condition valable si les distances entre antennes sont supérieures à λ) [11].

La figure (2.5) montre 5 N sources indépendantes placées sur une surface qui donne un réseau quelconque.

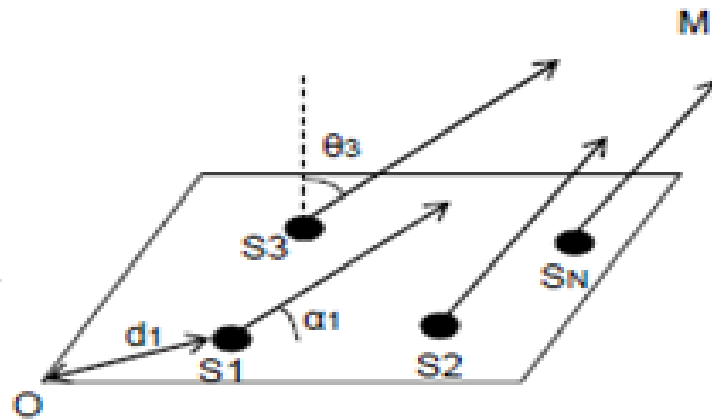


Figure 2.5: un réseau quelconque.

2.6 Domaines d'applications de réseau d'antennes

Le réseau d'antennes a des utilités variantes, on peut citer :

- Télécommunication : -Téléphonie mobile.
- Antennes sur stations de bases
- Satellites : assurer une couverture terrestre spécifique, télévision directe.
- Réseaux à faisceaux commutés à couverture reconfigurable.
- Systèmes de radiolocalisation par GPS, Galileo...
- Aéronautique : Communication, navigation, altimètres, systèmes d'atterrissages.
- Radars : balayage électronique.
- Domaine militaire : réjection de brouilleurs.

2.7 Réduction des lobes secondaires

La mise en réseau d'antennes génère un lobe principal à fort gain, dont sa direction peut être modifiable par la phase des excitations de chaque antenne. Mais cela, crée aussi des lobes secondaires à fort gain qui sont aussi générés dans des directions différentes.

On désire réduire les lobes secondaires au maximum, car ils diminuent le gain du lobe principal et engendrent des rayonnements parasites dans des directions où l'antenne ne devrait pas rayonner.

Pour supprimer les lobes secondaires, il faut rapprocher le plus possible les antennes et les espacer de plus d'une longueur d'onde. Plus celles-ci sont rapprochées, plus les couplages en champ proche entre antennes sont importants. Or, ceux-ci vont modifier les caractéristiques de chaque antenne. Il y a donc un compromis sur la distance de séparation à trouver entre annulation des lobes secondaires et réduction des couplages entre antennes [11].

2.8 Antennes intelligentes

Les antennes intelligentes se basent sur le **beamforming** adaptatif. Elles sont reliées à un processeur de traitement de signal qui peut adapter le patron de rayonnement de l'antenne en privilégiant une direction désirée et en atténuant les directions d'interférences. Elles ne sont pas encore largement adoptées à grand échelle dans les réseaux cellulaires et les standards de télécommunication. Mais leur utilisation sera très répandue grâce à ses avantages.

On peut citer [11] :

- Réutilisation des porteuses (plusieurs utilisateurs peuvent donc être desservis par la même bande de fréquences).
- Réduction de l'interférence entre canaux.
- La consommation d'énergie est réduite car elle est concentrée vers l'utilisateur.
- Une pollution électromagnétique réduite.

La figure (2.6) montre le fonctionnement des antennes intelligentes.

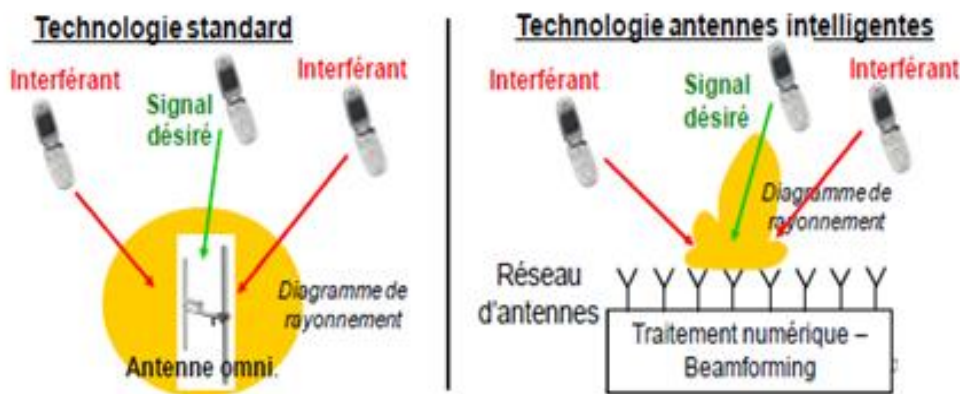


Figure 2.6: la différence entre la technologie standard et les antennes intelligentes

2.9 Rayonnement transversal et rayonnement longitudinal

Selon la disposition des antennes l'une par rapport à l'autre et le déphasage entre le courant circulant dans les antennes, on distingue [9] :

- Le réseau linéaire à rayonnement transversal dont le déphasage électrique entre les courants alimentant ses éléments est nul. C'est-à-dire tous ses éléments sont alimentés en phase. Le maximum de rayonnement pour ce type de réseau est toujours dans la direction perpendiculaire à l'alignement.
- Le réseau linéaire à rayonnement longitudinal qui se caractérise par une opposition de phase dans l'alimentation de chaque deux éléments successifs du réseau.

La figure (2.7) montre le rayonnement transversal et longitudinal champ de 4 sources isotropes distantes de $\lambda/2$.

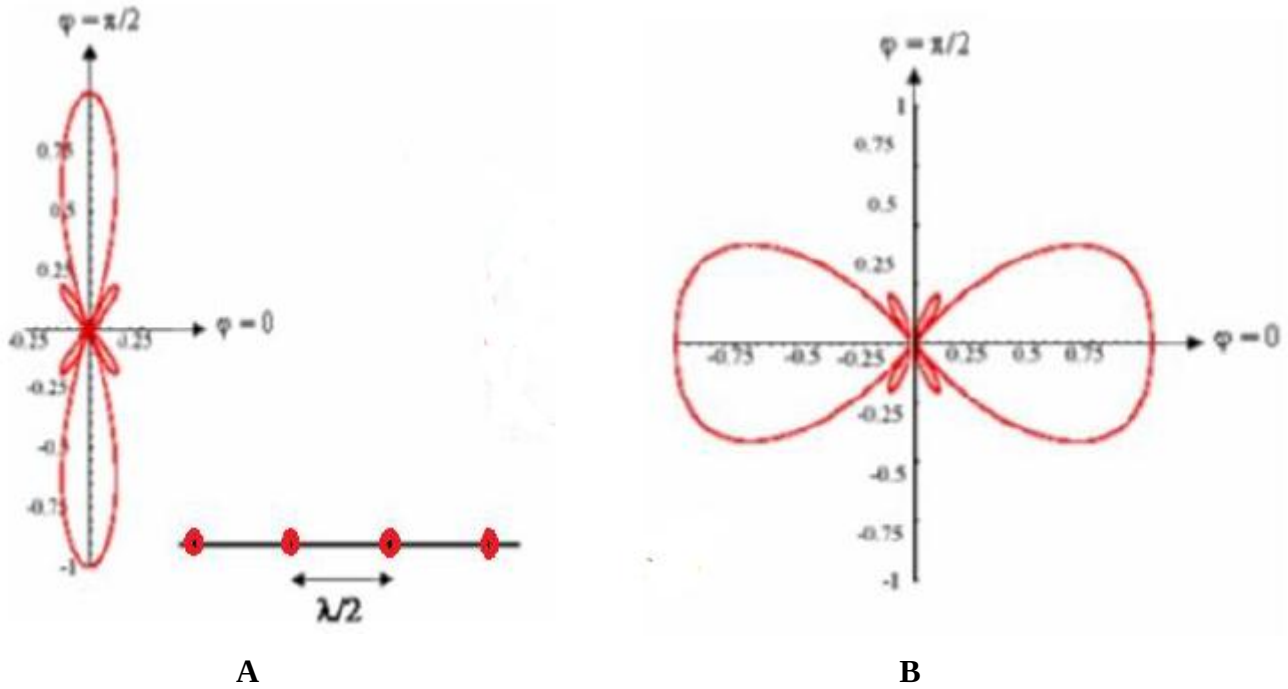


Figure 2. 7: Diagramme de rayonnement de 4 sources isotropes distantes de $\lambda/2$.

A- Rayonnement transversal. B- Rayonnement longitudinal.

2.10 Rayonnement d'un groupe de source

On suppose N sources identiques placées sur une surface quelconque est supposé indépendante (la distance qui les sépare est supérieure à la longueur d'onde λ)

La figure (2.8) montre un groupe de sources sur une surface quelconque.

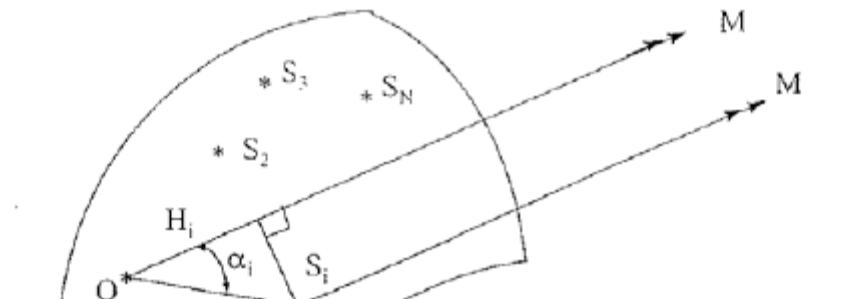


Figure 2. 8: Groupe de sources sur une surface quelconque.

Les notations suivantes sont employées [11] :

- S_k : Centre de la source.
- $A_k = a_i = A_i e^{i\varphi_k}$: Alimentation complexe qui peut être un courant ou tension.
- $f_k(\theta_k)$: Fonction caractéristique de rayonnement.
- $|S_k M| = r_k = r$: Distance entre une source d'ordre i et M point d'observation.

$$r_k = r - d_k \cos(\theta_k) \quad (2.1)$$

- d_k : Distance entre l'origine du repère O et une source S_k

Le champ rayonnant au point éloigné par une source S_k peut-être déterminer par l'expression suivante en supposant K est un facteur constant [11] :

$$E_k(M) = K f_k(\theta_k) \left(\frac{A_k}{r} \right) e^{i\varphi_k} e^{-i\beta r_k} \quad (2.2)$$

Avec

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.3)$$

$$E_k(M) = K f_k(\theta_k) \left(\frac{A_k}{r} \right) e^{i\varphi_k} e^{-i\beta(r - d_k \cos(\theta_k))} \quad (2.4)$$

$$E_k(M) = K f_k(\theta_k) \left(\frac{A_k}{r} \right) e^{-i\beta r} e^{i(\varphi_k + \beta d_k \cos(\theta_k))} \quad (2.5)$$

$$E_k(M) = K f_k(\theta_k) \left(\frac{A_k}{r} \right) e^{-i\beta r} e^{i(\Psi_k)} \quad (2.6)$$

- Ψ_k : Est le déphasage entres les ondes issues de chaque antenne, il dépend de la phase de S_k et la distance entre antennes.

Le champ rayonné total au point M est la somme de toutes les sources, donc [11] :

$$E_{tot}(M) = \sum_{i=1}^N E_k(M) = \frac{K}{r} e^{-i\beta r} \sum_{i=1}^N A_k f_k(\theta_k) e^{i(\Psi_k)} \quad (2.7)$$

a- Le diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement du réseau est la somme liée à l'excitation (facteur du réseau) et au diagramme de rayonnement de chaque antenne. Son expression est donnée par [11] :

$$D(\theta_k) = \sum_{i=1}^N A_k f_k(\theta_k) e^{i(\Psi_k)} \quad (2.8)$$

Le cas d'une surface plane : $\theta_k = \theta$ donc $f_k(\theta_k) = f(\theta)$ et que toutes les sources sont identiques, l'expression devient :

$$D(\theta) = f(\theta) \sum_{i=1}^N A_k e^{i(\Psi_k)} \quad (2.9)$$

La figure (2.9) illustre le diagramme de rayonnement d'un élément rayonnant, facteur de réseau et le diagramme du rayonnement du réseau.

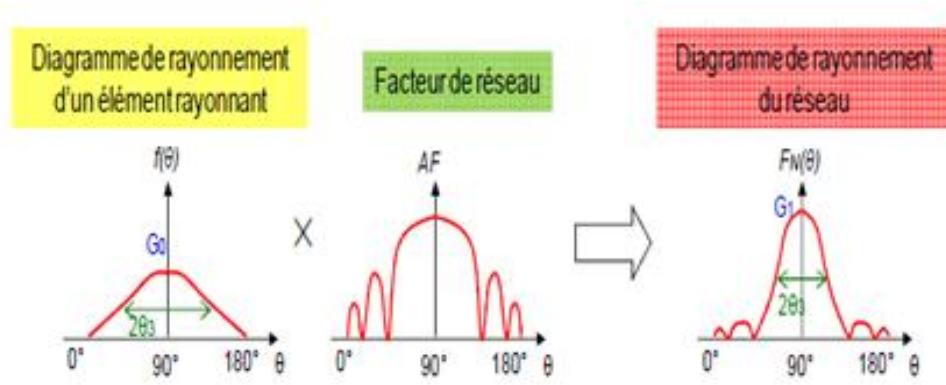


Figure 2.9: Le diagramme de rayonnement d'un réseau

Dans le cas d'un réseau bidimensionnel caractérisé par un facteur de réseau $f_x(\theta, \varphi)$ et $f_y(\theta, \varphi)$

Le facteur global est donné par [11] :

$$f(\theta, \varphi) = f_x(\theta, \varphi) f_y(\theta, \varphi) \quad (2.10)$$

La distribution d'amplitude et de phase su sources sont telles que [11] :

$$a_{mn} = A_{xm} e^{i\varphi_{xm}} A_{yn} e^{i\varphi_{yn}} \quad (2.11)$$

Le diagramme de rayonnement de l'antenne est donné par [11] :

$$D(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) f_x(\theta, \varphi) f_y(\theta, \varphi) \quad (2.12)$$

Avec :

- $f(\theta, \varphi)$: fonction caractéristique de rayonnement de la source d'élément.

$$f_x(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^{Nx} A_{xm} e^{i\Psi_{xm}} \quad (2.13)$$

$$f_y(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^{Ny} A_{yn} e^{i\Psi_{yn}} \quad (2.14)$$

Et

$$\Psi_{xm} = Kx_m \sin \theta \cos \varphi + \varphi_{xm} \quad (2.15)$$

$$\Psi_{yn} = Ky_n \sin \theta \cos \varphi + \varphi_{yn} \quad (2.16)$$

2.10.1 Cas particulier : N antennes colinéaires équidistantes

Supposons N sources isotropes, colinéaire et régulièrement espacé par une distance de l'excitation des antennes présente une amplitude constante et phase avec un gradient constant comme montre la figure (2.10) ci-dessous.

- La phase de S_1 est = 0.
- La phase de S_2 est = φ .
- La phase de S_3 est = 2φ .

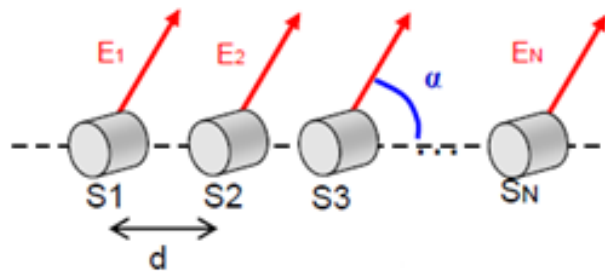


Figure 2.10: réseau composé de N antennes colinéaires équidistantes.

L'expression du facteur du réseau est [9] :

$$AF(\alpha) = f(\theta) \sum_{i=0}^{N-1} A_k e^{i(\Psi_k)} \quad (2.17)$$

Avec :

- $A_k = A$

$$\Psi_k = \varphi_k + \beta d_k \cos \alpha \quad (2.18)$$

$$\varphi_k = k\varphi \quad (2.19)$$

$$d_k = k \cdot d \quad (2.20)$$

Donc l'expression devient [9] :

$$AF(\alpha) = A \sum_{i=0}^{N-1} e^{i(k\varphi + \beta \cdot k \cdot d \cdot \cos \alpha)} \quad (2.21)$$

- $AF(\alpha) = A \sum_{i=0}^{N-1} e^{i(\Psi_k)}$ Qui est une suite géométrique.

En appliquant la loi de la somme de la suite géométrique, on obtient [9] :

$$|AF|_{max} = A_0 \frac{\sin(N\Psi/2)}{\sin(\Psi/2)} \quad (2.22)$$

2.11 Conclusion

Le contenu de ce chapitre a été dédié au réseau d'antennes et leurs différents types, leur principe de fonctionnements et leur alimentation. Quelques équations importantes telle que l'équation de rayonnement ont été citées.

Ces informations vont nous aider à l'implémentation de notre simulation dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Chapitre 3 Simulation et résultats

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on montre comment un réseau d'antennes à commande de phase est utilisé dans la communication MIMO-OFDM, en employant la formation de faisceau (beamforming).

Cette simulation modélise les éléments rayonnants composant un émetteur, et les composants du récepteur. Elle permet de valider les performances du système en termes de taux d'erreur sur les bits, et de la constellation pour différents emplacements spacieux. Elle illustre un système mono-utilisateur asymétrique MIMO-OFDM, où le nombre maximum d'éléments d'antenne d'émission peut atteindre 1024 et de réception 32, avec un maximum de 16 flux de données indépendants.

Pour la simplicité, un seul lien point à point (station de base communique avec un utilisateur mobile) est modélisé.

3.2 Initialisation du système

Les étapes de l'initialisation de système sont illustrées dans l'organigramme (3.1) suivant :

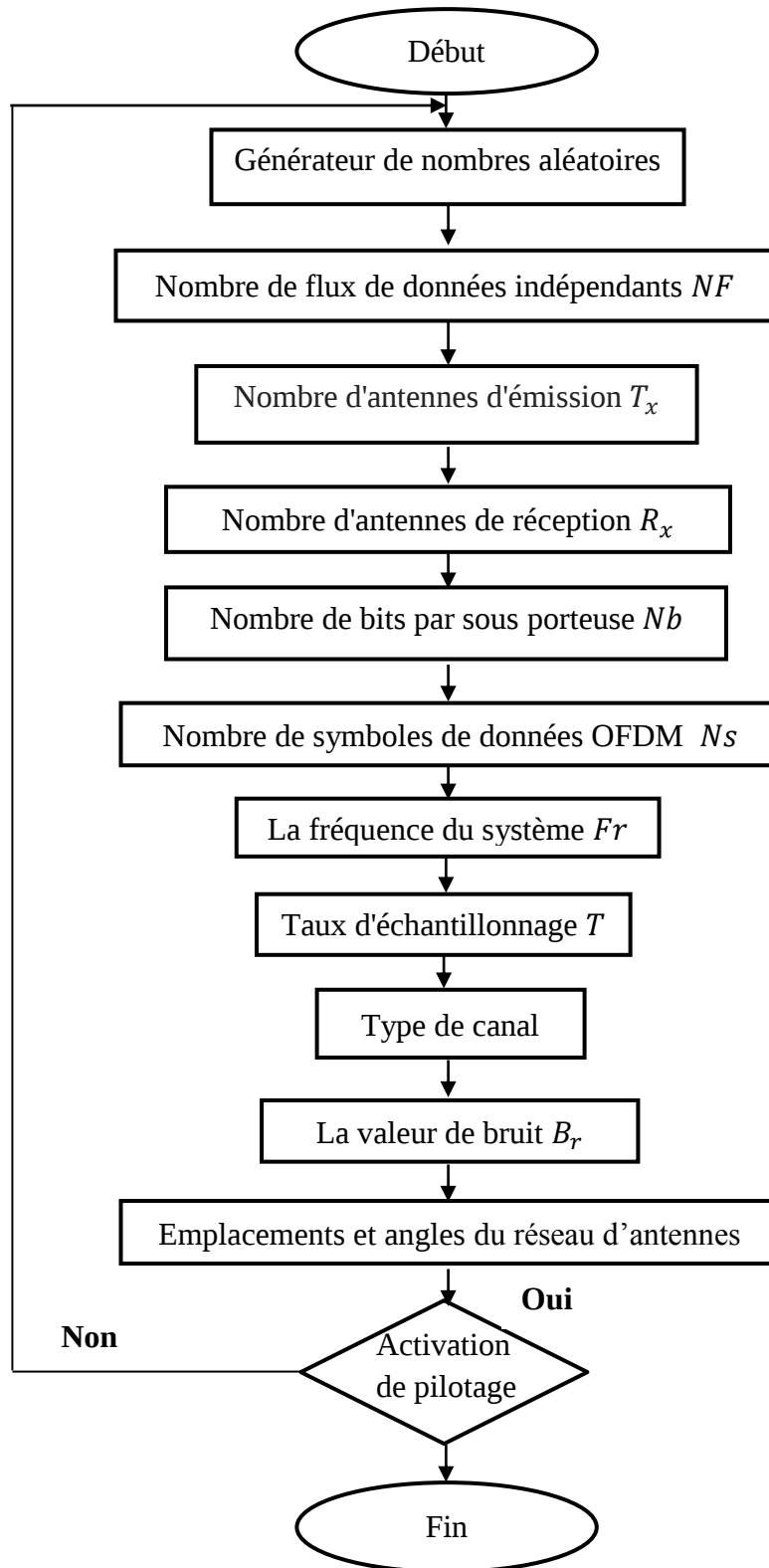


Figure 3.1 : l'organigramme de paramètres de système

Les paramètres du système sont donnés dans le tableau (3.1) :

Paramètres		Spécifications
Nombre de flux de données indépendants (NF)		16
Nombre d'antennes d'émission (T_x)		32
Nombre d'antennes de réception (R_x)		16
Nombre de bits par sous porteuse (Nb)		6
Nombre de symboles de données OFDM (Ns)		10
La fréquence de système (Fr)		6 GHz
Taux d'échantillonnage des canaux (T)		100 msp
Type de canal		WINNER
Valeur de bruit (B_r)		5 dB
Emplacements et angles du réseau d'antennes	Position du rayon à transmettre	[0,0,0] / [300,300,300] m
	La portée du mobile	300 m
	L'angle du mobile	[20, 0] °
	Angle de pilotage	[30, -20] °

Tableau (3. 1) : les paramètres du système utilisé

3.3 La modulation OFDM

Les étapes de la modulation OFDM utilisée pour le système sont spécifiées dans l'organigramme (3.2) suivant :

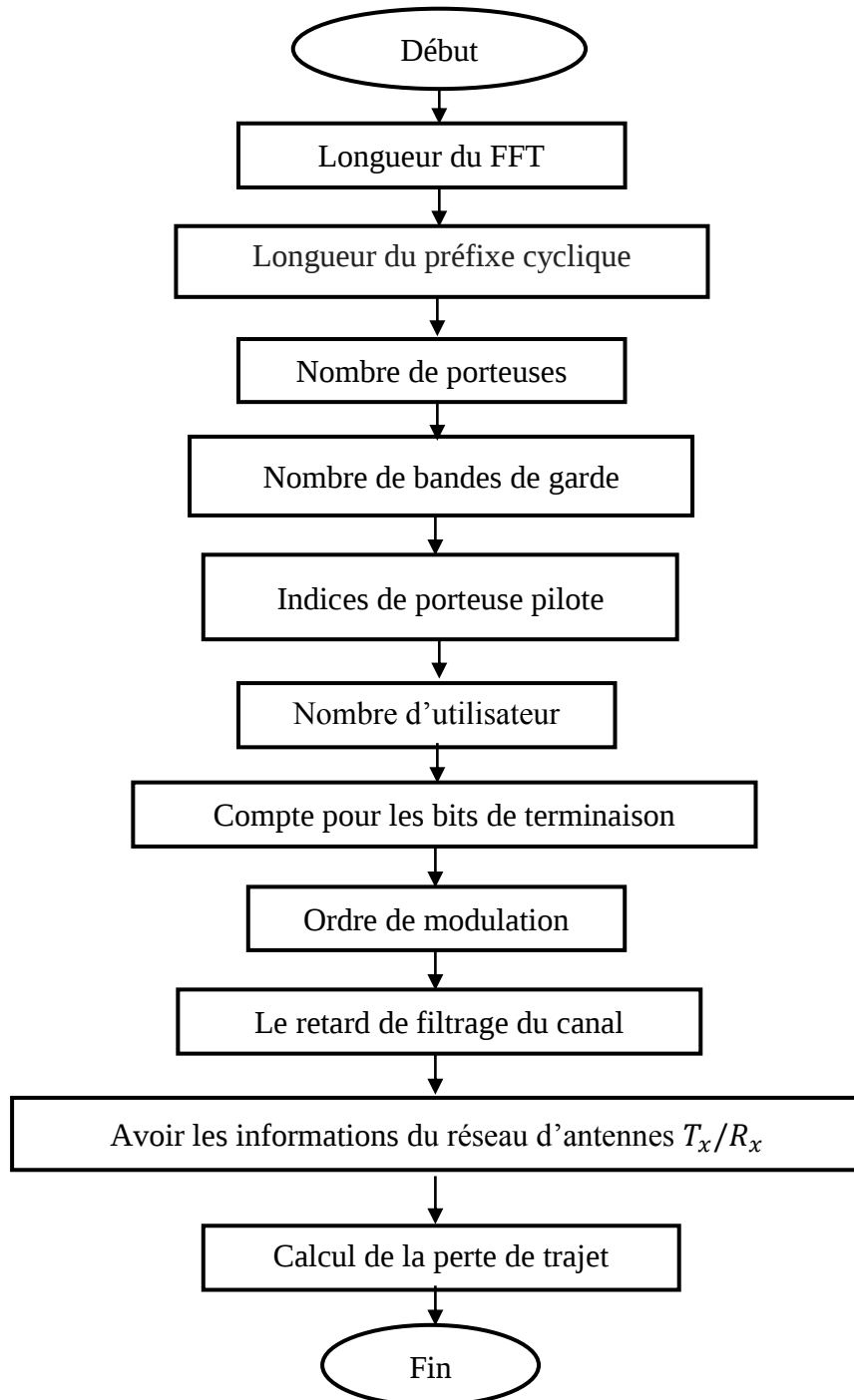


Figure 3.2 : l'organigramme de la modulation OFDM.

Les paramètres de la modulation OFDM sont donnés dans le tableau (3.2)

Paramètres	Spécifications
Longueur du FFT	256
Longueur du préfixe cyclique	64
Nombre de porteuses	234
Nombre de bandes de garde	[7 6]
Indices de porteuse pilote	[26 54 90 118 140 168 204 232]

Tableau (3. 2) : Les paramètres utilisés dans la modulation OFDM.

3.4 Sondage de canal

Le principe du sondage de canal est donné par le schéma synoptique de la figure (3.3) suivante :



Figure 3. 3 : Le schéma synoptique du sondage de canal

Pour un système à multiplexage spatial, la disponibilité des informations de canal au niveau de l'émetteur permet d'appliquer un pré-codage dans le but de maximiser l'énergie du signal dans la direction du canal d'intérêt.

Dans l'hypothèse d'un canal variant lentement, ceci est facilité en sondant le canal en premier. Dans le cas d'une transmission de référence, le récepteur évalue le canal et renvoie ces informations à l'émetteur.

Pour le système choisi, un signal de préambule est envoyé sur tous les éléments d'émission et traité par le récepteur, qui comptabilise le canal. Les éléments récepteurs effectuent une pré-amplification, une démodulation OFDM, une estimation de canal dans le domaine fréquentiel et un calcul des poids de retour basés sur la diagonalisation de canal en utilisant une décomposition en valeurs singulières (SVD) par sous-porteuse de données.

L'organigramme (3.4) de sondage du canal est mentionné ci-dessous :

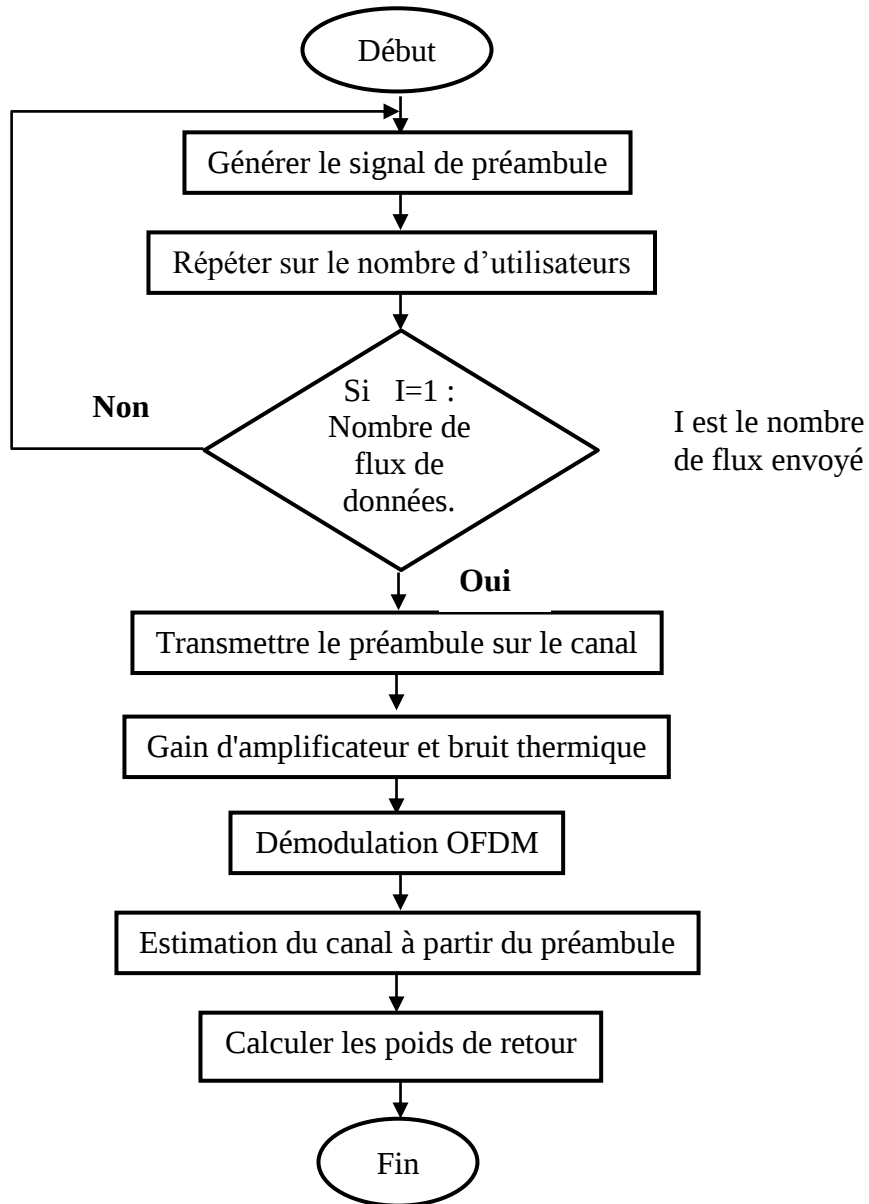


Figure 3.4 : l'organigramme de sondage de canal.

3.5 Transmission de données

La configuration de la transmission de données de système est dans l'organigramme (3.5) suivant :

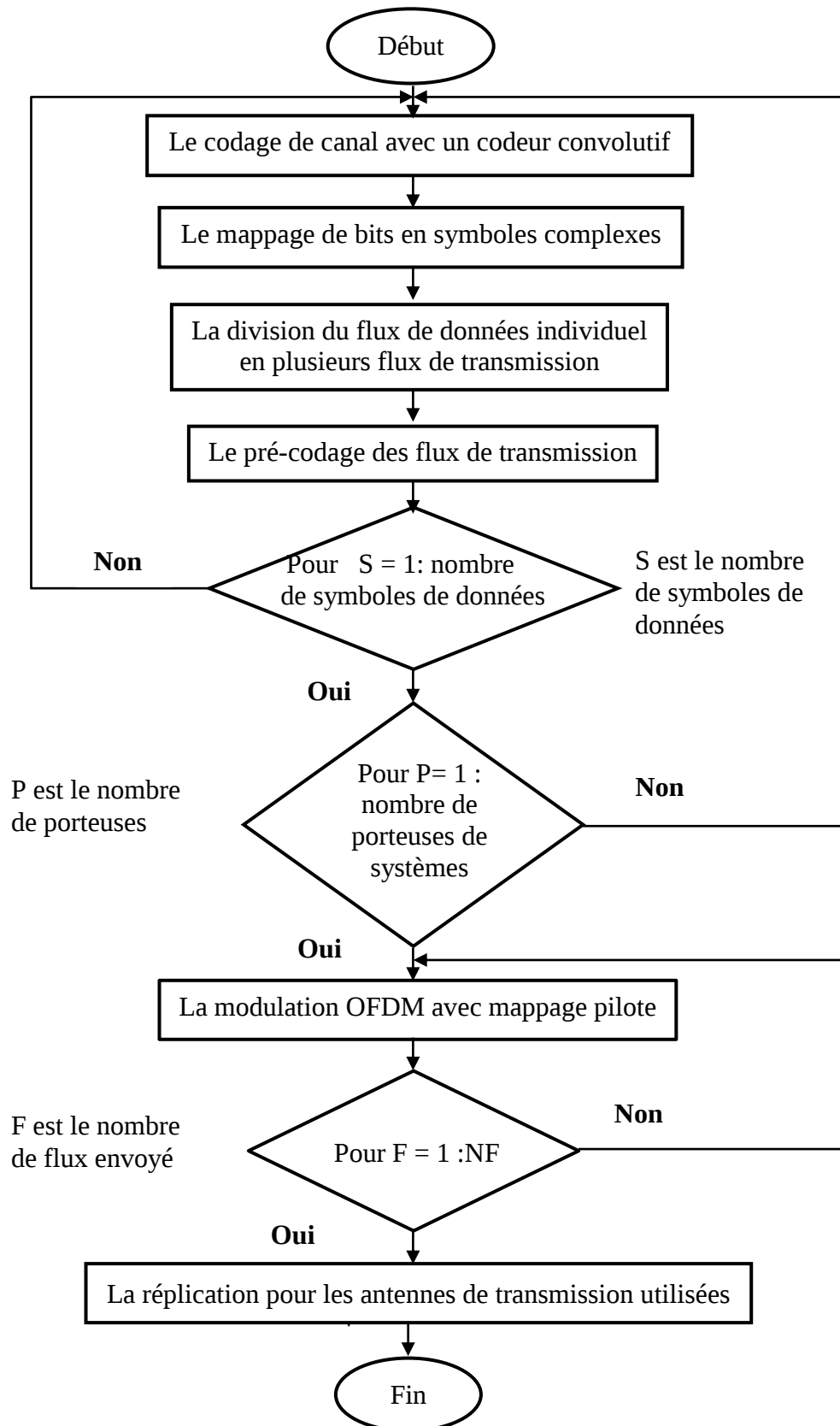


Figure 3.5 : l'organigramme de la transmission de données.

3.6 Transmission du lobe orienté

Pour ce système, le signal transmis depuis la station de base est dirigé vers la direction du mobile, de manière à focaliser l'énergie rayonnée dans la direction souhaitée. Ceci est réalisé en appliquant un déphasage à chaque élément d'antenne pour diriger la transmission.

On utilise un réseau linéaire ou rectangulaire au niveau de l'émetteur, en fonction du nombre de flux de données et du nombre d'antennes de transmission. La technique de transmission du lobe orienté est mentionnée dans l'organigramme ci-dessous :

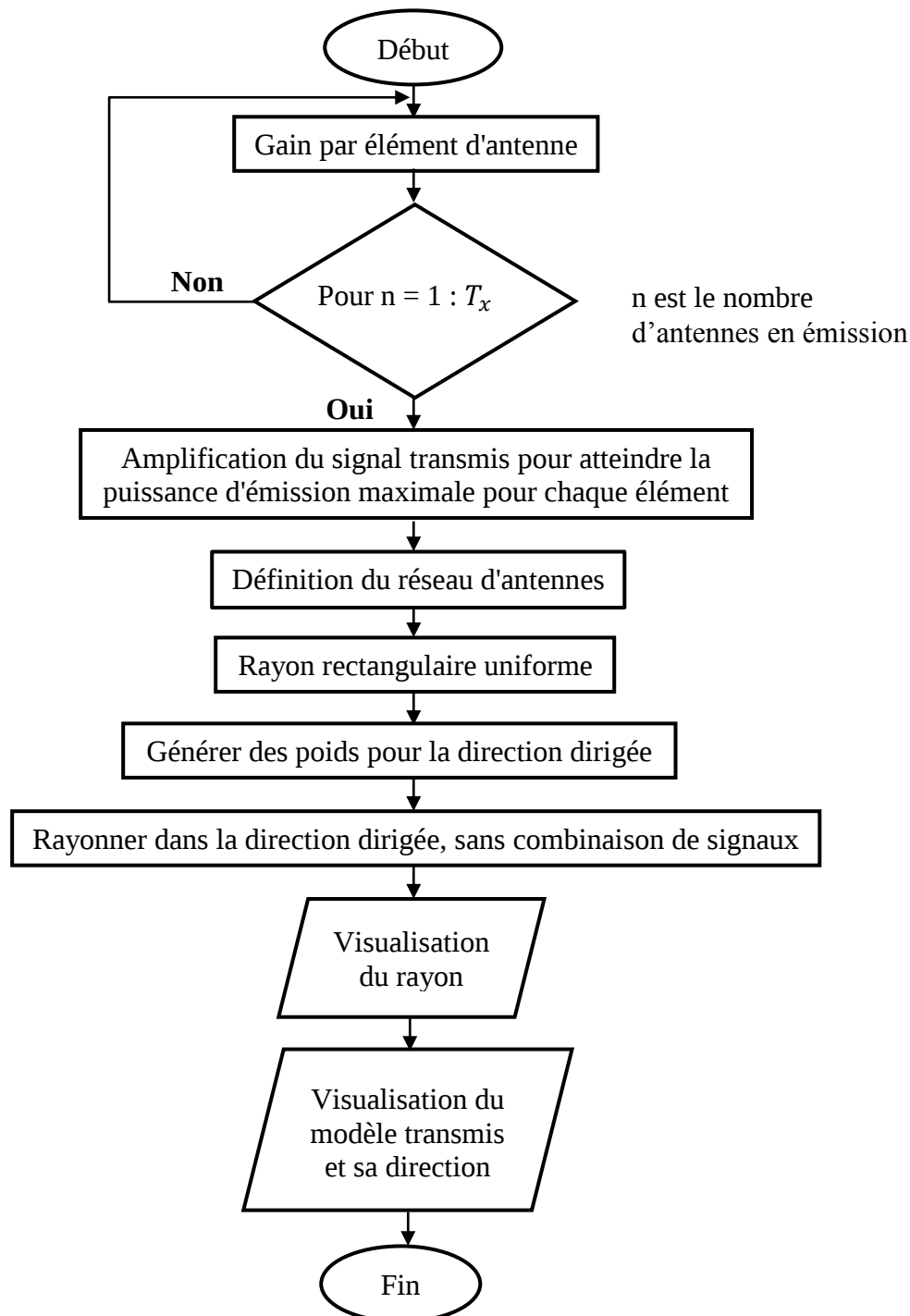


Figure 3.6 : l'organigramme de pilotage de lobe.

3.7 Résultat de simulation du signal transmis

Les organigrammes cités précédemment ont été implémenter sous MATLAB. Différents résultats sont obtenus.

3.7.1 Géométrie du réseau d'antenne (en émission).

La figure (3.7) ci-dessous représente la géométrie du réseau d'antennes utilisé dans notre simulation, Qui est un réseau planaire. Le réseau contient 32 antennes élémentaires placées sur deux axes **y** et **z**. Les axes **y** et **z** contient 16 et 2 antennes respectivement. Ces dernières sont espacées entre eux d'une distance de $\lambda/2$. Avec $\lambda = c/f$.

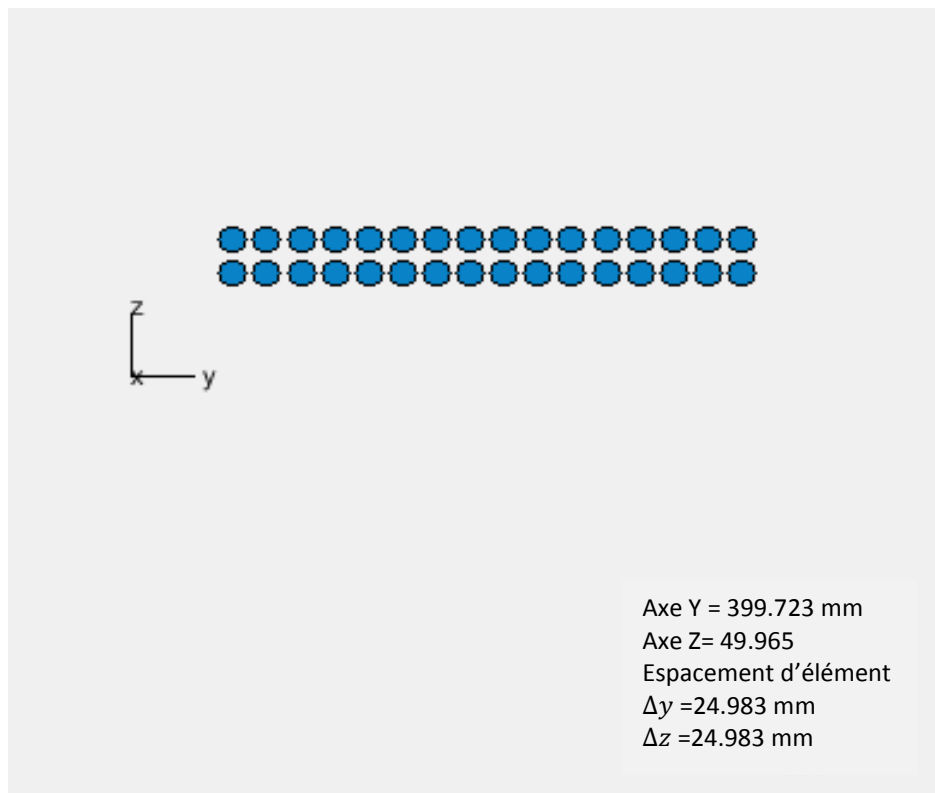


Figure 3.7 : La géométrie du réseau d'antenne (en émission).

$$\text{Donc } \lambda = \frac{3 \times 10^8}{6 \times 10^9} = 0.05 \text{ m} = 50 \text{ mm}$$

Alors l'espace entre chaque deux antennes = $\frac{50}{2} = 25 \text{ mm}$ qui est Δy et Δz .

✓ Il y a 16 antennes dans l'axe **y**, donc :

Sa longueur = $\Delta y \times \text{nombre d'antennes} = 25 \times 16 = 400 \text{ mm}$ qui est le **y**.

✓ Il y a 2 antennes dans l'axe **z**, donc :

Sa longueur = $\Delta z \times \text{nombre d'antennes} = 25 \times 2 = 50 \text{ mm}$ qui est le **z**.

3.7.2 Diagramme de rayonnement de réseau d'antenne (côté émetteur)

La figure suivante représente le diagramme de rayonnement obtenu pour chaque axe y en 3D (réseau d'antennes linéaire). Les axes y ont un diagramme de rayonnement identique, car le nombre et le type d'antenne utilisé dans chaque axe est le même.

La zone jaune reflète la partie la plus directive, qui représente le lobe principal. Les zones bleues dessinent les lobes latéraux qui ont une directivité réduite.

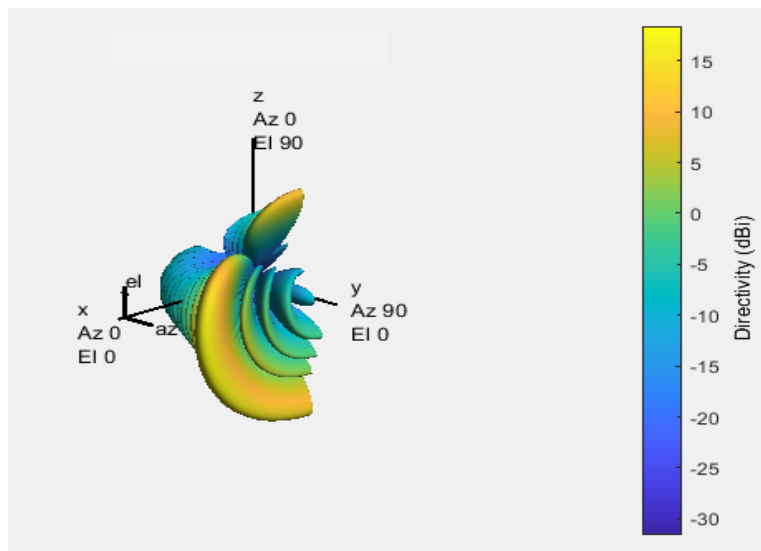


Figure 3.8 : le diagramme de rayonnement de réseau d'antenne (coté émettrice) en 3D.

La figure 3.9 est une autre représentation de diagramme de rayonnement de l'axe y en coordonnées polaire. La réponse indique le sens de transmission spécifié par l'angle de pilotage. Dans la simulation, on suppose que l'angle de pilotage est connu et proche de l'angle du mobile.

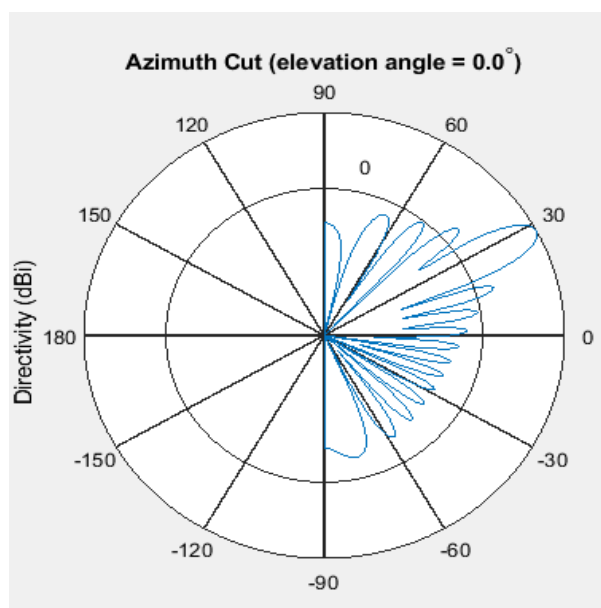


Figure 3.9 : Diagramme de rayonnement de réseau d'antenne en coordonnées polaire (2D).

3.8 Propagation et visualisation

Dans cette partie, on s'intéresse à l'implémentation de la technique de propagation de signal émis et la visualisation du signal reçu. L'organigramme 3.10 teste si le réseau d'antennes est linéaire, alors il espace les antennes élémentaires de $\frac{\lambda}{2}$ horizontalement seulement. Dans le cas contraire le réseau d'antennes est rectangulaire (planaire), donc les antennes élémentaires sont espacées de $\frac{\lambda}{2}$ horizontalement et verticalement. Finalement, l'architecture et le signal reçu sont visualisés.

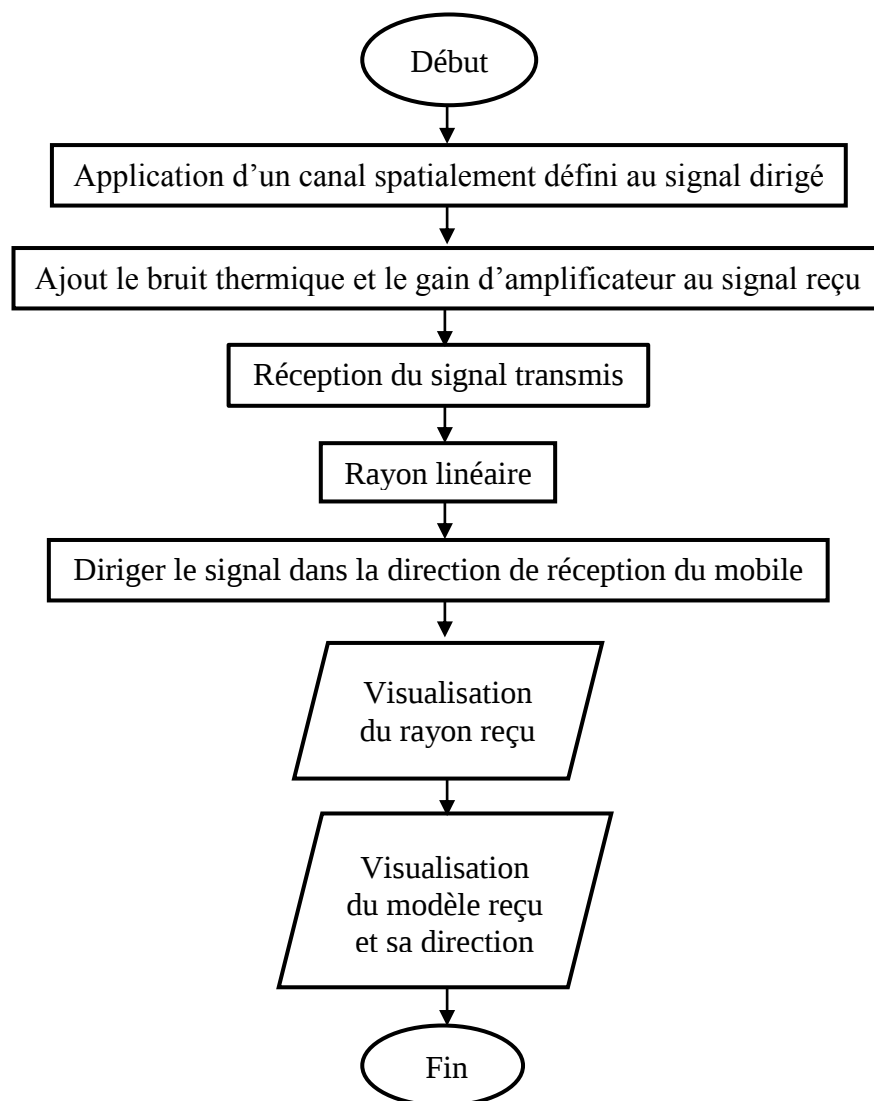


Figure 3.10 : propagation du signal émis et visualisation de signal reçu.

3.8.1 Géométrie du réseau d'antenne (en réception).

Après implémentation et simulation de l'organigramme 3.10. La géométrie du réseau d'antenne en réception est visualisée sur la figure (3.11) ci-dessous. On constate qu'on a 16 antennes élémentaires placées sur un seul axe y (linéaire), qui sont espacées entre eux de $\lambda/2$.

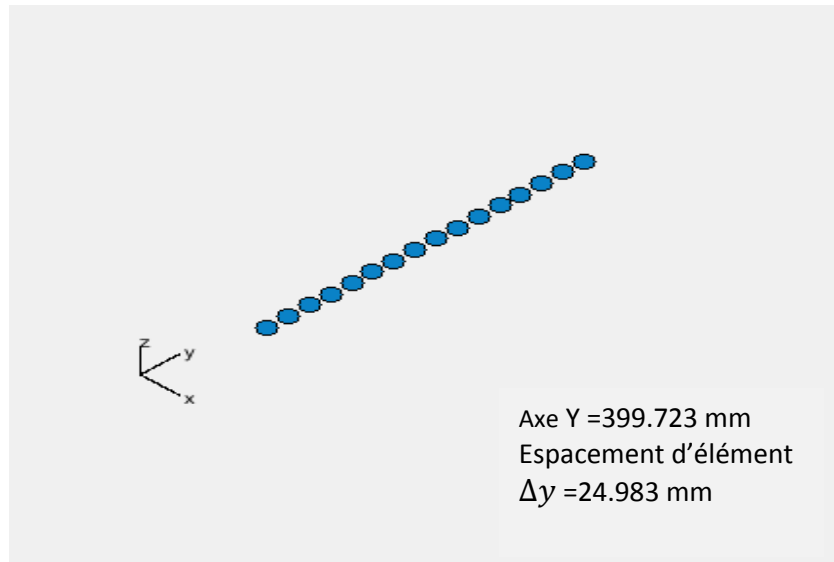


Figure 3.11 : La géométrie du réseau d'antenne (en réception).

On n'a pas changé la fréquence, donc la longueur d'onde reste la même. Alors Δy et y ne changeront pas ($\Delta y = 25\text{mm}$ et $Y = 400\text{ mm}$).

3.8.2 Diagramme de rayonnement de réseau d'antenne (réception) La figure (3.12) suivante montre le diagramme de rayonnement à la réception en 3D, quand la station de base se situe à la position $[0, 0, 0]$:

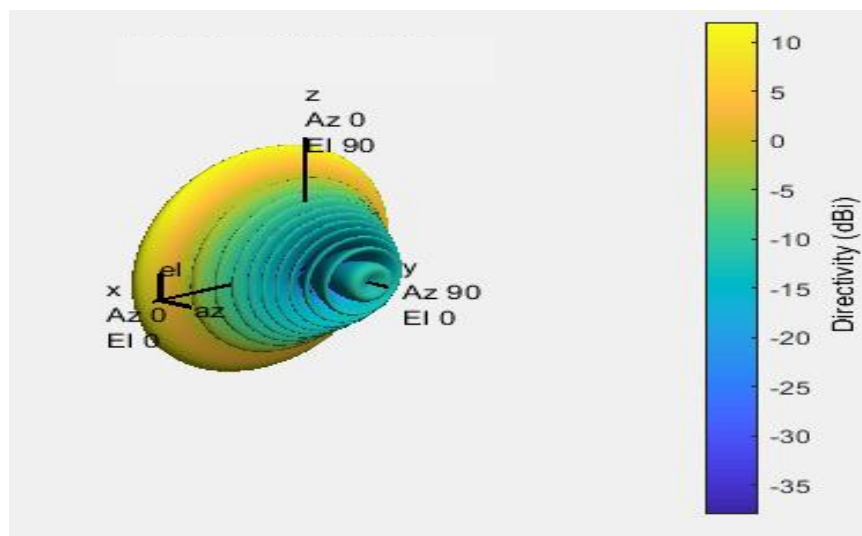


Figure 3.12 : le diagramme de rayonnement à la réception en 3D.

La figure (3.13) donne le diagramme de rayonnement à la réception en coordonnées polaire.

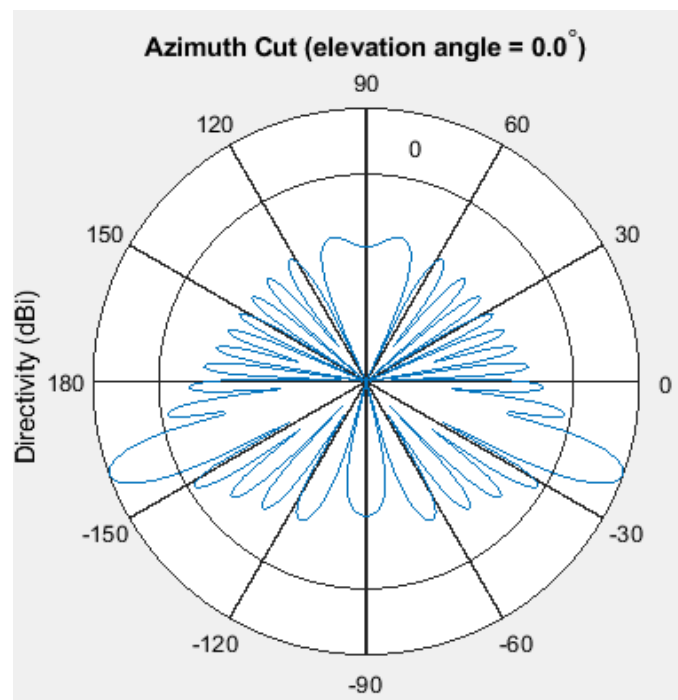


Figure 3.13 : le diagramme de rayonnement à la réception en coordonnées polaire.

Le diagramme de rayonnement à la réception reflète la direction de transmission. Et comme le réseau d'antenne à l'émission est symétrique, donc à la réception, on obtiendra la symétrie du signal émis (car les axes y sont symétriques entre eux).

La figure (3.14) suivante montre le diagramme de rayonnement à la réception en 3D, quand la station de base située à la position $[300, 300, 300]$:

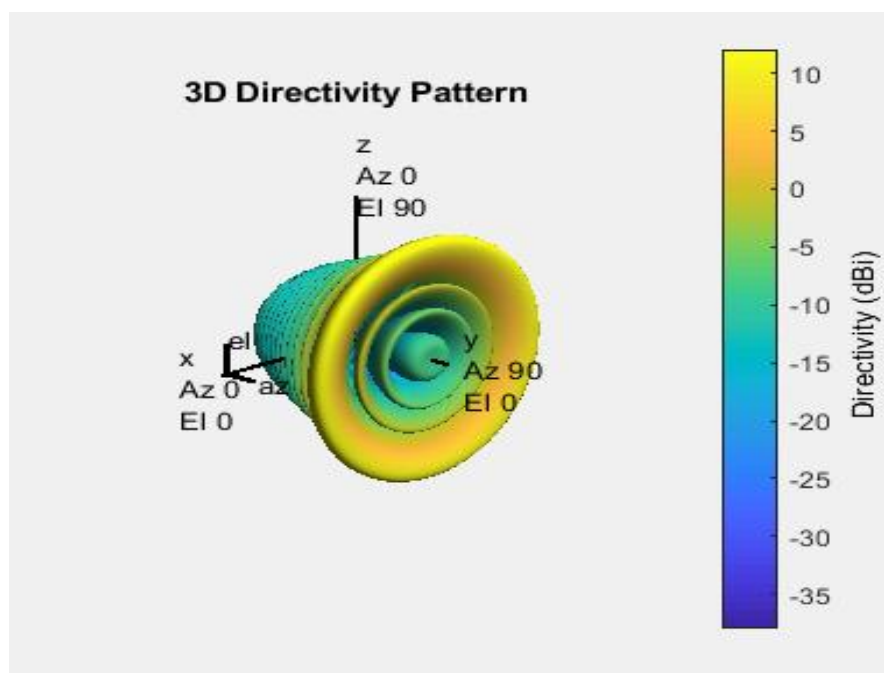


Figure 3.14 : le diagramme de rayonnement à la réception en 3D à la position $[300, 300, 300]$ m.

La figure (3.15) suivante montre le diagramme de rayonnement à la réception en 2D, quand la station de base est située à la position [300, 300, 300] :

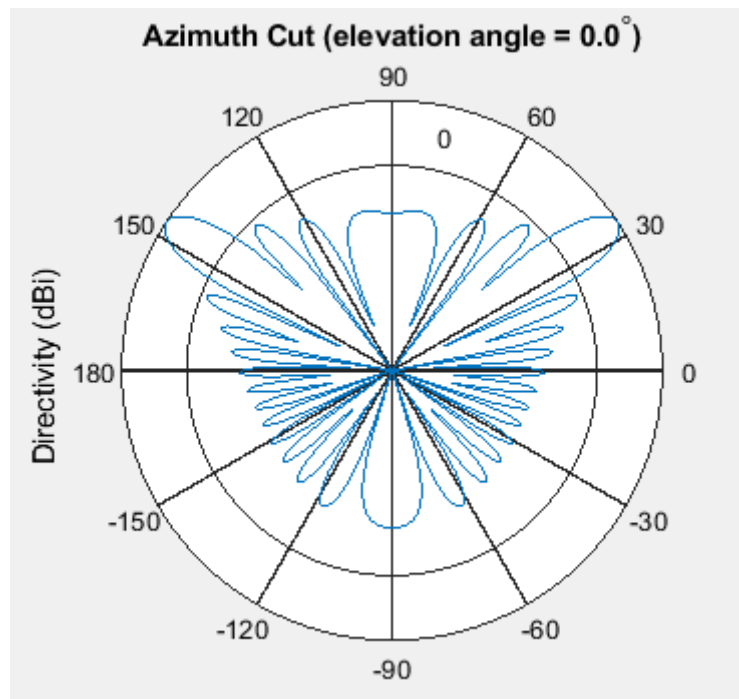


Figure 3.15 : le diagramme de rayonnement à la réception en coordonnées polaire [300, 300, 300].

Les figures 3.14 et 3.15 montrent le signal reçu en changeant la position de la station de base.

3.9 La constellation de diagramme

L'implémentation des étapes citées dans les organigrammes précédents, permet de donner la constellation des symboles OFDM en utilisant la modulation 64QAM, et les paramètres EVM et MER qui sont illustrés dans la figure (3.16) suivante :

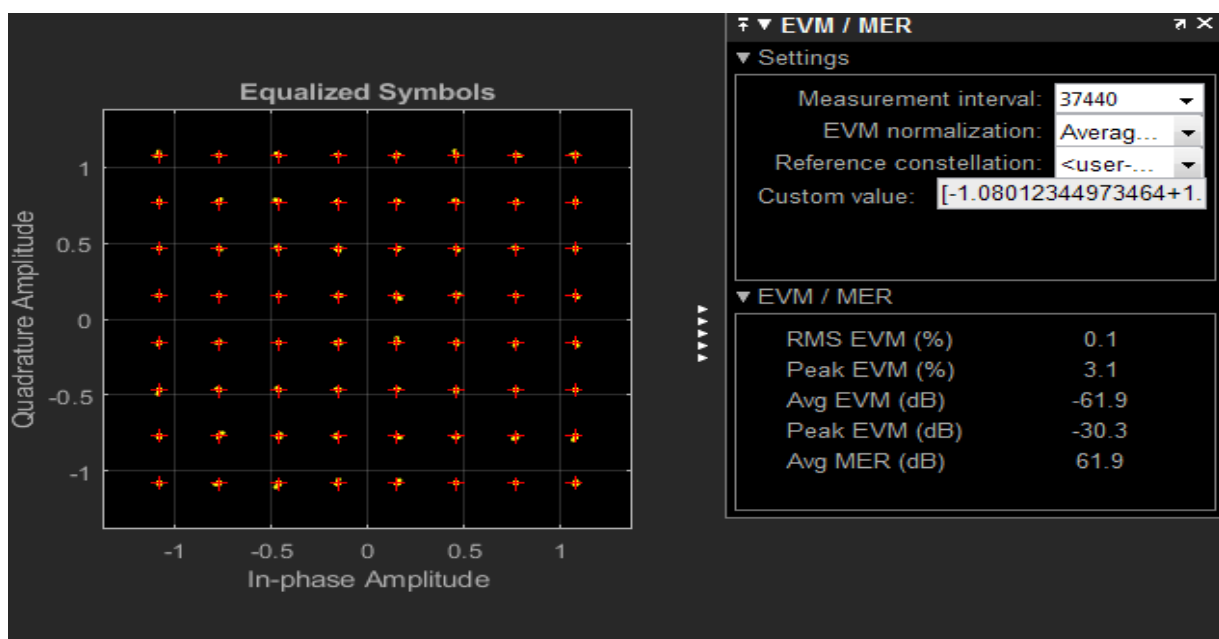


Figure 3.16 : diagramme de constellation avec modulation 64QAM.

La figure (3.17) est une partie zoomée de la constellation précédente, afin de bien montrer le nuage et le symbole de référence.

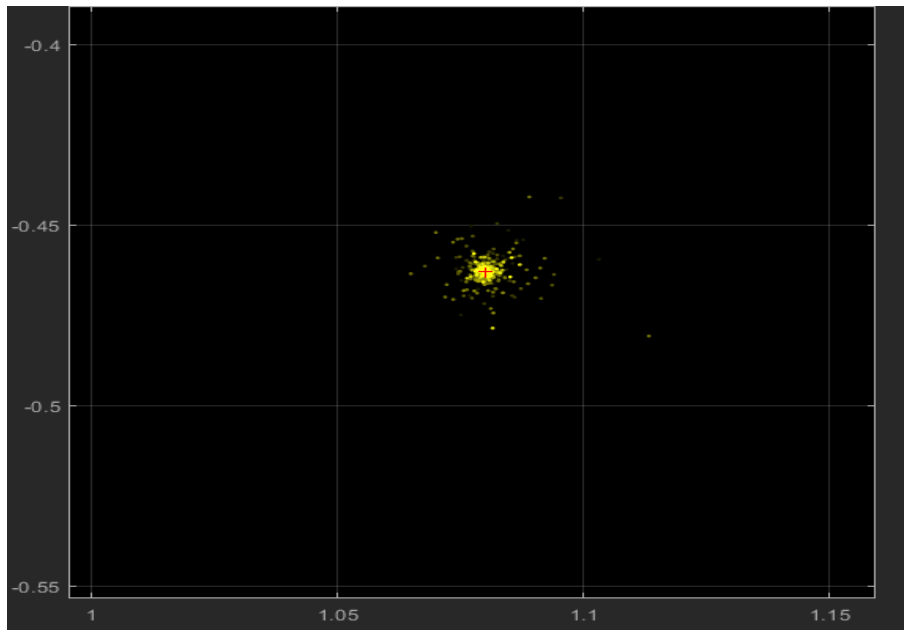


Figure 3.17 : constellation zoomée

Le signe rouge signifie le symbole cible idéal où bien le symbole de référence. Les nuages jaunes signifient les symboles transmis où reçus, car le même symbole transmis plusieurs fois se mélange aléatoirement chaque fois à cause de bruit de phase transmis, les distorsions, canal bruité, et collisions des données...etc. Par conséquent, la position de chaque symbole reçu sur la constellation est légèrement différente ce qui donne ces petits nuages jaunes.

- ✓ **EVM:** error vector magnitude où ampleur du vecteur d'erreur, est l'un des paramètres utilisés pour définir les performances d'un équipement de communication sans fil. Il est défini comme la magnitude de la différence entre le vecteur de symbole de référence et le vecteur de symbole reçu.

$$EMV = 10 \log \frac{\text{vecteur de symbole de référence}}{\text{vecteur de symbole de reçu}} \quad (dB) \quad (3.1)$$

- ✓ **RMS EVM:** Root mean square où la racine carrée moyenne, spécifié comme un scalaire numérique positif, qui est la racine carrée de la moyenne des carrés de toutes les valeurs de l'EMV.

$$RMS EVM = \sqrt{\frac{1}{n} (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}. \quad (3.2)$$

- ✓ **PEAK EVM :** renvoyé sous forme de scalaire numérique positif, il s'agit de la plus grande valeur d'EVM unique calculée pour toutes les valeurs.

- ✓ **Avg MER:** modulation error ratio où taux d'erreur de modulation est la différence entre le vecteur de symbole transmis et le vecteur de symbole de référence.

$$MER = 10 \log \frac{\text{vecteur de symbole de transmis}}{\text{vecteur de symbole de référence}} \quad (dB) \quad (3.3)$$

Dans le cas de MER, plus le nombre est élevé c'est bien.

3.10 Conclusion

La simulation a mis en évidence l'utilisation de réseaux d'antennes à commande phasée pour un système MIMO-OFDM formé par faisceaux. Il rend compte de la géométrie spatiale et de l'emplacement des lobes au niveau de la station de base et de la station mobile pour un système à mono-utilisateur. En utilisant la recherche de canal, cette simulation illustre la manière dont le pré-codage est réalisé dans les systèmes sans fil actuels, et la modélisation du pilotage du réseau d'antennes. Dans l'ensemble de paramètres configurables, on peut modifier le nombre de flux de données, les éléments d'antenne d'émission / réception, l'emplacement et la géométrie des stations ou des ensembles, les modèles de canal et leurs configurations pour étudier les effets individuels ou combinés des paramètres sur le système. À titre d'exemple, il suffit de varier le nombre d'antennes d'émission pour observer l'effet du faisceau dirigé sur le lobe principal et les performances du système qui en résulte.

Conclusion générale

Malgré le succès de la 4eme génération, elle a connu des inconvénients comme la bande passante limitée et la consommation élevée de l'énergie...etc. Ces inconvénients ont poussé les développeurs en télécommunication de faire plus de recherche et d'expériences afin d'améliorer le domaine de télécommunication.

La 5G est l'une de ses recherches, qui est une nouvelle génération de la téléphonie mobile. Cette technologie sans fil promet de révolutionner la manière dont le monde communique. Plus généralement, toutes les communications mobiles seront couvertes par une nouvelle tranche de bande passante située entre 6 Ghz et 300 Ghz.

La 5G sera basé sur le MIMO-OFDM, et le beamforming pour pouvoir émettre plusieurs signaux au même temps à partir d'une seule station de base, sans que les signaux soient interférés entre eux.

- ✓ Le MIMO est composé de plusieurs élément rayonnants qui est le réseau d'antennes.
- ✓ Le beamforming est une interférence constructive. Elle a le but de sommer le rayonnement de toutes les antennes du réseau, pour obtenir un lobe plus étroit, plus directif et plus puissant. alors un débit élevé.
- ✓ Le réseau d'antennes contient un commutateur électronique qui fait le processus de changement de phase automatiquement, ce qui permet de d'orienter le lobe principal dans plusieurs directions (antennes intelligentes).
- ✓ On utilise les réseaux d'antennes phasés, pour que deux mobiles puissent communiquer simultanément, en utilisant la même fréquence
- ✓ On utilise la modulation OFDM pour gagner la bande passante car les sous porteuse sont orthogonaux entre eux.

L'implémentation de ce système sur la réalité est compliquée. Car les fréquences sont élevées, donc la longueur d'onde est trop petite. Elle va être de très petite portée, ce qu'il impose d'installer un nombre de microcellule élevé.

Dans notre simulation, on n'a pas pu utiliser ses fréquences, et un nombre élevé d'antennes. Car la capacité du système MATLAB est limitée.

A-Calcul l'angle azimut et l'angle élévation

- **Le méridien**

C'est un demi-cercle imaginaire tracé sur le globe terrestre, passant par les pôles nord et sud de notre planète et un point particulier qu'on veut savoir sa longitude.

- **La longitude**

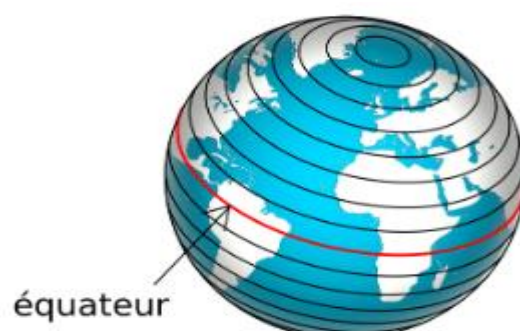
C'est les coordonnées géographiques d'une position d'un point sur le globe terrestre, elle correspond à l'angle que fait le plan passant par le méridien du point avec le plan passant par le méridien d'origine qui s'appelle Greenwich.

Elle s'exprime souvent en degré, de 0° à 180° est et de 0° à 180° ouest par rapport au méridien Greenwich



- **L'équateur**

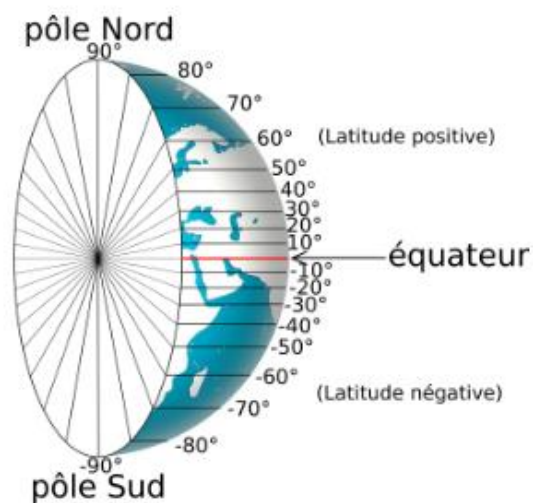
C'est un cercle imaginaire qui se trouve autour de la planète, elle s'appelle aussi parallèle. Cette dernière est la référence parce qu'elle a la plus grande longueur. Elle coupe la planète en deux demi sphères qui sont égaux.



- **La latitude**

Elle correspond à la distance angulaire qui sépare ce point de l'équateur qui est 0° , les autres latitudes sont entre 0° et 90° nord où sud. Elle est aussi un cercle imaginaire où parallèle qui est orthogonal à l'axe de rotation de la terre.

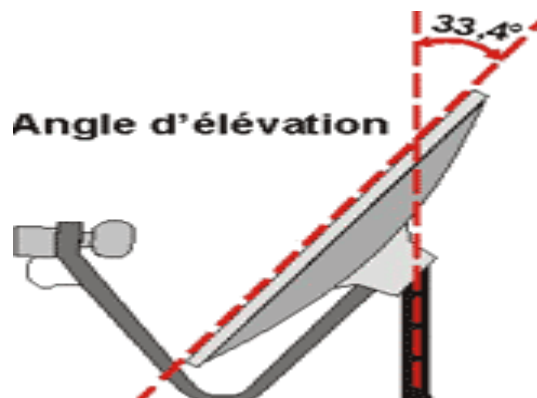
Tous les points qui se trouvent sur un même parallèle présentent la même latitude



- **Angle d'élévation d'une antenne**

C'est l'angle qu'on doit incliner l'antenne dans le ciel pour être dirigée vers le satellite.

Pour calculer l'élévation d'une antenne de station au sol, il faut connaître la latitude et la longitude de la station au sol en utilisant des méthodes avancées pour localiser la station telle que GPS, et de connaître la longitude du satellite qui peut être obtenue à partir des cartes telle que WESTSAT



La formule représente comment on calcule l'angle d'élévation :

$$El = \tan^{-1} \left[\frac{(\cos(Lat_{station}) \times \cos(D) - \left(\frac{R_T}{R_T+h}\right))}{(\sqrt{1 - \cos^2(Lat_{station}) \times \cos^2(D)})} \right]$$

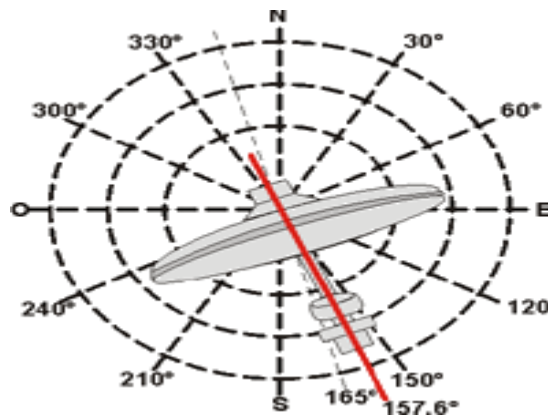
Avec :

- Lon : longitude.
- Lat : latitude.
- R_T : le rayon de la terre à l'équateur.
- h : l'altitude des satellites géostationnaires au-dessus de l'équateur
- $D = Lon_{station} - Lon_{satellite}$.

- **Angle d'azimut d'une antenne**

C'est l'angle au sol entre le plan vertical contenant le satellite et le plan méridien local.

Pour calculer l'angle azimut, il faut aussi savoir la latitude de la station au sol et la longitude de cette dernière et du satellite.



La formule montre comment on calcule l'angle azimut :

$$Az = \tan^{-1} \frac{\tan D}{\sin(Lat_{station})}$$

Et comme l'azimut est défini par rapport à la direction Nord, on a :

- Par rapport au ouest : $Az' = 180^\circ - Az$.
- Par rapport à l'est : $Az' = 180^\circ + Az$.

Bibliographie

- [1] Afif Osseiran, Jose F Monserrat, Patrick Marsch : ‘5G wireless communication technology ,2016.
- [2] : <https://www.supinfo.com/articles/single/2607-technologie-cinquieme-generation-5g>.
- [3] : Aliou Diallo, systèmes multi-antennes pour diversité et MIMO, université Nice Sophia Antipolis, 2007.

- [4] : http://www.radartutorial.eu/06.antennas/Antenne%20parabolique.fr.html?fbclid=IwAR.3Wv8T9w6HrhkRkS7fdv50k_MI-ze_E3ArbS_WG1yc80b5vwCVFTje4II0.
- [5] : <https://www.techopedia.com/definition/28945/beamforming>.
- [6] : Merouane Debbah, OFDM, 2004.
- [7] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing
- [8] : Odile Picon et Coll, Préface de Maurice Bellange, les antennes, 2009.
- [9] : Aounallah Naceur, note de cours pour antennes, Ouargla, 2018.
- [10] : Gabriel Cormier, Paramètres d'antenne, université de Moncton, 2012.
- [11] : Alexandre Boyer, support de cours pour antenne, Institut national des sciences national des sciences appliquées de Toulouse, 2011.
- [12] : Guellil Nasser, thèse de Magister Etude et conception d'un réseau d'antennes beamforming à base de la matrice de Butler en utilisant ADS Momentum, Algérie