

2^e REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

Filière : TELECOMMUNICATION

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par

M^{lle}. Toukali Samira

M^{me}. Yaalaoui Khadra

Thème

*Conception et simulation d'un réseau linéaire
d'antennes imprimées*

Soutenu le : // 2021

Devant Les Jury :

M^{me}. MELIZI Nora

M^{me}. LAKHLEF Nora

M^{re}. BAHIH Mohamed

Président garde

Encadreur

Examineur grade

MAA- U. de Bordj Bou Arreridj

MAA- U. de Bordj Bou Arreridj

MAA- U. de Bordj Bou Arreridj

Année Universitaire 2020/2021

Remerciement

*Nous profitons de cette occasion pour remercier : Avant tout, ALLAH,
le tout puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté pour
accomplir ce travail.*

*Un remerciement et une reconnaissance particulière à notre
encadreuse Mme NORA LAKHLEF pour ses conseils*

Avérés, ses efforts et son écoute particulière

*Que nos vifs remerciements vont aux membres de jury pour avoir
accepté de juger notre travail.*

*Tous ceux qui ont participés de près ou de loin à l'accomplissement
de ce mémoire soient sincèrement remercie.*

*L'ensemble du personnel Enseignant et Administratif du
département de l'électronique*

Dédicace

À mes parents

À mes frères

À mes sœurs

À tous mes amis

À tous ceux qui me sont chers

Toukali. Samira

Dédicace

À Je dédie ce travail

À la mémoire de mon père

À ma chère mère que l'ALLAH lui accorde longue vie

À mon mari bien aimé Lakhdar

À mon cher fils Sibares

À mes frères

À toute ma grande famille

À tous mes amis

Saalaoui. Khadra

Sommaire

RESUME.....	X
ABSTRACT	X
التلخيص	X
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES ANTENNES IMPRIMEES	2
1.1 INTRODUCTION	2
1.2 CHOIX DE LA TECHNOLOGIE DES ANTENNES IMPRIMEES	2
1.3 DESCRIPTION D'UNE ANTENNE IMPRIMEE OU 'PATCH'	2
1.4 LES CARACTERISTIQUES DES ANTENNES IMPRIMEES	3
1.4.1 La directivité.....	3
1.4.2 Le gain	4
1.4.3 Rendement de l'antenne	4
1.4.4 Coefficient de réflexion.	4
1.4.5 Impédance d'entrée de l'antenne	5
1.4.6 Bande passante	5
1.5 TECHNIQUES D'ALIMENTATION	6
1.5.1 Alimentation par ligne micro-ruban	6
1.5.2 Alimentation par sonde coaxiale	7
1.5.3 Alimentation par ouverture (par fente)	8
1.5.4 Alimentation par proximité.....	8
1.6 AVANTAGES ET LIMITATIONS DES ANTENNES PATCH.....	9
1.7 LES APPLICATIONS DES ANTENNES MICROBANDES.....	10
1.8 CONCLUSION	10
2 CHAPITRE II : RESEAUX D'ANTENNES IMPRIMEES	11
2.1 INTRODUCTION	11
2.2 TYPE DE RESEAUX D'ANTENNES IMPRIMEES.....	11
2.2.1 Réseaux linéaires	11
2.2.2 Réseaux planaires	13
2.2.3 Réseaux circulaires	13
2.2.4 Réseaux cylindriques	13
2.2.5 Réseaux coniques	14
2.3 ALIMENTATION DES RESEAUX D'ANTENNES	15
2.3.1 Les dispositifs utilisés dans les réseaux	15
2.3.1.1 Les Déphaseurs	15
2.3.1.1.1 Les déphaseurs à lignes	15
2.3.1.1.2 Les déphaseurs à ferrites.....	15
2.3.1.2 Les Diviseurs ou combineurs	16
2.3.1.2.1 La jonction T	16
2.3.1.2.2 Diviseur de Wilkinson	16
2.3.1.2.3 Le coupleur par proximité	17
2.3.1.2.4 L'anneau hybride.....	17

2.4	TECHNIQUES D'ALIMENTATION D'UN RESEAU D'ANTENNES :	18
2.4.1	Alimentation série.....	18
2.4.2	Alimentation parallèle	18
2.5	COUPLAGE DANS LE PLAN E ET LE PLAN H	19
2.5.1	Couplage horizontal (couplage dans le plan E)	19
2.5.2	Couplage vertical (couplage dans le plan H)	19
2.6	DOMAINE D'APPLICATION.....	19
2.7	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES RESEAUX D'ANTENNE.....	20
2.8	CONCLUSION	20
3	CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	21
3.1	INTRODUCTION	21
3.2	DESCRIPTION DE LA STRUCTURE D'ANTENNE A SIMULER.....	21
3.3	SIMULATION D'UNE ANTENNE A UN SEUL ELEMENT.....	23
3.3.1	Coefficient de réflexion et Rapport d'onde stationnaire	23
3.3.2	Diagrammes de rayonnement	25
3.3.3	L'efficacité	25
3.4	RESEAU D'ANTENNES A DEUX ELEMENTS	26
3.4.1	Coefficient de réflexion et Rapport d'onde stationnaire	26
3.4.2	Diagramme de rayonnement.....	28
3.4.3	L'efficacité	29
3.5	RESEAU D'ANTENNES A 3 ELEMENTS	29
3.5.1	Coefficient de réflexion et Rapport d'onde stationnaire	30
3.5.2	Diagrammes de rayonnement	31
3.5.3	L'efficacité	32
3.6	RESEAU D'ANTENNES A 6 ELEMENTS	32
3.6.1	Coefficient de réflexion et Rapport d'onde stationnaire	33
3.6.2	Diagrammes de rayonnement	35
3.6.3	L'efficacité	35
3.7	RESULTATS RECAPITULES DE LA PARTIE 1	36
3.8	COMPARAISON AVEC LA LITTERATURE.....	36
3.8.1	Antenne à un seul élément.....	37
3.8.1.1	Coefficient de réflexion et Rapport d'onde stationnaire	37
3.8.1.2	Diagramme de rayonnement.....	38
3.8.1.3	L'efficacité.....	39
3.8.2	Simulation d'antenne réseau à neuf (3x3) éléments	39
3.8.2.1	Coefficient de réflexion et Rapport d'onde stationnaire	39
3.8.2.2	Diagramme de rayonnement	42
3.8.2.3	L'efficacité.....	42
3.8.2.4	Interprétation Résultats récapitulés de la partie 2	42
3.9	CONCLUSION	43
	CONCLUSION GENERALE	44
	BIBLIOGRAPHIE	45

Liste des Figures

FIGURE 1: PRESENTATION D'UNE ANTENNE IMPRIMEE	3
FIGURE 2 : PRINCIPALES FORMES DES ELEMENTS RAYONNANTS	3
FIGURE 3:ALIMENTATION PAR LIGNE MICRO-RUBAN.....	6
FIGURE 4: DIFFERENTS TYPES D'ALIMENTATION PAR LIGNE MICRO RUBAN	7
FIGURE 5:ANTENNE IMPRIMEE ALIMENTEE PAR SONDE COAXIALE	7
FIGURE 6:ANTENNE IMPRIMEE ALIMENTEE PAR FENTE	8
FIGURE 7:ANTENNE IMPRIMEE ALIMENTEE PAR PROXIMITE	9
FIGURE 8:GEOMETRIE D'UN RESEAU LINEAIRE	12
FIGURE 9: GEOMETRIE D'UN RESEAU PLANAIRE	13
FIGURE 10 : GEOMETRIE D'UN RESEAU CIRCULAIRE	13
FIGURE 11 : GEOMETRIE D'UN RESEAU CYLINDRIQUE DE M ANNEAUX DE RAYON A ESPACES D'UNE DISTANCE D SUIVANT L'AXE Z ET COMPOSES DE N ELEMENTS	14
FIGURE 12 : GEOMETRIE D'UN RESEAU CONIQUE DE M ANNEAUX ESPACES D'UNE DISTANCE D ET COMPOSES DE N ELEMENTS	14
FIGURE 13:DEPHASEURS EN SERIE.	15
FIGURE 14:DEPHASEURS EN PARALLELE	16
FIGURE 15: LA JONCTION T	16
FIGURE 16: DIVISEUR WILKINSON	17
FIGURE 17: COUPLEUR PAR PROXIMITE	17
FIGURE 18: L'ANNEAU HYBRIDE	18
FIGURE 19:ALIMENTATION EN SERIE	18
FIGURE 20:ALIMENTATION EN PARALLELE	19
FIGURE 21: CONFIGURATION DE L'ANTENNE UTILISEE	22
FIGURE 22: STRUCTURE DE L'ANTENNE A SIMULER.....	23
FIGURE 23:COEFFICIENT DE REFLEXION (S11) EN DB D'UN RESEAU D'ANTENNE A UN SEUL ELEMENT	24
FIGURE 24: RAPPORT D'ONDE STATIONNAIRE D'UN RESEAU D'ANTENNE A UN SEUL ELEMENT	24
FIGURE 25: LE GAIN D'UN RESEAU D'ANTENNE A UN SEUL ELEMENT	25
FIGURE 26:LA DIRECTIVITE D'UN RESEAU D'ANTENNE A UN SEUL ELEMENT.....	25
FIGURE 27:STRUCTURE DE RESEAU L'ANTENNE A DEUX ELEMENTS.....	26
FIGURE 28:COEFFICIENT DE REFLEXION (S11) EN DB D'ANTENNE PATCH A DEUX ELEMENTS	27
FIGURE 29:RAPPORT D'ONDE STATIONNAIRE D'ANTENNE A DEUX ELEMENTS.....	28
FIGURE 30:LE GAIN D'UN RESEAU D'ANTENNE A DEUX ELEMENTS	28
FIGURE 31: LA DIRECTIVITE D'UN RESEAU D'ANTENNE A DEUX ELEMENTS	29
FIGURE 32: STRUCTURE DE RESEAU L'ANTENNE A TROIS ELEMENTS	29
FIGURE 33:COEFFICIENT DE REFLEXION (S11) EN DB D'ANTENNE PATCH A TROIS ELEMENTS.....	30
FIGURE 34:RAPPORT D'ONDE STATIONNAIRE D'UN RESEAU A TROIS ELEMENTS	31
FIGURE 35:LE GAIN D'UN RESEAU D'ANTENNE A TROIS ELEMENTS.....	31
FIGURE 36: LA DIRECTIVITE D'UN RESEAU D'ANTENNE A TROIS ELEMENTS	32
FIGURE 37:STRUCTURE DE RESEAU L'ANTENNE A SIX ELEMENTS	33
FIGURE 38: COEFFICIENT DE REFLEXION (S11) EN DB D'ANTENNE PATCH A SIX ELEMENTS.....	34
FIGURE 39:RAPPORT D'ONDE STATIONNAIRE D'UN RESEAU A TROIS ELEMENTS	34
FIGURE 40:LE GAIN D'UN RESEAU D'ANTENNE A SIX ELEMENTS.....	35
FIGURE 41: LA DIRECTIVITE D'UN RESEAU D'ANTENNE A SIX ELEMENTS	35
FIGURE 42:COEFFICIENT DE REFLEXION (S11) EN DB D'ANTENNE A UN SEUL ELEMENT.....	37

FIGURE 43: RAPPORT D'ONDE STATIONNAIRE D'ANTENNE A UN SEUL ELEMENT	38
FIGURE 44: LE GAIN D'UNE ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE.....	39
FIGURE 45: LA DIRECTIVITE D'UNE ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE.....	39
FIGURE 46: COEFFICIENT DE REFLEXION (S11) EN DB : NOS RESULTATS	40
FIGURE 47: COEFFICIENT DE REFLEXION (S11) EN DB : -RESULTATS DE L'ARTICLE [11]	40
FIGURE 48: RAPPORT D'ONDE STATIONNAIRE POUR RESEAU D'ANTENNE 3X3). (NOTRE RESULTAT)	41
FIGURE 49: RAPPORT D'ONDE STATIONNAIRE POUR RESEAU D'ANTENNE 3X3) ([11]).....	41
FIGURE 50: LE GAIN ET LA DIRECTIVITE (NOS RESULTATS)	42

Liste des Tableaux

TABLEAU 1: DIMENSION D'ANTENNE PATCH RECTANGULAIRE	22
TABLEAU 2: RESULTAT DE SIMULATION DES DIFFERENTS RESEAUX D'ANTENNES IMPRIMEES (UN, DEUX, TROIS ET SIX ELEMENTS)	36
TABLEAU 3: PARAMETRES DE CONCEPTION ET VALEURS CORRESPONDANTES	37
TABLEAU 4: RESULTAT COMPARATIVE DE SIMULATION D'UN RESEAU D'ANTENNE A 3X3 ELEMENTS	42

Liste des abréviations

HFSS : High Frequency Structure Simulation

ROS : Rapport d'ondes stationnaires

S11 : Coefficient de réflexion

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio

ABW : Absolute Band width

Résumé

Ce travail concerne la simulation et la conception d'une antenne patch rectangulaire fonctionnant à 5,5025 GHz. Après, l'antenne simulée est utilisée pour construire des réseaux à 2, 3 et 6 éléments. Ensuite, nous avons simulé une antenne patch fonctionnant à 13 GHz. Et puis on l'a mis en réseau à 3x3 éléments espacés. Les simulations sont faites sous le simulateur électromagnétique HFSS.

Mots-clés : Antennes, antenne imprimée, antennes réseau, diagramme de rayonnement, HFSS.

Abstract

This work concerns the simulation and design of a rectangular patch antenna operating at 5.5025 GHz. Afterwards, the simulated antenna is used to forming the array antennas: 2-elements, 3-elements and 6-elements. Then we simulated a patch antenna operating at 13 GHz. And then, the simulated antenna is used to forming the array antennas at 3x3-elements. The simulations are done under the HFSS electromagnetic simulator.

Keywords: Patch antenna, Radiation pattern, The Antenna, Antennas array, HFSS

التلخيص

يتمحور هذا العمل حول تصميم ومحاكاة هوائي صفيحي مستطيل الشكل يعمل على تردد 5.5025 جيجا هرتز، ثم استعمل هذا الهوائي في تصميم شبكة من عنصرين، ثلاثة عناصر ثم ستة عناصر، بعدها قمنا بمحاكاة هوائي صفيحي يعمل على تردد 13 جيجا هرتز. ومن ثم حولناه الى شبكة من تسعة عناصر متباعدة.

تمت المحاكاة بواسطة برنامج المحاكاة الكهرومغناطيسية HFSS

الكلمات المفتاحية: الهوائي المطبوع، مخطط الإشعاع، الهوائيات، شبكة الهوائيات، HFSS،

Introduction générale

Durant les dernières années, le monde a vu un avancement pertinent des télécommunications. Ce développement rapide présente de nombreuses améliorations au niveau des dispositifs et des systèmes sans fil pour répondre aux exigences des applications des télécommunications. Parmi ces dispositifs, les antennes qui jouent un rôle important dans l'amélioration des performances des systèmes.

L'antenne est un dispositif utilisée pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou le capter. On distingue plusieurs types d'antennes telles que les antennes paraboliques, les antennes dipôles, les antennes yagi et les antennes patch. Les dernières sont les plus utilisées dans de nombreux domaines par exemple la communication spatiale, la communication mobile, les radars,....etc. Ces antennes possèdent des avantages tels que leur taille réduite, faible cout de fabrication, faible poids. Cependant, elles ont des inconvénients comme le gain faible, faible rendement et perte d'impédance d'alimentation, ainsi la bande passante étroite. Pour réduire ces inconvénients et pour améliorer leurs performances, l'association des antennes patch en réseau doit être nécessaire dans certaine type d'applications

Les travaux de ce mémoire sont portés sur la conception et la simulation d'un réseau linéaire d'antenne imprimée alimenté par sonde coaxiale et montrent qu'un réseau linéaire peut être considéré comme une cellule de base de construire un réseau plan.

Ce manuscrit est organisé en de trois chapitres :

Le premier chapitre fait l'objet d'une description générale sur les antennes imprimées où on a cité leurs caractéristiques, leurs types d'alimentation, les avantages et inconvénients ainsi que quelques domaines d'applications.

Dans le second chapitre, on présente un aperçu sur les réseaux d'antennes imprimées et leurs caractéristiques ainsi que certaines techniques d'alimentation

Le troisième chapitre est consacré à la conception et la simulation des réseaux d'antennes imprimées. En commençant par une antenne à un seul élément qui constituée la cellule de base pour former ces réseaux : 2x1 élément, 3x1 élément et 2x3 éléments sous le simulateur HFSS. Ensuite nous représentons les résultats de la simulation de diverses conceptions conçus.

Chapitre 1

*Généralités sur Les
Antennes imprimées*

Chapitre 1 : Généralités sur Les Antennes imprimées

1.1 Introduction

Dans les systèmes de télécommunication, les antennes sont considérées comme l'un des éléments nécessaires pour assurer la transition entre l'onde guidée (ligne de transmission et le guide d'onde) et l'onde rayonnée. Il existe plusieurs types d'antennes telles que les antennes paraboliques, les antennes Yagi, les antennes dipôles, les antennes imprimées qui font l'objet de ce chapitre. La théorie et la technologie des antennes imprimées ont connu une croissance rapide, et elles ont été l'une des technologies les plus innovatrices dans leur conception. Elles ont trouvé rapidement une large application dans les systèmes microondes modernes [10].

Dans ce chapitre nous présentons une généralité sur les antennes imprimées, qui connaissent un grand succès dans les télécommunications spatiales et terrestres.

Tout d'abord nous présentons la description de la structure simplifiée des antennes imprimées (antennes patches), leurs caractéristiques, les différents types d'alimentations, leurs avantages et limitations, ensuite on clôture ce chapitre par bref aperçu de leurs domaines d'application.

1.2 Choix de la technologie des antennes imprimées

Aujourd'hui les antennes imprimées jouent un rôle important dans le domaine des télécommunications, grâce à leurs formes géométriques diverses, elles sont implantées dans de nombreux dispositifs électroniques telles que le téléphone portable, les ailes des avions, les appareils photos numériques...ect [5].

Parmi les avantages de cette technologie d'antennes, on peut citer : le faible poids, leur volume réduit, la conformabilité et la possibilité d'intégrer les circuits micro-ondes au niveau des antennes. Ajoutons que la simplicité de leurs structures fait que ce type d'antenne le faible coût de fabrication [4].

1.3 Description d'une antenne imprimée ou 'patch'

L'antenne imprimée est constituée par une pièce métallique rayonnante de forme arbitraire, appelé élément rayonnant (le patch), est déposée sur un substrat diélectrique

d'épaisseur «h» et un plan de masse. La figure (1) représente la structure d'une antenne imprimée [5].

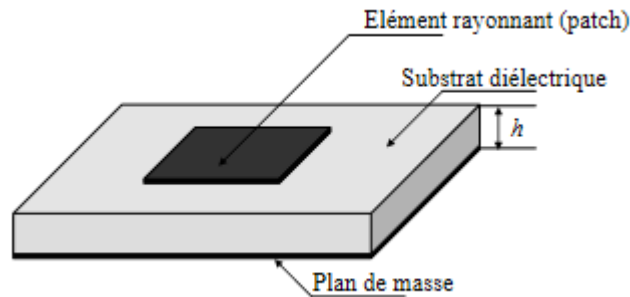


Figure 1: Présentation d'une antenne imprimée

Il y a plusieurs formes d'éléments rayonnants mais les principales formes utilisées sont : le carré, le rectangulaire, le circulaire et l'elliptique à cause de leur simplicité de réalisation. La figure (2) représente les simples éléments rayonnants.

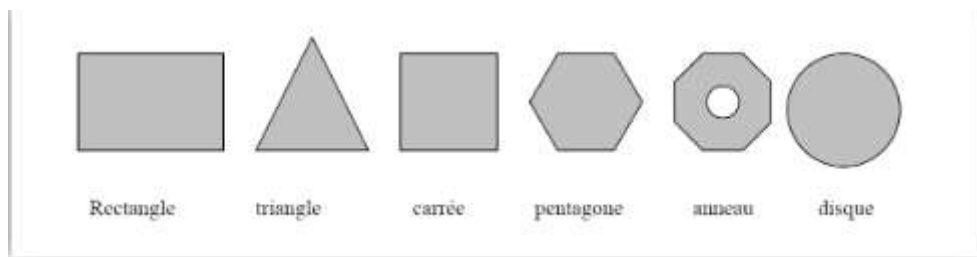


Figure 2 : Principales formes des éléments rayonnants

1.4 Les caractéristiques des antennes imprimées

Les performances de l'antenne peuvent être traduites à partir d'un certain nombre de paramètres. Nous définirons les principaux paramètres comme suit [1] :

1.4.1 La directivité

La directivité $D(\theta, \varphi)$ est le rapport entre la puissance rayonnée par une antenne dans une direction donnée $P(\theta, \varphi)$ et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope. Elle s'exprime par [10] :

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad (I.1)$$

Où : $P(\theta, \varphi)$ est la puissance rayonnée par une antenne, et (P_r) est la puissance totale rayonnée

La directivité d'une antenne peut être facilement estimée à partir du diagramme de rayonnement de l'antenne. On peut dire qu'une antenne plus directive quand l'antenne admet une faible

ouverture de rayonnement, et qu'une antenne faiblement directive admet une large ouverture de rayonnement [1].

1.4.2 Le gain

Le gain d'une antenne est un paramètre similaire de la directivité. Le gain d'une antenne dans une direction donnée (θ, φ) est le rapport entre la puissance $P(\theta, \varphi)$ qu'elle rayonne par unité d'angle solide dans cette direction et de celle d'une antenne isotrope, il est exprimé par [8] :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_a} \quad (1.2)$$

Ou : G : Le gain de l'antenne- $P(\theta, \varphi)$: la puissance rayonnée par une antenne - P_a : Puissance d'entrée.

Le gain est le résultat de deux effets : la directivité et la perte. Si G est le gain, alors :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad (1.3)$$

1.4.3 Rendement de l'antenne

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance totale rayonnée et la puissance fournie à l'antenne, soit :

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} = \frac{4\pi \frac{P_a}{P_a}}{4\pi \frac{P_r}{P_r}} = \frac{P_r}{P_a} \quad (1.4)$$

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne [8].

1.4.4 Coefficient de réflexion.

Le coefficient de réflexion est le rapport de la puissance du signal réfléchi et celle du signal incident, Généralement ce coefficient Γ est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne Z_e et l'impédance caractéristique Z_c de la ligne de transmission par la relation [1]:

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} = \frac{\text{onde réfléchie}}{\text{onde incidente}} \quad (1.5)$$

On peut le représenter sous forme de paramètre S en dB :

$$S_{11} \text{ (dB)} = 20 \log \left| \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \right| \quad (1.6)$$

Z_e : Impédance d'entrée de l'antenne

Z_c: Impédance caractéristique de la ligne qui alimente l'antenne ($Z_c=50$) .

Une antenne résonne si la partie imaginaire de son impédance d'entrée est nulle (Pratiquement on prend le minimum de la partie imaginaire),

$$\Gamma \rightarrow 0 \Rightarrow \text{Re}\{Z_e\} \approx Z_c \quad (1.7)$$

Lorsque l'adaptation n'est pas parfaite, la partie de l'onde réfléchie se superpose à l'onde incidente pour ne former qu'une seule onde, appelée onde stationnaire, dans ce cas-là on parle de ROS (Rapport d'Onde Stationnaire), il est lié au coefficient de réflexion Γ par la relation :

$$ROS = \frac{1-|\Gamma|}{1+|\Gamma|} \quad (1.8)$$

1.4.5 Impédance d'entrée de l'antenne

L'impédance d'entrée de l'antenne est l'impédance présentée par une antenne à ses bornes, est donnée par la formule, elle est représentée par : $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$

La résistance d'entrée R_{in} représente un terme de dissipation, est constituée de deux composants, la résistance de rayonnement liée à la puissance rayonnée et la résistance de perte liée à la puissance perdue par effet Joule. La partie imaginaire ou la réactance X_{in} de l'impédance d'entrée est liée à la puissance réactive stockée au voisinage de l'antenne.

Le transfert maximal de puissance de l'alimentation vers l'antenne est assuré lorsque l'impédance de l'alimentation est égale à l'impédance conjuguée de l'antenne et comme (S_{11}) est fonction de la fréquence alors Z_{in} varie aussi avec la fréquence. Cette impédance d'entrée en fonction de S_{11} est donnée par la relation [7] :

$$z_{in} = Z_c \frac{(1+S_{11})}{(1-S_{11})} \quad (1.9)$$

1.4.6 Bande passante

La bande passante d'une antenne définit le domaine de fréquences dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises. La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situé entre une valeur minimale f_1 et une valeur maximale f_2 [7].

La bande passante est définie par la formule suivante :

$$BP = \frac{f_s - f_i}{f_c} \quad (I.10)$$

f_s : La fréquence maximale.

f_i : La fréquence minimale.

f_c : La fréquence centrale d'utilisation pour laquelle l'antenne est conçue.

Pour connaître la largeur de bande d'une antenne relativement au rayonnement, on trace le paramètre S_{11} coefficient de réflexion en fonction de la fréquence. On admet généralement que si ce paramètre est inférieur à -10 dB, la puissance de rayonnement est suffisante [8].

1.5 Techniques d'alimentation

Lors de la conception des antennes imprimées, la technique de l'alimentation est très importante pour une bonne performance de l'antenne. Elle peut modifier leurs caractéristiques de rayonnement. On distingue plusieurs méthodes d'alimentation qui sont regroupés en deux catégories : Alimentation par contact (par sonde coaxial, par ligne micro-ruban, ..) et les alimentations par proximité (ligne micro-ruban en sandwich, par fente, par ligne micro-ruban en circuit ouvert...). Les plus communément utilisées sont l'alimentation par ligne microruban, par sonde coaxiale, par couplage de proximité ou par ouverture [4-10].

1.5.1 Alimentation par ligne micro-ruban

Dans ce type d'alimentation la ligne microstrip est reliée au patch pour lui amener de l'énergie, où le point de jonction est sur l'axe de symétrie du patch ou décalé par rapport à cet axe de symétrie si cela permet une meilleure adaptation d'impédance. Cette technique est facile à réaliser, elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite des lignes. La figure (3) représente ce type d'alimentation [3].

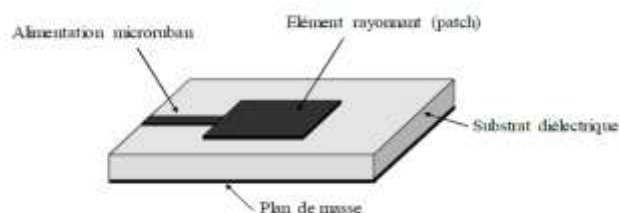


Figure 3:Alimentation par ligne micro-ruban

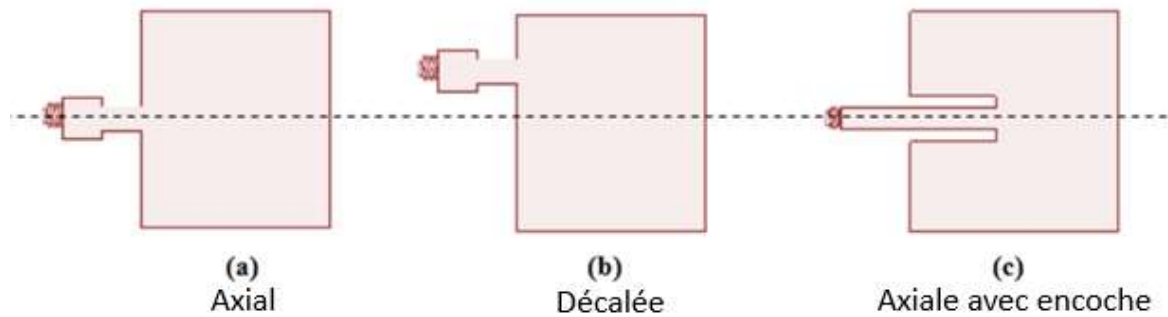


Figure 4: Différents types d'alimentation par ligne Micro ruban

Pour atteindre la grande performance d'antenne, un diélectrique épais qui a un constant diélectrique bas est nécessaire. Cela fournira une efficacité plus élevée, une plus grande bande passante et une plus grande radiation.

1.5.2 Alimentation par sonde coaxiale

Dans cette méthode d'alimentation, une ligne coaxiale traverse le niveau du plan de masse et le diélectrique. Le contact entre le conducteur central et l'élément rayonnant se fait donc en un point situé sur l'axe de symétrie, approximativement près du bord. Il est directement soudé à l'élément rayonnant en un point où l'adaptation est obtenue, alors que le conducteur extérieur est relié au plan de masse comme illustré dans la figure(5) [2-5].

Elle est simple à réaliser. Cependant, cette technique d'alimentation pose des problèmes technologiques du fait du percement du substrat et des soudures sur chaque élément rayonnant, surtout pour les grands réseaux [2-5].

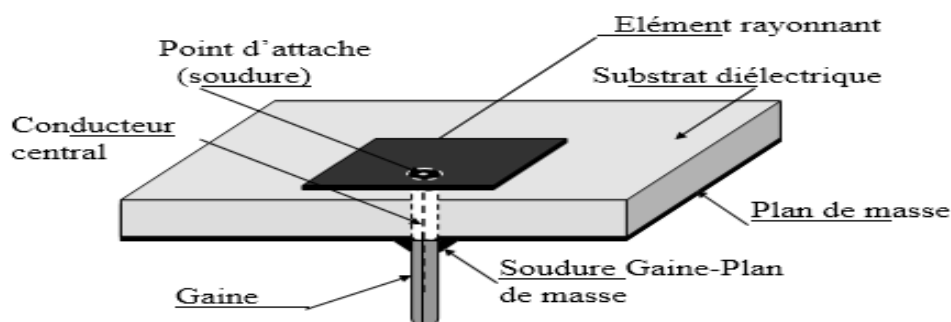


Figure 5: Antenne imprimée alimentée par sonde coaxiale

1.5.3 Alimentation par ouverture (par fente)

Dans ce type d'alimentation l'antenne est constituée par deux substrats séparés par un plan de masse, le patch est situé sur la surface libre du substrat supérieur qui caractérisé par une faible permittivité diélectrique et une épaisseur relativement épais, tandis que la ligne d'alimentation se trouve sur la face libre du substrat inférieur dont sa permittivité est forte alors que son diélectrique est fin. Cette configuration permet d'optimiser indépendamment la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant. Le plan de masse limite l'interférence du rayonnement parasite sur le diagramme de rayonnement et offre ainsi une plus grande pureté de polarisation [2]. Ce type d'alimentation est présenté dans la figure (6).

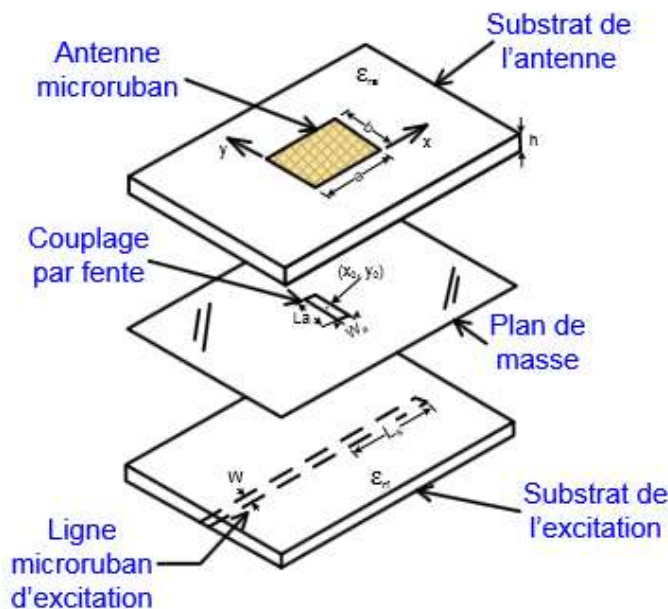


Figure 6: Antenne imprimée alimentée par fente

1.5.4 Alimentation par proximité

L'antenne est constituée de deux substrats diélectriques entre lesquels est située la ligne d'alimentation. L'élément rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur figure (8). L'excitation se fait par couplage électromagnétique. Cette technique permet d'améliorer la bande passante mais elle est difficile à réaliser [2-5].

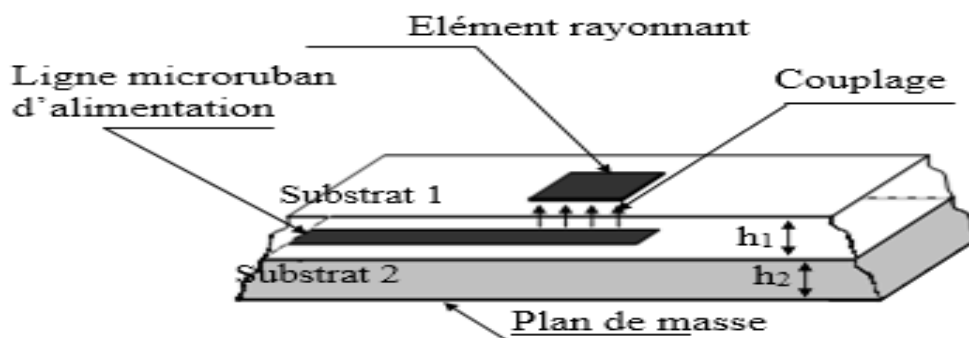


Figure 7: Antenne imprimée alimentée par proximité.

1.6 Avantages et limitations des antennes patch

Les antennes micro-rubans ont de nombreux avantages comparés aux antennes microondes classiques et par conséquent plusieurs applications dans la large gamme de fréquences allant de 100 MHz à 50 GHz sont réalisables. Parmi ces avantages, on cite [4-5]:

- ❖ Faible poids, masse et épaisseur
- ❖ Encombrement réduit
- ❖ conformations possibles
- ❖ Facilité de fabrication
- ❖ Rayonnement en polarisation linéaire et circulaire possibles
- ❖ Faible coût de fabrication
- ❖ Antennes multi bandes, multi polarisations
- ❖ Compatibilité avec les circuits hybrides
- ❖ Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne

Cependant, ces antennes ont aussi quelques inconvénients tels que :

- ❖ Bande passante étroite, souvent associée avec les problèmes de tolérances de fabrication
- ❖ Faible rendement.
- ❖ Facteur de qualité Q élevé.
- ❖ Généralement faible gain.
- ❖ Faible pureté de polarisation.
- ❖ Supportent uniquement des faibles puissances (<100 W)
- ❖ Pertes de rayonnement par ondes de surfaces dans le substrat diélectrique

1.7 Les applications des antennes microbandes

Vu l'explosion technologique dans la télécommunication et les recherches scientifiques continues concernant les antennes imprimées, et vu les exigences multiples dans le domaine de communication, l'utilisation des antennes microondes classiques devient incapable de répondre à ces exigences. Pour cette raison, les antennes microbandes remplacent les antennes classiques dans la plupart des applications. Parmi ces applications on cite [6]:

- ❖ Les télécommunications par satellites et spatiale.
- ❖ La commande et contrôle.
- ❖ La télémétrie par missile et la télésurveillance.
- ❖ Les équipements portatifs.
- ❖ Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- ❖ Les antennes d'émission utilisées en médecine.
- ❖ Les récepteurs satellite de navigation.
- ❖ Les radars,

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue globale sur les antennes imprimées, la géométrie, leur application, les techniques d'alimentation, les différentes caractéristiques, et montré le rôle et l'évolution technologique des patches, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Dans le chapitre suivant on va étudier les réseaux d'antennes imprimées et leurs caractéristiques.

Chapitre **2**

Réseaux d'Antennes
Imprimées

2 Chapitre II : Réseaux d'Antennes Imprimées

2.1 Introduction

Pour améliorer les performances des antennes imprimées, on les associe en forme de réseau, car l'utilisation d'un seul élément est insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposées par une application.

Le réseau d'antenne est un ensemble d'antennes radioélectriques espacées d'une distance «d» appelée «pas de réseau» et alimentées de façon synchrone par des dispositifs d'excitation permet de commander les amplitudes et les phases, le champ électromagnétique produit par ce réseau est la somme vectorielle des champs produits par chacun des éléments.

L'avantage principal de l'assemblage de plusieurs antennes permet de compenser les limitations des caractéristiques d'une seule antenne, ainsi que l'influence de nombreux facteurs tels que l'espacement entre les éléments, la taille du plan de masse ainsi que l'alimentation électrique des éléments, afin d'avoir un gain plus élevé et d'obtenir le diagramme de rayonnement souhaité [5].

2.2 Type de réseaux d'Antennes imprimées

Le couplage entre les antennes élémentaires est un point délicat car ce couplage modifie légèrement les caractéristiques de rayonnement et d'adaptation, par conséquent, afin de concevoir et de réaliser un réseau d'antennes de bonne performance, on prend en considération plusieurs facteurs tel-que le gain, le diagramme de rayonnement, la taille maximale de l'antenne, le nombre d'éléments rayonnants nécessaires, la distance entre deux éléments rayonnants. Les antennes réseaux peuvent avoir différentes configurations géométriques [7]:

2.2.1 Réseaux linéaires

C'est un ensemble de N éléments rayonnants déposées suivant une ligne droite le long d'un axe (x, y ou z) comme illustré dans la figure (8) et séparés par une distance identique et excités par un même système d'alimentation.[6]. L'amplitude de l'alimentation de chacun des éléments est supposée identique mais chacun des éléments a un déphasage progressif qui dépend de la distance entre les éléments. Le champ électromagnétique « E » total de ce réseau

linéaire est la somme de champ de chacun de ses éléments est donné par l'équation (2.1) suivante :

$$E = E_0 (I_0 + I_1 e^{jkdcos\theta} + K + I_{N-1} e^{JK(N-1)dcos\theta}) \quad (2.1)$$

$$E = E_0 \sum_{n=0}^{N-1} (I_n) e^{jnkdcos\theta} \quad (2.2)$$

Où :

E_0 : le champ rayonné par l'antenne de base située à l'origine et alimentée par 1A et

$I_n = a_n e^{jn\alpha}$. α et a_n sont les coefficients de source.

$$E = E_0 \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn(kdcos\theta + \alpha)} \quad (2.3)$$

$$E = E_0 \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} \quad (2.4)$$

$\psi = kdcos\theta + \alpha$ est défini comme l'angle électrique où d est la distance entre les antennes adjacentes, θ est l'angle d'élévation, α est la phase progressive de l'alimentation et k est le nombre d'onde donné par $k = 2\pi/\lambda$.

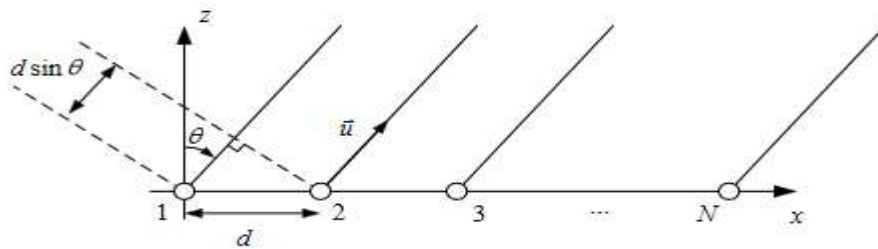


Figure 8: Géométrie d'un réseau linéaire

- **Facteur de réseau**

La représentation de l'interférence entre les rayonnements de N éléments du réseau est appelée le facteur de réseau, ce dernier dépend du nombre et de la forme d'éléments d'antenne, de la fréquence de fonctionnement, l'excitation de chaque élément, ainsi que la distance entre les éléments.

Le diagramme final du réseau est la multiplication du facteur de réseau avec le diagramme d'un élément unique rayonnant individuellement. Le facteur réseau est obtenu par la relation suivante : $FR = (FRI) * (\text{Champ d'un élément d'antenne})$ [5].

2.2.2 Réseaux planaires

Un réseau planaire est la généralisation au plan de réseau linéaire, il peut prendre une forme de maillage rectangulaire, triangulaire ou circulaire [6]. Comme illustré dans la Figure (9).

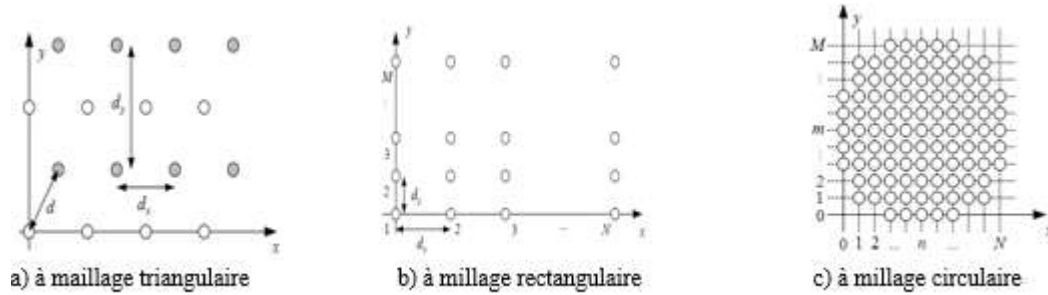


Figure 9: Géométrie d'un réseau planaire

2.2.3 Réseaux circulaires

C'est un réseau dont les éléments rayonnants sont répartis autour d'un cercle de rayon « a » tel qu'illustré dans la figure (10) [6].

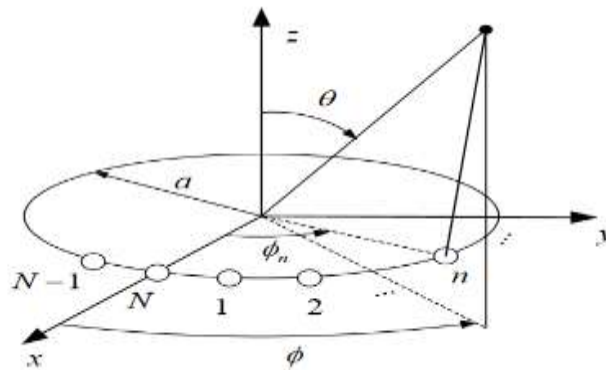


Figure 10 : Géométrie d'un réseau circulaire

2.2.4 Réseaux cylindriques

Le réseau cylindrique est un assemblage de plusieurs réseaux circulaires selon un axe (x, y ou z) comme l'illustre le schéma de la Figure(11) [9].

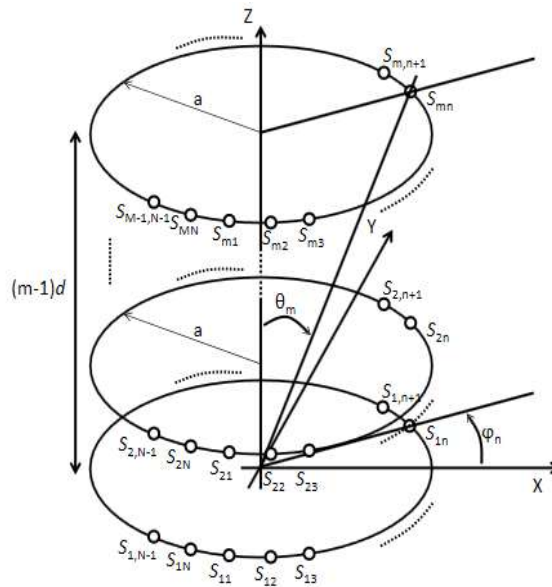


Figure 11 : Géométrie d'un réseau cylindrique de M anneaux de rayon a espacés d'une distance d suivant l'axe z et composés de N éléments

2.2.5 Réseaux coniques

C'est une autre généralisation de réseau circulaire dont les anneaux de N éléments ont des rayons différents, espacés avec la même distance « d ». Ils ont quasiment les propriétés que pour les réseaux cylindriques. La figure (12) montre la géométrie d'un réseau conique [9].

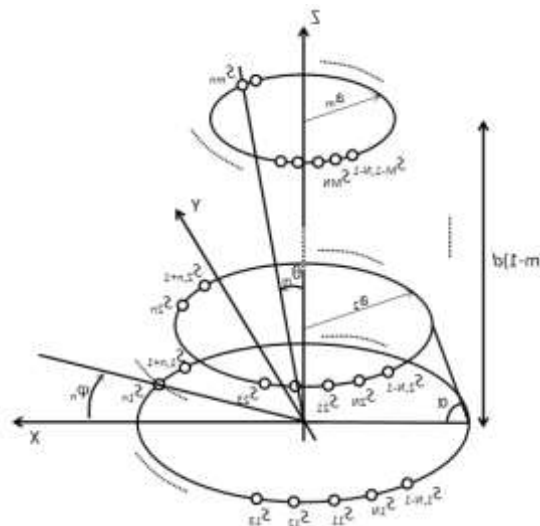


Figure 12 : Géométrie d'un réseau conique de M anneaux espacés d'une distance d et composés de N éléments

2.3 Alimentation des réseaux d'antennes

L'objectif principal du réseau d'alimentation de l'antenne est d'assurer une excitation correcte en amplitude et en phase de tous les éléments du réseau.

2.3.1 Les dispositifs utilisés dans les réseaux

Puisque les éléments de réseau sont excités en amplitude et en phase, l'utilisation des déphaseurs et des diviseurs ou combineurs de puissance sont la base de l'alimentation du réseau d'antennes [7].

2.3.1.1 Les Déphaseurs

On distingue deux types de déphaseurs :

2.3.1.1.1 Les déphaseurs à lignes

Sont constitués d'un ensemble de lignes de longueurs différentes. Des commutateurs permettent d'insérer l'impédance de chaque tronçon de ligne selon la phase désirée.

2.3.1.1.2 Les déphaseurs à ferrites

Sont constitués d'un barreau de ferrite autour duquel est enroulé un fil qui sert à fixer la valeur du champ magnétique du barreau. Le champ magnétique est varié l'intensité d'excitation. Les déphaseurs sont placés en parallèle ou en série comme présentés dans les figures (13) et (14).

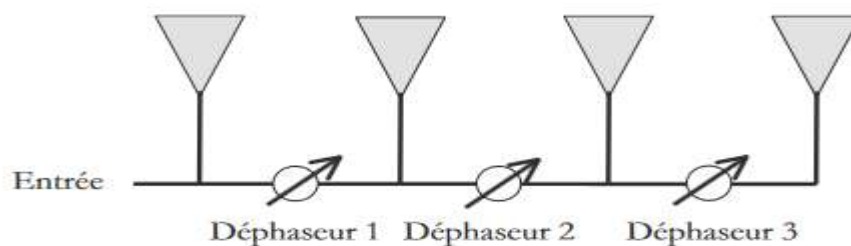


Figure 13: Déphaseurs en série.

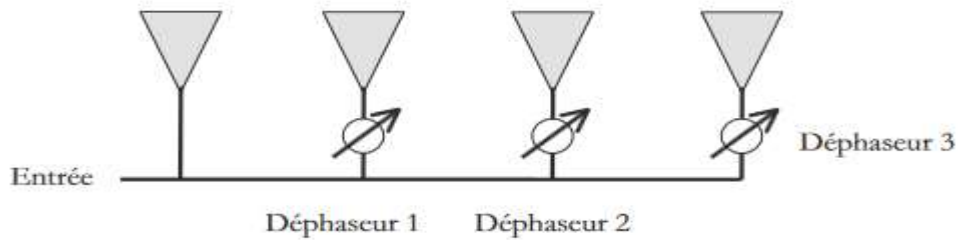


Figure 14: Déphaseurs en parallèle

2.3.1.2 Les Diviseurs ou combineurs

C'est un dispositif à trois accès, l'un à l'entrée et deux ou plusieurs accès à la sortie qui peuvent être isolés ou non. Chaque sortie d'un diviseur est considérée comme une entrée d'un autre diviseur, les combinaisons sont variés selon le choix d'alimentation série ou parallèle et le type d'élément rayonnant. Parmi les diviseurs utiliser en distingue [7].

2.3.1.2.1 La jonction T

C'est un modèle facile à réaliser mais l'absence de l'isolation entre les deux ports de sortie peut engendrer un couplage entre deux éléments adjacents qui influe sur le diagramme de rayonnement du réseau, elle peut être compensée par la suppression d'une section triangulaire de la ligne comme illustré dans la figure (15) [5].



Figure 15: La jonction T

2.3.1.2.2 Diviseur de Wilkinson

Afin que l'alimentation soit totalement adaptée est préférée d'utiliser d'un diviseur de type Wilkinson, il possède de propriétés spéciales telle que : Réseau à faible perte d'insertion et d'isolation, isolation élevée entre les ports de sortie assurée par une résistance R , mais l'inconvénient de ce circuit est d'apparaître au niveau de la soudure des deux bords de la résistance. Le diviseur Wilkinson est présenté dans la figure (16) [5].

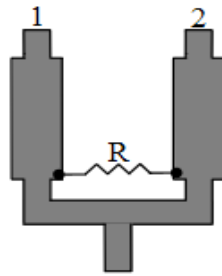


Figure 16: Diviseur Wilkinson

2.3.1.2.3 Le coupleur par proximité

C'est un coupleur directif, une certaine partie de la puissance incidente est couplée hors du système, l'alimentation est réalisée par couplage à travers une ouverture dans le plan de masse du réseau d'alimentation. Ce couplage résulte des pertes [5].

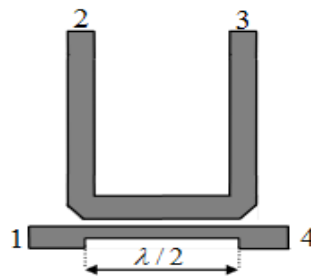


Figure 17: coupleur par proximité

2.3.1.2.4 L'anneau hybride

Les signaux à la sortie de l'anneau hybride ont la même amplitude et déphasés l'un par rapport à l'autre par 0° et 180° , leur avantage est résidé dans ses performances qui restent satisfaisantes pour les hautes fréquences. L'anneau hybride illustré dans la figure (18) [5].

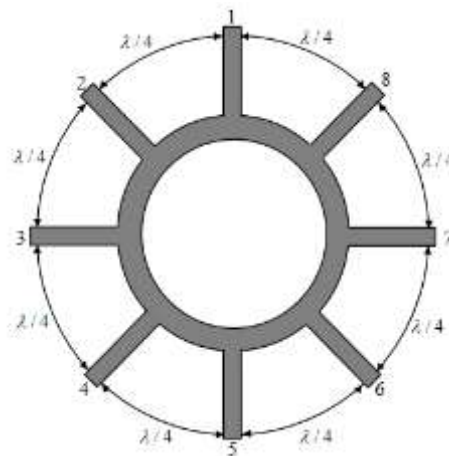


Figure 18: L'anneau hybride

2.4 Techniques d'alimentation d'un réseau d'antennes :

Le choix de réseau d'alimentation est dépend de plusieurs paramètres comme le gain, les pertes, la bande passante, l'angle souhaité la polarisation, le niveau de réseau et lobe latérale, la capacité de réseau d'alimentation et la polarisation [1]. On distingue plusieurs dispositions pour distribuer la puissance d'entrée de la source au réseau, les plus courants de ces réseaux sont :

2.4.1 Alimentation série

Les éléments rayonnants sont disposés linéairement et sont reliés les uns des autres par des tronçons de ligne micro-ruban, Chaque ligne présente à son entrée un déphaseur. Ce type d'alimentation est présenté dans la figure (19) [1.3].



Figure 19:Alimentation en série

2.4.2 Alimentation parallèle

Cette alimentation consiste à alimenter N éléments rayonnants par (N-1) diviseurs de puissance, cette puissance est répartie également à chaque liaison. Dans ce type d'alimentation on a plusieurs pertes par rayonnement à cause de la discontinuité de la configuration en parallèle. Ce type d'alimentation est présenté dans la figure (20) [1.3]

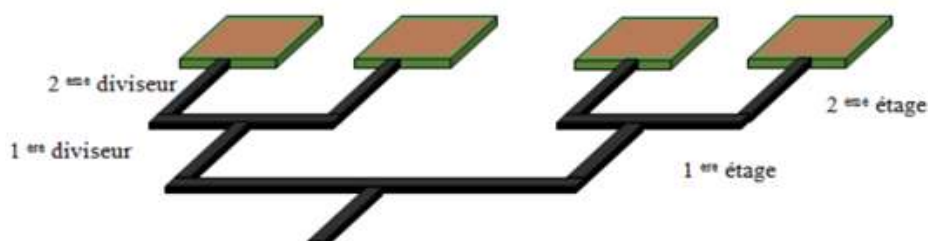


Figure 20:Alimentation en parallèle

2.5 Couplage dans le plan E et le plan H

Le couplage entre les antennes élémentaires est un point délicat car ce couplage modifie légèrement les caractéristiques de rayonnement et d'adaptation. En particulier la bande passante du réseau est un peu plus large que celle de l'antenne élémentaire du fait des couplages. Les diagrammes de rayonnement sont généralement représentés dans deux plans orthogonaux "plan E et plan H", par rapport à la direction principale [7].

- **Plan E** : On appelle le plan E le plan formé par la direction de propagation et par la direction du champ électrique, c'est le lieu des points de l'espace où le champ électrique rayonné est contenu dans ce plan.
- **Plan H** : On appelle le plan H le plan formé par la direction de propagation et par la direction du champ magnétique, c'est le lieu des points de l'espace où le champ magnétique rayonné est contenu dans ce plan. On distingue deux types de couplage.

2.5.1 Couplage horizontal (couplage dans le plan E)

C'est le couplage entre deux éléments espacés d'une distance « d_x », le long de la direction de l'axe (x), toutes les largeurs des patchs (dans la direction de y) sont égales.

2.5.2 Couplage vertical (couplage dans le plan H)

C'est le couplage entre deux éléments, le long de la direction de l'axe (y) espacés d'une distance « d_y », les longueurs des patchs (dans la direction de x) sont égales.

2.6 Domaine d'application

Pour assurer une communication entre deux points distants, des réseaux d'antennes sont utilisés dans plusieurs domaines d'applications, tel que [4.5] :

- ❖ Satellites : Télévision directe domestique ou embarquée sur véhicules, Réseaux à faisceaux commutés à couverture reconfigurable, Systèmes de radiolocalisation par GPS, Galileo.
- ❖ Aéronautique :- Communication, navigation, altimètres, systèmes d'atterrissages, et radars de poursuite mono-pulse ou synchrone.
- ❖ Télécommunication : Téléphonie mobile (terminaux portatifs GSM, DCS, PCS, antennes sur stations de bases.

2.7 Avantages et inconvénients des réseaux d'antenne

Parmi les avantages de l'association des antennes en réseaux en site ce qui suit [2] :

- ❖ une plus forte directivité que l'antenne élémentaire
- ❖ une augmentation du gain par rapport à l'antenne élémentaire
- ❖ une flexibilité du mode d'alimentation avec la possibilité de faire varier son amplitude et sa phase pour obtenir un réseau d'antennes reconfigurables
- ❖ une possibilité de choisir le déphasage régulier entre les éléments pour fixer l'orientation du faisceau

Tandis que les limitations suivantes sont soulignées [4] :

- ❖ La bande passante d'un réseau d'antenne est supérieur à celle d'une antenne élémentaire
- ❖ Complexité de réalisation.
- ❖ Les niveaux de gain obtenus avec des réseaux, s'approchent des 30 dBi à cause des pertes (Les couplages).

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les réseaux d'antennes imprimées, en mettant l'accent sur leurs principaux types, après nous avons vu leurs techniques et types d'alimentation, leurs avantages et inconvénients ainsi leurs domaines d'application.

Dans le chapitre suivant nous allons voir la conception et la simulation d'une antenne imprimée à un seul élément alimentée par une sonde coaxiale ainsi la mettre en réseau.

Chapitre 3

*Résultats et discussion de
la simulation*

3 Chapitre III : Résultats et discussion

3.1 Introduction

La conception des composants radio fréquence (RF) à l'aide d'un logiciel approprié, c'est une étape importante qui doit se faire avant la phase de leur fabrication. Elle permet de gagner le temps et minimiser le coût des essais de fabrication (et surtout dans l'optimisation de structure aux paramètres désirés). Elle permet également de voir les effets des paramètres géométriques électriques des différents matériaux constituant le composant RF. Parmi ces logiciels on cite le simulateur électromagnétique HFSS (High Frequency Structure Simulation).

Le HFSS est un logiciel de calcul et de simulation des ondes électromagnétiques dans des structures volumiques. Il permet de concevoir les guides d'ondes, les filtres, les câbles coaxiaux et divers types d'antennes. La simulation accomplit le calcul de plusieurs paramètres comme le coefficient de réflexion, les fréquences de résonances, les champs électrique et magnétique et la visualisation du diagramme de rayonnement en 3D... [6].

Nous intéressons dans ce chapitre à la conception et la simulation des réseaux linéaires d'antennes imprimés alimentés en parallèle par des sondes coaxiales sous le logiciel HFSS. Tout d'abord nous avons simulé une antenne patch rectangulaire et après nous l'avons met en réseaux à deux éléments (2x1), à trois éléments (3x1) et enfin à six éléments (3x2). Et enfin on simule une antenne réseaux à 9 éléments de l'article [11].

3.2 Description de la structure d'antenne à simuler

La structure de l'antenne à simuler est présentée dans la figure (21), Elle est constituée d'un patch rectangulaire imprimé sur la face supérieure d'un substrat de type Flame-Resistant 4 (FR4) et le plan de masse est imprimé sur la face inférieure du substrat. L'antenne est destinée à fonctionner à une fréquence de 5.5025 GHz.

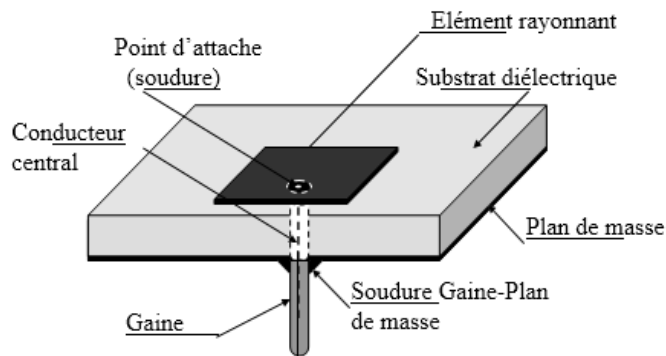


Figure 21: Configuration de l'antenne utilisée

Les dimensions de patch, sont calculées en fonction des caractéristiques du substrat (permittivité relatif « ϵ_r », l'épaisseur « h ») et le choix de la fréquence de résonance. Nous allons concevoir des réseaux à 1, 2, 3 et 6 éléments rayonnants alimentés en parallèle par une sonde coaxiale d'impédance caractéristique 50Ω .

Les paramètres de l'antenne sont regroupés dans le tableau suivant :

Dimensions paramétriques	Valeur (en mm)
Fréquence de fonctionnement	5.5025 GHz
Permittivité relative de substrat ϵ_r	4.4
Largueur substrat (W_s)	100 mm
Longueur substrat (L_s)	90mm
Hauteur substrat, (h)	3.2mm
Longueur patch, (L_p)	5mm
Largueur patch, (W_p)	4mm
Longueur de sonde coaxiale	5mm
Rayon de sonde coaxiale	1mm
Rayon de conducteur centrale du coax	0.5mm

Tableau 1: Dimension d'antenne patch rectangulaire

3.3 Simulation d'une antenne à un seul élément

Dans cette section nous utilisons les dimensions citées précédemment pour concevoir une antenne d'un seul élément comme indiquée dans la figure (22) et les résultats de la simulation sont présentés dans les figures ci-dessous.

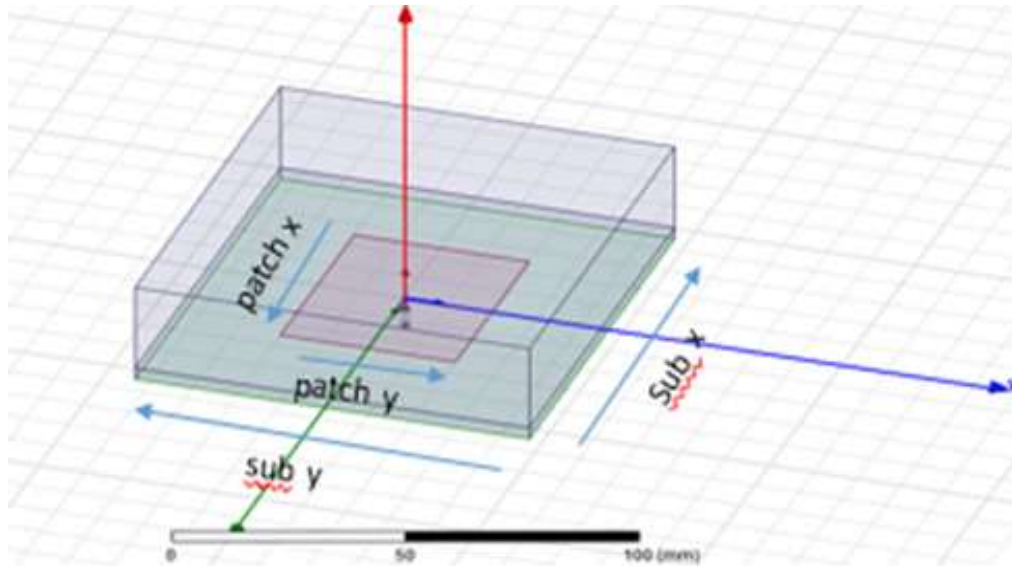


Figure 22: Structure de l'antenne à simuler

3.3.1 Coefficient de réflexion et Rapport d'onde stationnaire

D'après la figure (23) qui représente la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence, on remarque l'existence de trois fréquences de résonance qui sont :

- ❖ $f_1 = 5.5410GHz \Rightarrow S_{11} = -36.2709 dB$ et la bande de fréquence comprise entre (5.4499 GHz et 5.6286 GHz) ou $BP = 178.7MHz$
- ❖ $f_2 = 3.3829GHz \Rightarrow S_{11} = -14.5096 dB$ avec une bande de fréquence comprise entre (3.3093GHz et 3.4600GHz) ou $BP = 150.7MHz$
- ❖ $f_3 = 2.8258GHz \Rightarrow S_{11} = -17.1675$ avec une bande de fréquence comprise entre (2.7628GHz et 2.8889GHz) ou $BP = 126.1GHz$

D'après les valeurs des fréquences de résonance, on constate que la fréquence (f_1) est la fréquence optimale car la valeur de coefficient correspondante est la plus petite des trois valeurs.

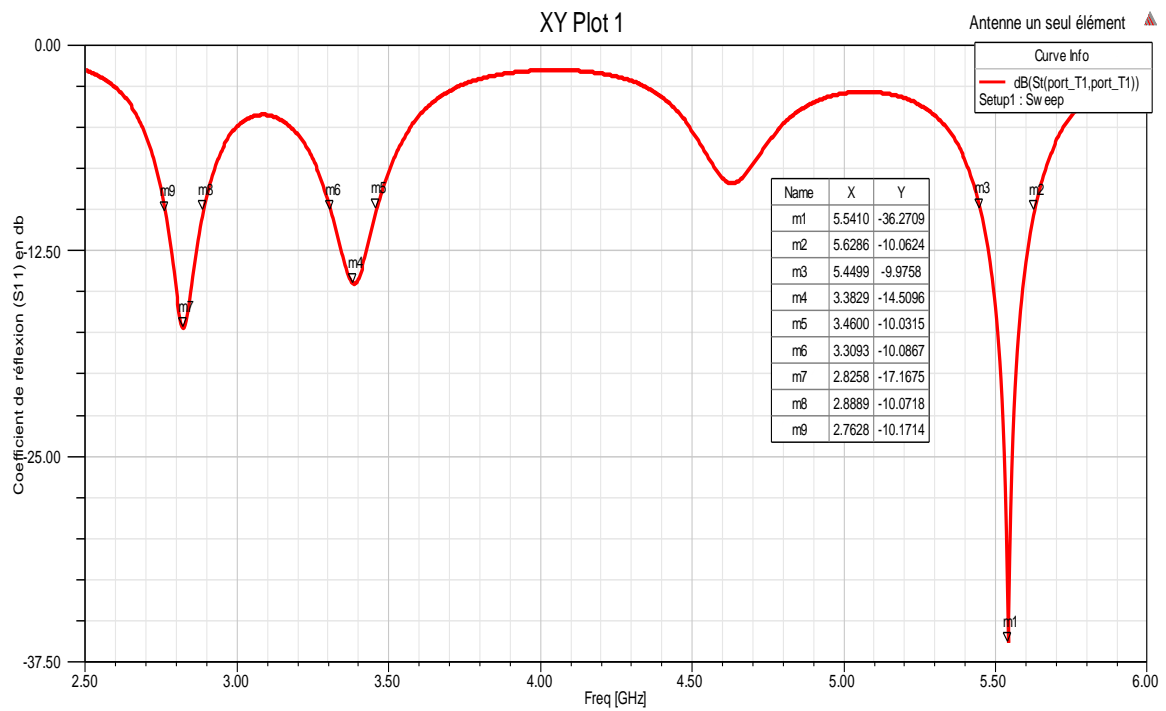


Figure 23: Coefficient de réflexion (S11) en dB d'un réseau d'antenne à un seul élément

La figure (24) représente le rapport d'onde stationnaire (ROS) en fonction de la fréquence, d'après cette figure on remarque que les valeurs de ROS correspondant aux trois fréquences de résonance, sont : 0.2669 (5.5410 GHz), 3.3073 (3.3864 GHz) et 2.437 (2.8188 GHz), la fréquence 5.5410 GHz est la meilleur car la valeur de ROS correspondante est la plus petite et inférieur à 2).

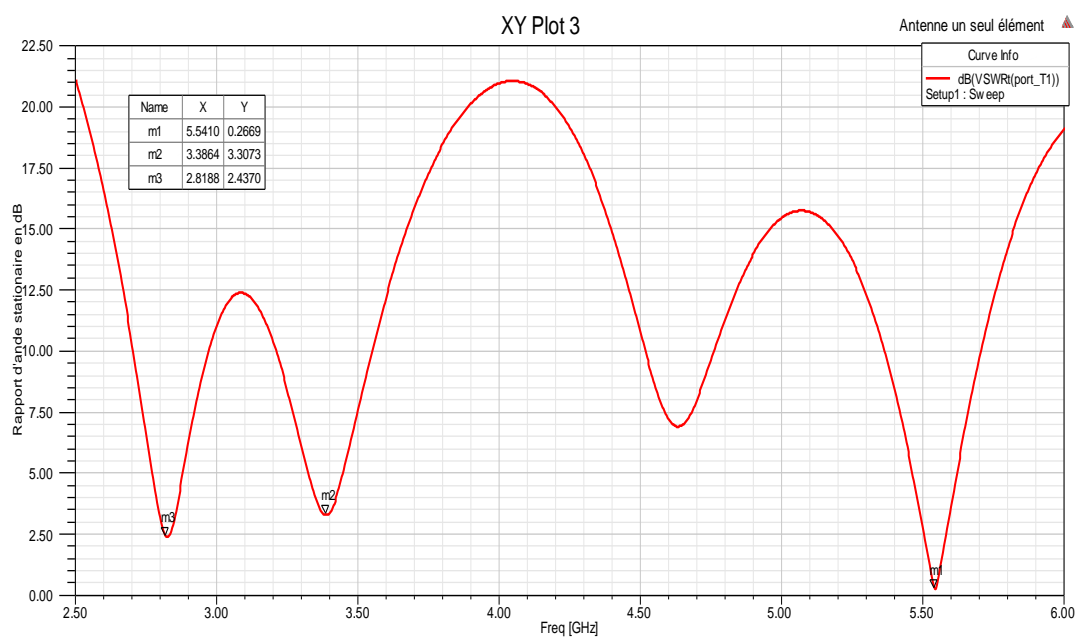


Figure 24: Rapport d'Onde Stationnaire d'un réseau d'antenne à un seul élément

3.3.2 Diagrammes de rayonnement

Le diagramme de rayonnement en gain et en directivité permet d'observer dans quelle direction la densité de flux de puissance se concentre.

Le gain : D'après la figure (25) ci-dessous, qui présente le diagramme en gain, la valeur maximale du gain pour la fréquence 5.5410 GHz est égale à 6.4567 dB.

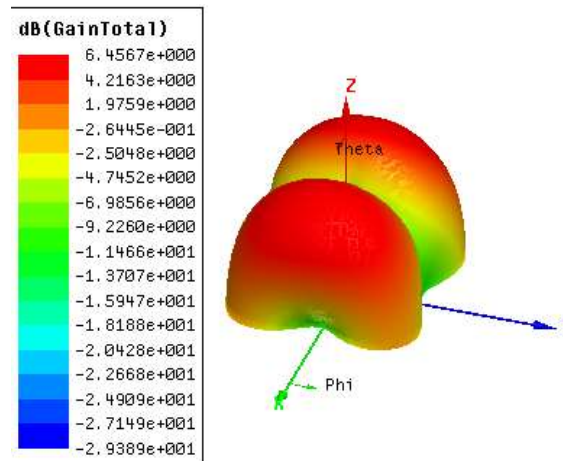


Figure 25: Le Gain d'un réseau d'antenne à un seul élément

La Directivité : d'après la figure (26) ci-dessous, la valeur maximale de la directivité à la fréquence 5.5410 GHz est égale à 8.8521dB.

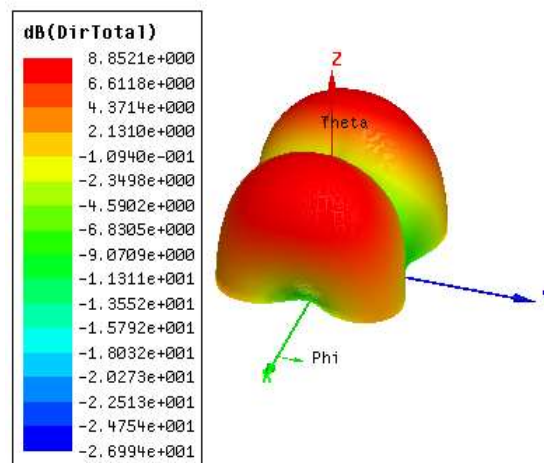


Figure 26: La directivité d'un réseau d'antenne à un seul élément

3.3.3 L'efficacité

Par définition le rendement est le rapport entre la puissance rayonné et la puissance fournie à l'antenne, en d'autre terme c'est le rapport entre le gain (G) et la directivité (D).

$$\eta = G(\theta, \varphi) / D(\theta, \varphi)$$

Dans ce cas-là le gain $G(\theta, \varphi)=6.4567\text{dB}$ et la directivité $D(\theta, \varphi)=8.8521\text{dB}$ donc :

$$\eta = \frac{G}{D} = \frac{6.4567}{8.8521} = 72.93\%$$

3.4 Réseau d'antennes à deux éléments

Dans cette section, on a simulé une antenne réseau à deux cellules qui est illustrée dans la figure (27). L'espacement entre les deux patches est « $d=\lambda/2$ ». La cellule est l'antenne patch de la section précédente (avec les mêmes dimensions).

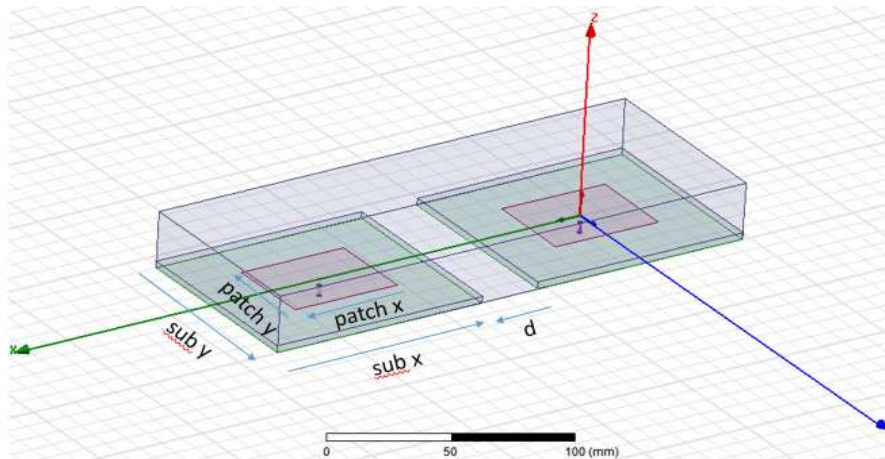


Figure 27: Structure de réseau l'antenne à deux éléments

Les paramètres caractéristiques et les résultats de la simulation sont présentés dans les figures ci-après :

3.4.1 Coefficient de réflexion et Rapport d'onde stationnaire

D'après la figure (28) qui représente la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence, on remarque trois fréquences de résonance qui sont :

- ❖ $f_1 = 5.5445 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -35.7388 \text{ dB}$ et la bande de fréquence comprise entre (5.4499GHz et 5.6321 GHz) ou $BP = 182.2 \text{ MHz}$
- ❖ $f_2 = 3.3864 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -14.5761 \text{ dB}$ avec une bande de fréquence comprise entre (3.3093GHz et 3.4635GHz) ou $BP = 154.2 \text{ MHz}$
- ❖ $f_3 = 2.8293 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -17.5854 \text{ dB}$ avec une bande de fréquence comprise entre (2.8924GHz et 2.7593GHz) ou $BP = 133.1 \text{ MHz}$

D'après les valeurs des fréquences de résonance, on constate que la fréquence ($f_1=5.5445 \text{ GHz}$) est la fréquence optimale car la valeur de coefficient correspondante est la plus petite des trois valeurs.

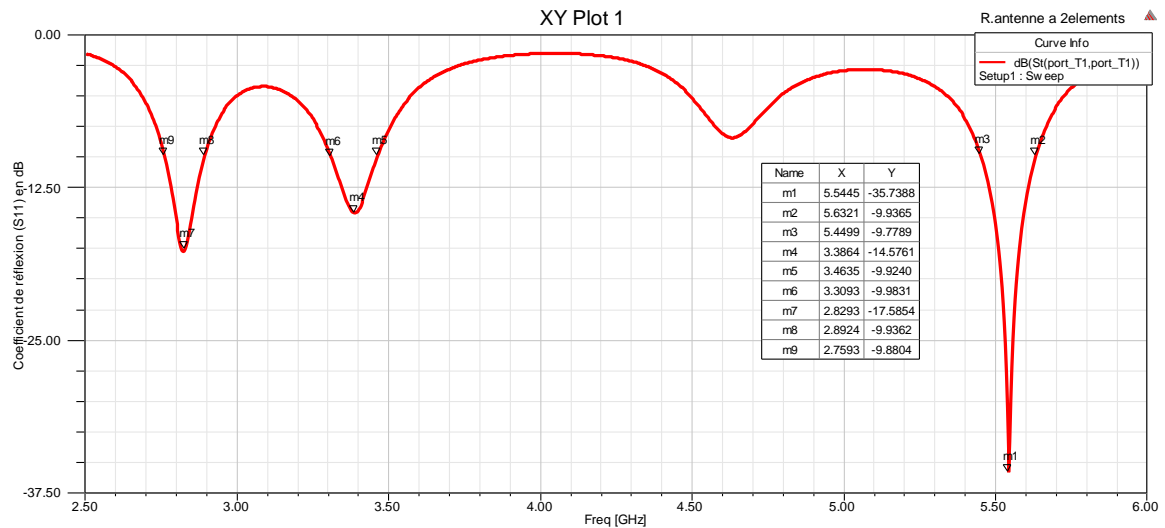


Figure 28: Coefficient de réflexion (S11) en dB d'antenne patch à deux éléments

D'après la figure (29) qui représente le rapport d'onde stationnaire (ROS) en fonction de la fréquence, on remarque trois valeurs de ROS correspondent les trois fréquences de résonance comme suite :

- ❖ Pour $f_1 = 5.5445 \text{ GHz} \Rightarrow \text{ROS} = 1.0332$
- ❖ Pour $f_2 = 3.3864 \text{ GHz} \Rightarrow \text{ROS} = 1.4605$
- ❖ Pour $f_3 = 2.8293 \text{ GHz} \Rightarrow \text{ROS} = 1.2985$

On remarque que toutes les valeurs sont favorables car elles sont supérieures à 2 et ça signifie que le réseau d'antenne est adapté.

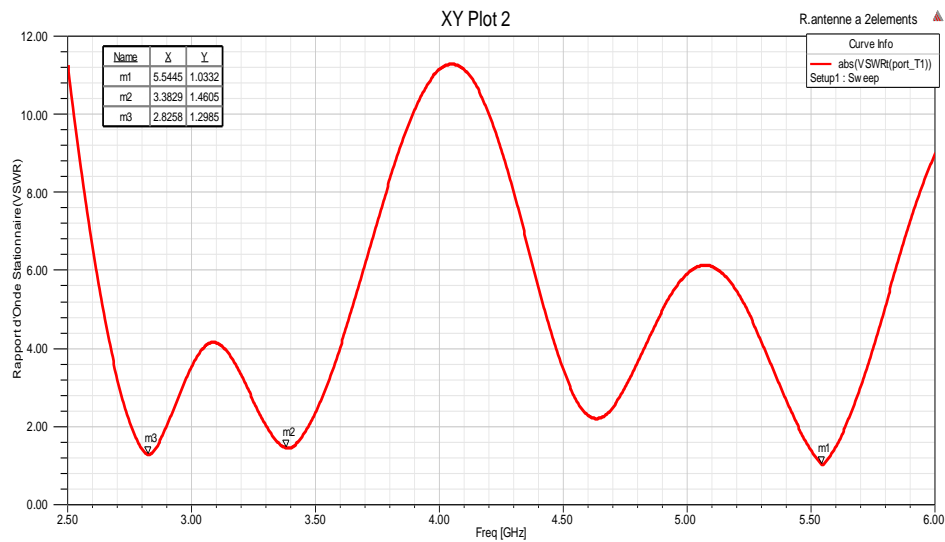


Figure 29: Rapport d'Onde Stationnaire d'antenne à deux éléments

3.4.2 Diagramme de rayonnement

Les diagrammes de rayonnement en gain et en directivité sont présentés dans les figures (30) et (31) respectivement.

Le gain : La valeur maximale du gain à la fréquence 5.5445 GHz d'après la figure (30) ci-dessous est égale à 6.5859 dB.

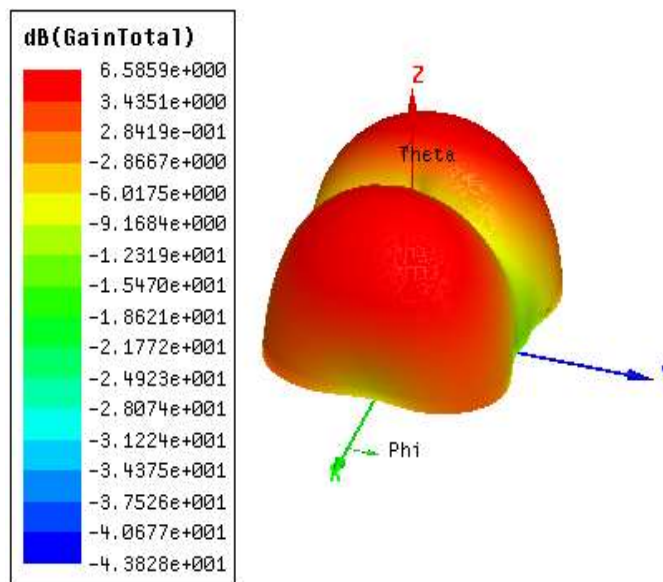


Figure 30: Le Gain d'un réseau d'antenne à deux éléments

La Directivité : La valeur maximale de la directivité à la fréquence 5.5445 GHz d'après la figure (31) ci-dessous est égale à 9.0030dB.

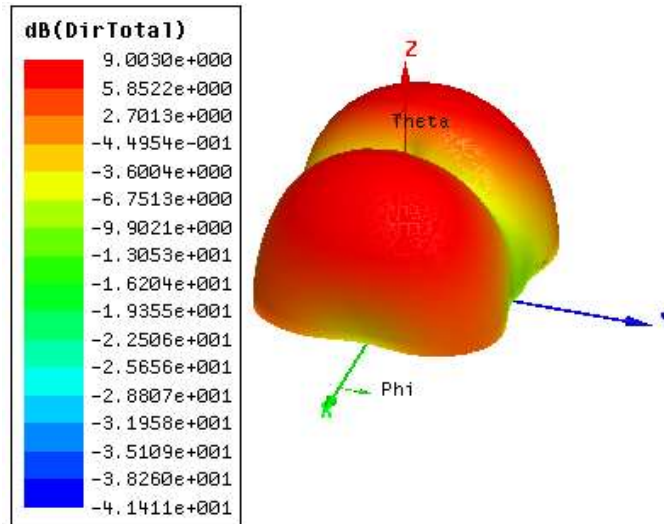


Figure 31: La directivité d'un réseau d'antenne à deux éléments

3.4.3 L'efficacité

L'efficacité de cette antenne réseau est donné par : $\eta = \frac{G}{D} = \frac{6.5859}{9.0030} = 73.26\%$.

3.5 Réseau d'antennes à 3 éléments

Les conditions que le cas précédent mais avec la différence de nombre des cellules qui est trois. Le réseau d'antennes est illustré dans la figure (32)

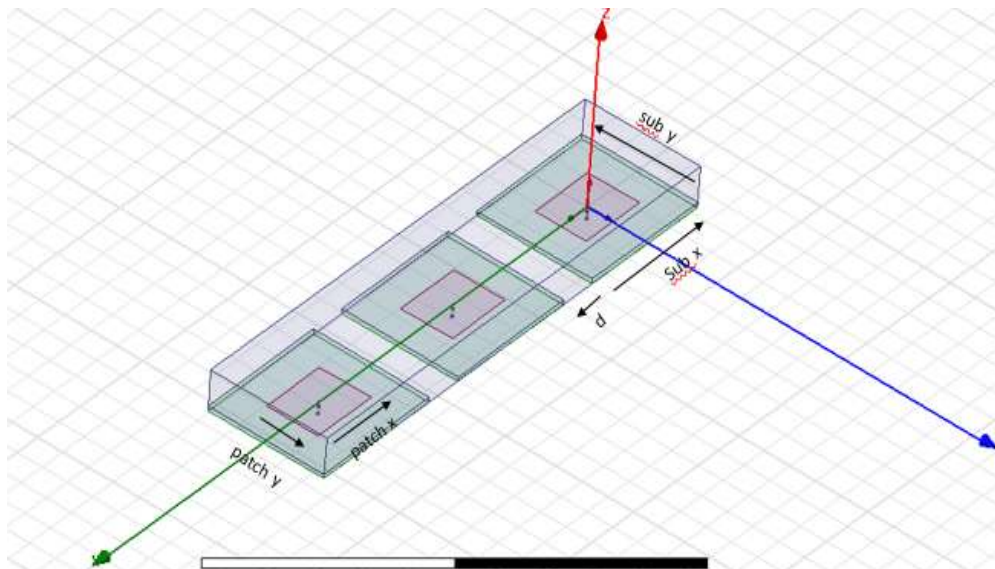


Figure 32: Structure de réseau l'antenne à trois éléments

3.5.1 Coefficient de réflexion et Rapport d'onde stationnaire

D'après la figure (33) qui représente la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence, on remarque trois fréquences de résonance qui sont :

- ❖ $f_1 = 5.5060 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -28.1762 \text{ dB}$ et la bande de fréquence comprise entre (5.5936GHz et 5.4149 GHz) ou $BP = 178.7 \text{ GHz}$
- ❖ $f_2 = 3.3514 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -13.5023 \text{ dB}$ avec une bande de fréquence comprise entre (3.2743GHz et 3.4179GHz) ou $BP = 143.6 \text{ MHz}$
- ❖ $f_3 = 2.8048 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -17.6066 \text{ dB}$ avec une bande de fréquence comprise entre (2.7347GHz et 2.8679GHz) ou $BP = 133.2 \text{ MHz}$

On constate que la fréquence f_1 est la meilleure valeur des trois fréquences pour une bonne adaptation de l'antenne car le coefficient correspondant présente la valeur plus petite des valeurs.

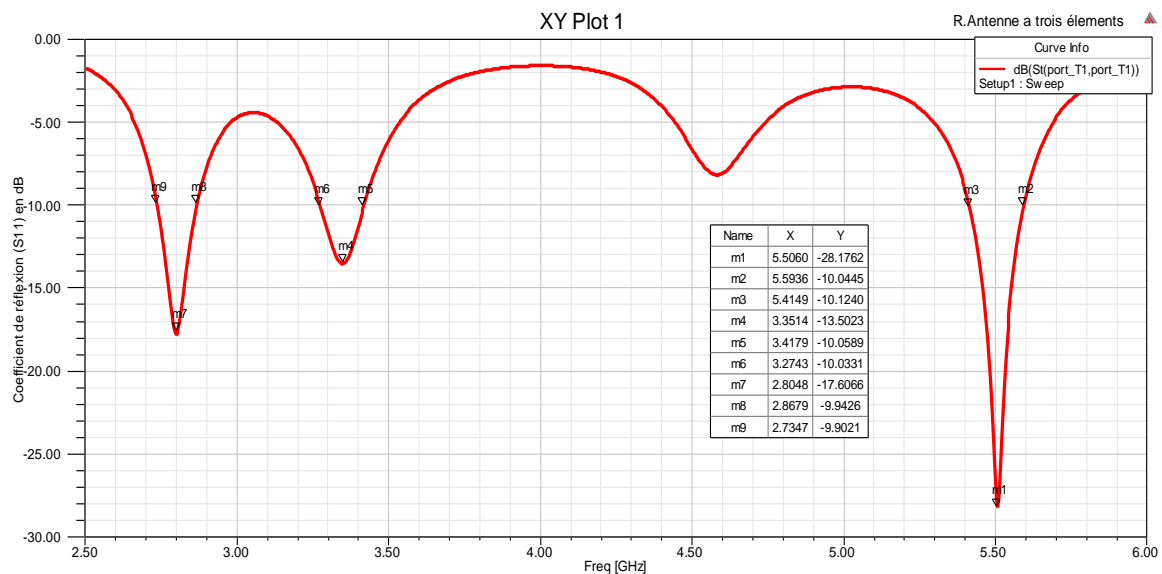


Figure 33: Coefficient de réflexion (S11) en dB d'antenne patch à trois éléments

La figure (34) représente le rapport d'onde stationnaire (ROS) en fonction de la fréquence. D'après la figure on remarque :

- ❖ Pour $f_1 = 5.5060 \text{ GHz} \Rightarrow \text{ROS} = 1.0812$
- ❖ Pour $f_2 = 3.3514 \text{ GHz} \Rightarrow \text{ROS} = 1.5358$
- ❖ Pour $f_3 = 2.8048 \text{ GHz} \Rightarrow \text{ROS} = 1.3034$

On remarque que toutes les valeurs sont acceptables car elles sont inférieures à 2 et ça signifie que le réseau d'antenne est adapté pour les trois fréquences de résonance.

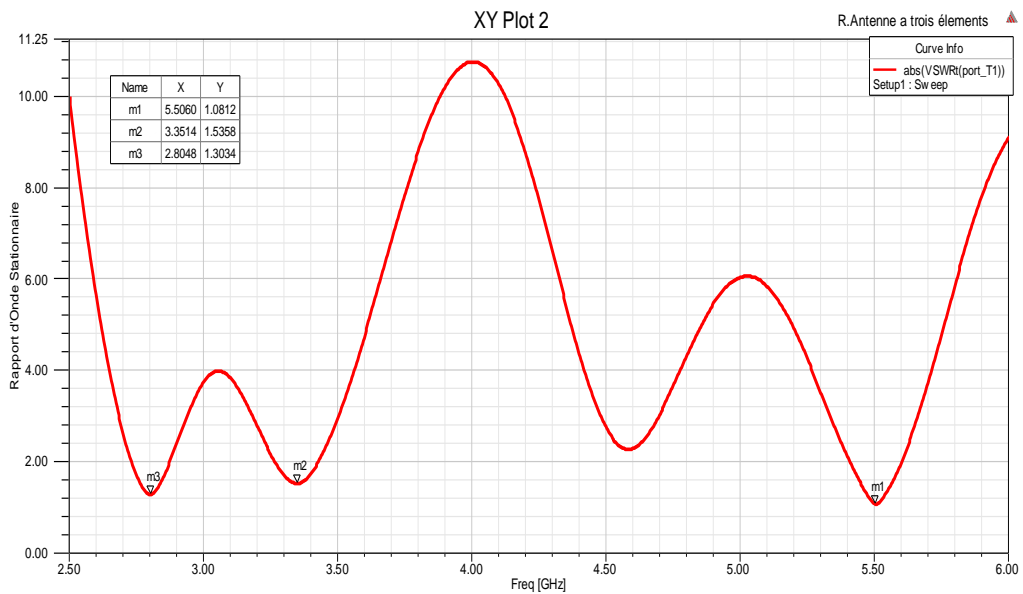


Figure 34: Rapport d'Onde Stationnaire d'un réseau à trois éléments

3.5.2 Diagrammes de rayonnement

Les diagrammes de rayonnement en gain et en directivité sont présentés dans les figures (35) et (36) respectivement.

Le gain : La valeur maximale du gain pour la fréquence 5.5060 GHz est égale à 6.5822 dB.

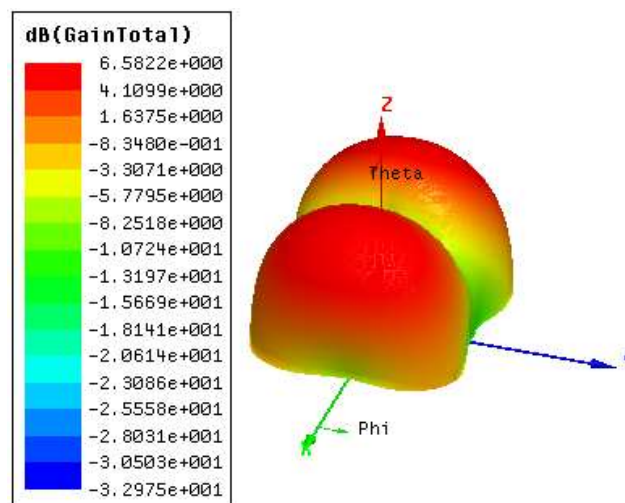


Figure 35: Le Gain d'un réseau d'antenne à trois éléments

La Directivité : La valeur maximale de la directivité pour la fréquence 5.5060GHz est égale à 9.0865dB.

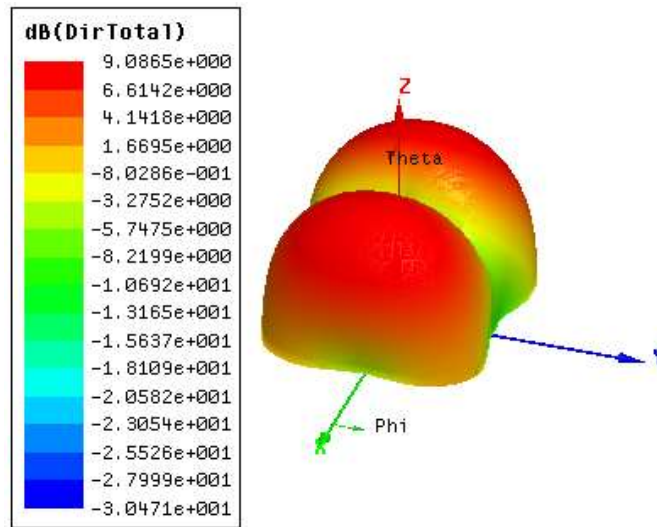


Figure 36: La directivité d'un réseau d'antenne à trois éléments

3.5.3 L'efficacité

L'efficacité de cette antenne est donné par : $\eta = \frac{G}{D} = \frac{6.5822}{9.0865} = 72.43\%$

3.6 Réseau d'antennes à 6 éléments

Dans cette section, le réseau de la section précédente est doublé pour former un réseau à 6 éléments comme illustré dans la figure (37). On garde la distance entre 2 éléments (les 2 directions x et y) qui est le pas de réseau « $d=\lambda/2$ ».

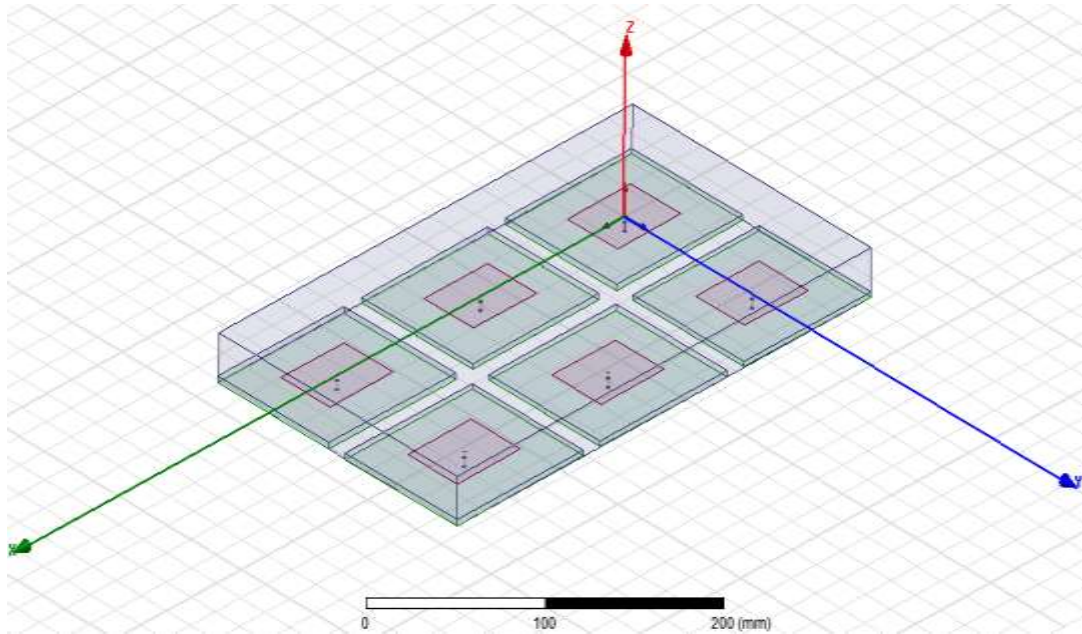


Figure 37: Structure de réseau l'antenne à six éléments

3.6.1 Coefficient de réflexion et Rapport d'onde stationnaire

D'après la figure (38) qui représente la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence, on remarque trois fréquences de résonance qui sont :

- ❖ $f_1 = 5.5340\text{GHz} \Rightarrow S_{11} = -25.1717\text{ dB}$ et la bande de fréquence comprise entre (5.4289GHz et 5.5356 GHz) ou $BP = 206.7\text{MHz}$
- ❖ $f_2 = 3.3443\text{GHz} \Rightarrow S_{11} = -13.0157\text{ dB}$ avec une bande de fréquence comprise entre (3.2703GHz et 3.4144GHz) ou $BP = 143.6\text{MHz}$
- ❖ $f_3 = 2.7382\text{GHz} \Rightarrow S_{11} = -19.9497\text{ dB}$ avec une bande de fréquence comprise entre (2.6577GHz et 2.8223GHz) ou $BP = 164.6\text{MHz}$

On constate que la fréquence f_1 est la fréquence optimale pour une bonne adaptation de l'antenne car le coefficient correspondant présente la valeur minimale.

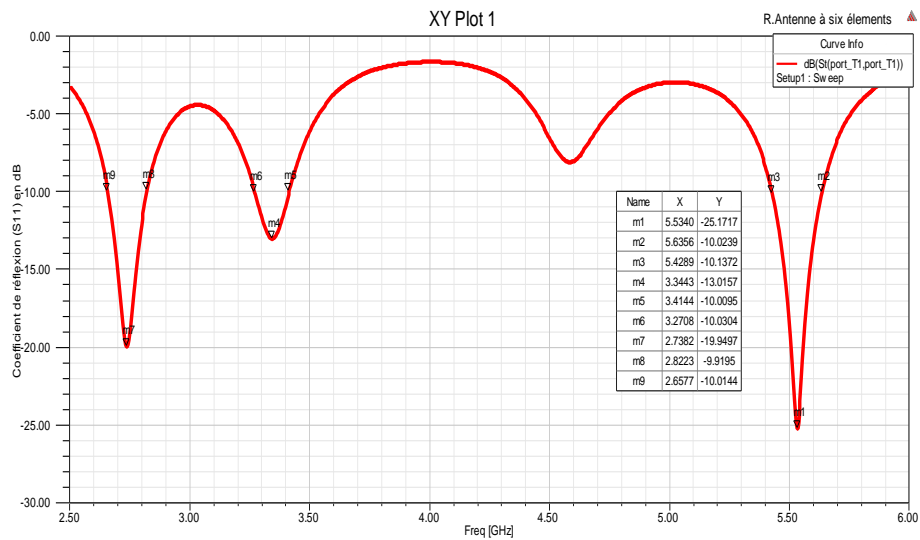


Figure 38: Coefficient de réflexion (S11) en dB d’antenne patch à six éléments

D’après la figure (39) qui représente le rapport d’onde stationnaire (ROS) en fonction de la fréquence, on remarque :

- ❖ Pour $f_1 = 5.5340\text{GHz} \Rightarrow \text{ROS} = 1.1167$
- ❖ Pour $f_2 = 3.3443\text{GHz} \Rightarrow \text{ROS} = 1.5756$
- ❖ Pour $f_3 = 2.7382\text{GHz} \Rightarrow \text{ROS} = 1.2237$

On remarque que toutes les valeurs sont favorables car elles sont toutes inférieures à 2 et ça signifie que le réseau d’antenne est adapté pour les trois fréquences de résonance. Et toujours la fréquence $f_1 = 5.5340\text{GHz}$ est la meilleure des trois valeurs, car elle possède la valeur de ROS la plus petite.

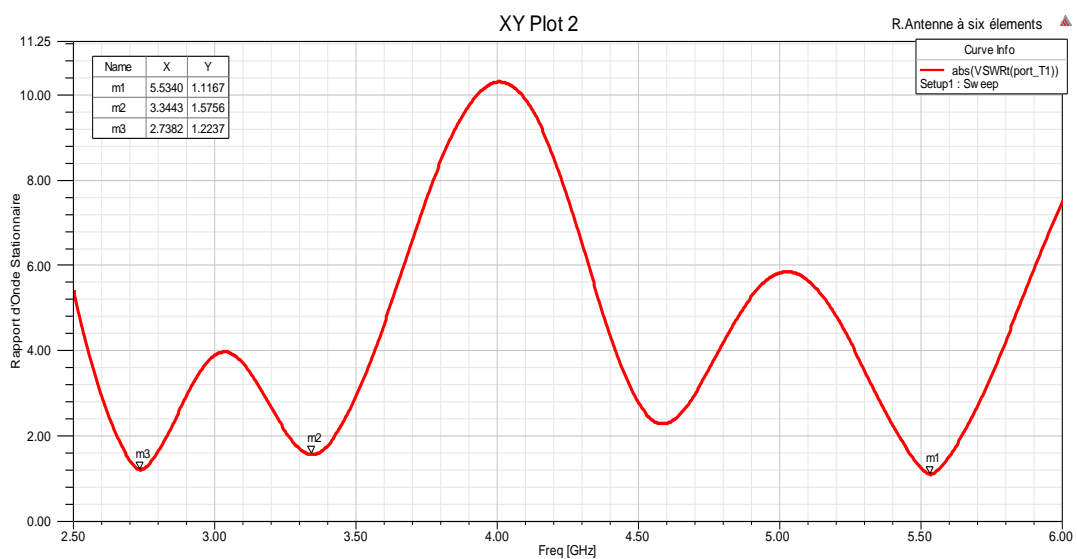


Figure 39: Rapport d’Onde Stationnaire d’un réseau à trois éléments

3.6.2 Diagrammes de rayonnement

Les diagrammes de rayonnement en gain et en directivité sont présentés dans les figures (40) et (41) suivants.

Le gain : La valeur maximale du gain à la fréquence 5.5340 GHz est égale à 6.6963 dB.

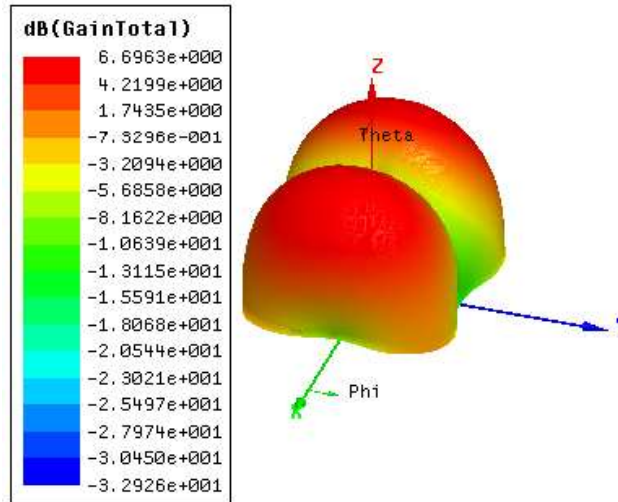


Figure 40: Le gain d'un réseau d'antenne à six éléments

La Directivité : La valeur maximale de la directivité à la fréquence 5.5340GHz est égale à 9.2123dB.

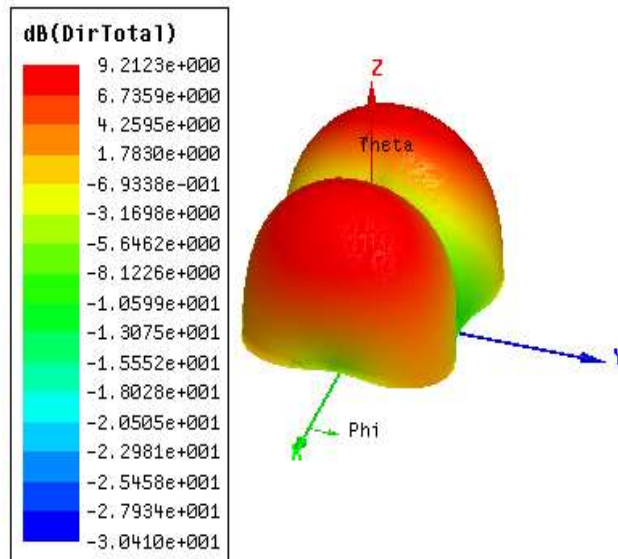


Figure 41: La directivité d'un réseau d'antenne à six éléments

3.6.3 L'efficacité

L'efficacité de cette antenne est donné par : $\eta = \frac{G}{D} = \frac{6.6963}{9.2123} = 72.68\%$

3.7 Résultats récapitulés de la partie 1

Les résultats des quatre simulations des réseaux sont récapitulés dans le tableau suivant :

Antenne Réseau	Un seul élément	Deux éléments	Trois éléments	Six éléments
F_0 GHz	5.5025	5.5025	5.5025	5.5025
F_r en GHz	5.5410	5.5445	5.5060	5.5340
S_{11} en dB	-36.2709	-35.7388	-28.1762	-25.1717
Gain en dB	6.4567	6.5859	6.5822	6.6963
Directivité en dB	8.8521	9.0030	9.0865	9.2123
BP en MHz	178.7	182.2	178.7	206.7
ROS	1.0352	1.0332	1.0812	1.1167
η en %	72.73	73.26	72.43	72.68

Tableau 2: Résultat de simulation des différents réseaux d'antennes imprimées (Un, deux, trois et six éléments)

D'après le tableau 2, qui regroupe les résultats de la simulation des différents réseaux d'antennes imprimées (Un, deux, trois et six éléments) indique que la mise en réseau des antennes donne une légère amélioration en matière du gain et de la directivité tandis que pour le coefficient, on remarque une dégradation. Normalement la mise en réseau permet d'améliorer significativement le gain et la directivité qui ce n'est le cas pour ce travail et ce peut être dû la distance entre les éléments qui doit être optimisée.

3.8 Comparaison avec la littérature

Tous d'abord, dans cette partie on va simuler l'antenne patch rectangulaire alimentée par une sonde coaxiale de la référence [11] en suite on va la mettre en réseau de (3x3) éléments.

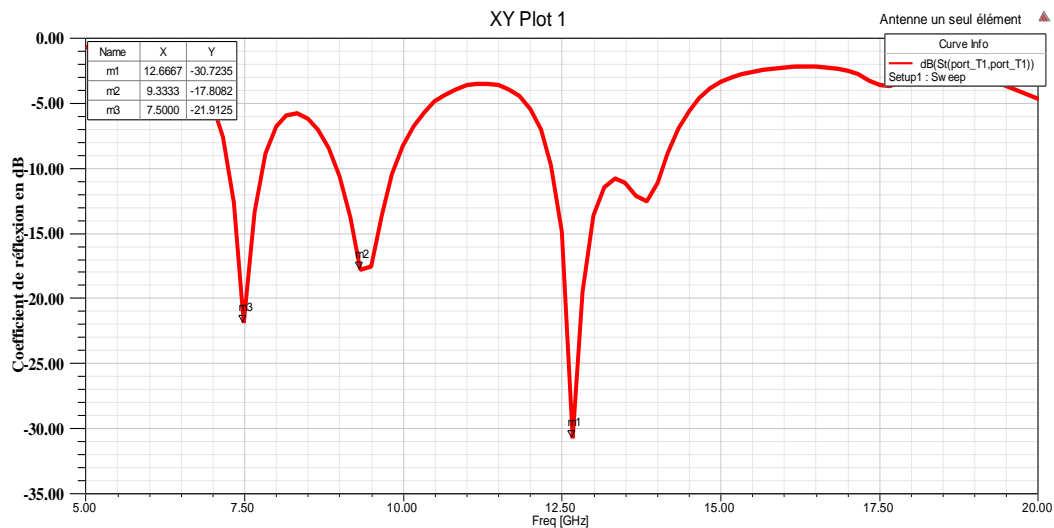
L'antenne patch de l'article [11] à simuler et opérer à la fréquence 13 GHz en bande Ku (12 à 18 GHz), est constituée d'un élément rayonnant imprimé sur un substrat Flame-Resistant 4 (FR4) caractérisé par un constant diélectrique de $\epsilon_r = 4.4$. Le tableau ci-dessous donne les valeurs correspondantes des paramètres de conception.

Paramètre de conception	Valeur[11]
Fréquence de fonctionnement	13.333 GHz
Constante diélectrique du substrat	4.4
hauteur du substrat	0.157cm
Longueur du substrat	2.3 cm
Largeur du substrat	1.9 cm
Longueur de patch	0.91 cm
Largeur de patch	0.67 cm
Rayon de la broche coaxiale	0,2 mm
Hauteur de la broche coaxiale	0,157 cm
Taille de la matrice (NxM)	3x3

Tableau 3: Paramètres de conception et valeurs correspondantes

3.8.1 Antenne à un seul élément

3.8.1.1 Coefficient de réflexion et Rapport d'onde stationnaire

Figure 42: Coefficient de réflexion (S_{11}) en dB d'antenne à un seul élément

D'après la figure (42) qui présente le coefficient de réflexion (S_{11}) en fonction de la fréquence, on remarque l'existence de trois fréquences de résonance qui sont :

- ❖ $f_1 = 12.6667 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -30.7235 \text{ dB}$
- ❖ $f_2 = 9.3333 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -17.8082 \text{ dB}$
- ❖ $f_3 = 7.5000 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -21.9125 \text{ dB}$

On remarque que la fréquence f_1 est la meilleure, car le coefficient de réflexion correspondant présente la valeur la plus petite des trois valeurs.

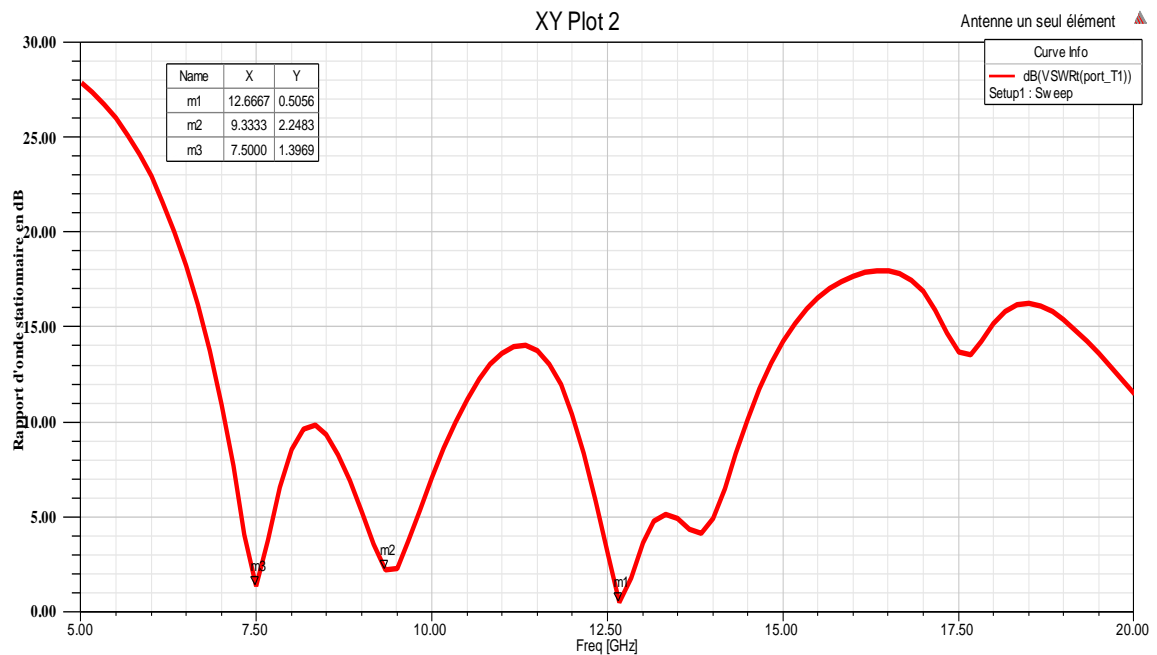


Figure 43: Rapport d'Onde Stationnaire d'antenne à un seul élément

Le rapport d'onde stationnaire (ROS) en fonction de la fréquence est représenté dans la figure (43), d'après cette dernière on remarque que les trois valeurs de ROS correspondent aux trois fréquences de résonance sont :

- ❖ Pour $f_1 = 12.6667$ GHz \Rightarrow ROS = 0.5056
- ❖ Pour $f_2 = 9.3333$ GHz \Rightarrow ROS = 2.2483
- ❖ Pour $f_3 = 7.5000$ GHz \Rightarrow ROS = 1.3969

On remarque que la fréquence (f_2) est défavorable car la valeur de ROS à cette fréquence est supérieure à 2. Tandis que les deux autres valeurs sont acceptables (inférieure à 2).

3.8.1.2 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de la directivité est illustré dans la figure (44). D'après cette dernière la valeur maximale de la directivité à la fréquence 12.6667 GHz est égale à 7.3408 dB.

Le diagramme du gain est illustré dans la figure (45). D'après cette dernière la valeur maximale du gain à la fréquence 12.6667 GHz est égale à 6.1707 dB.

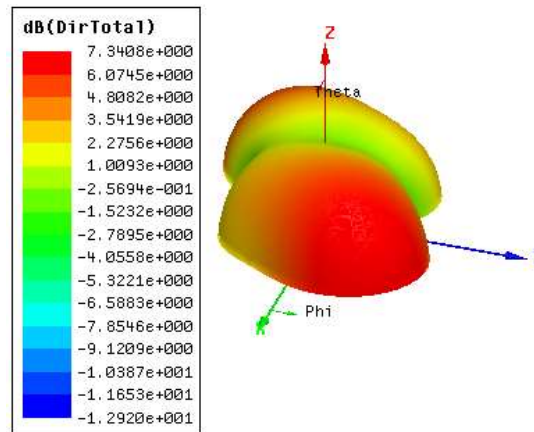


Figure 44: Le Gain d'une antenne patch rectangulaire

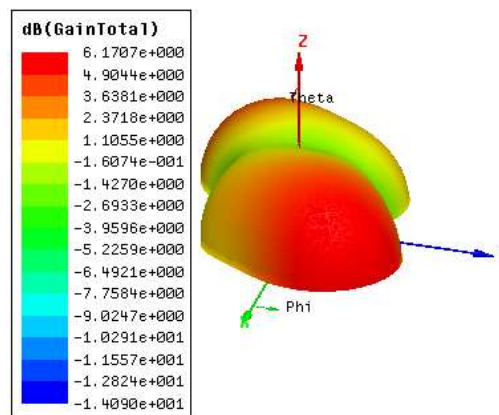


Figure 45: La directivité d'une antenne patch rectangulaire

3.8.1.3 L'efficacité

Le rendement est donné par : $\eta = \frac{G(\theta,\varphi)}{D(\theta,\varphi)}$. Dans ce cas-là, le gain $G=6.1707$ dB et la directivité $D=7.3408$, donc : $\eta = \frac{G}{D} = \frac{6.1707}{7.3408} = 0.8406 = 84.06\%$

3.8.2 Simulation d'antenne réseau à neuf (3x3) éléments

Dans cette section, le nombre d'éléments est (3x3) et sont espacées de « $d=\lambda/4$ », (L'antenne de l'article [11])

3.8.2.1 Coefficient de réflexion et Rapport d'onde stationnaire

Le coefficient de réflexion de cette simulation et ce de l'article [11] sont présentés dans les figures (46) et (47) respectivement. D'après ces figures on remarque que :

Pour notre simulation illustrée dans la figure (46)-on remarque l'existence de trois fréquences de résonance qui sont :

- ❖ $f_1 = 12.1667 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -24.7729 \text{ dB}$
- ❖ $f_2 = 13.3333 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -12.3983 \text{ dB}$
- ❖ $f_3 = 9.0000 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -18.5439 \text{ dB}$

On remarque que la fréquence (f_1) est la meilleure car le coefficient de réflexion correspondant présente la valeur la plus petite.

Pour la simulation de l'article [11] qui est illustrée dans la figure (47), on remarque l'existence qu'une seule fréquence de résonance qui est :

- ❖ $f = 13.33 \text{ GHz} \Rightarrow S_{11} = -20.63 \text{ dB}$

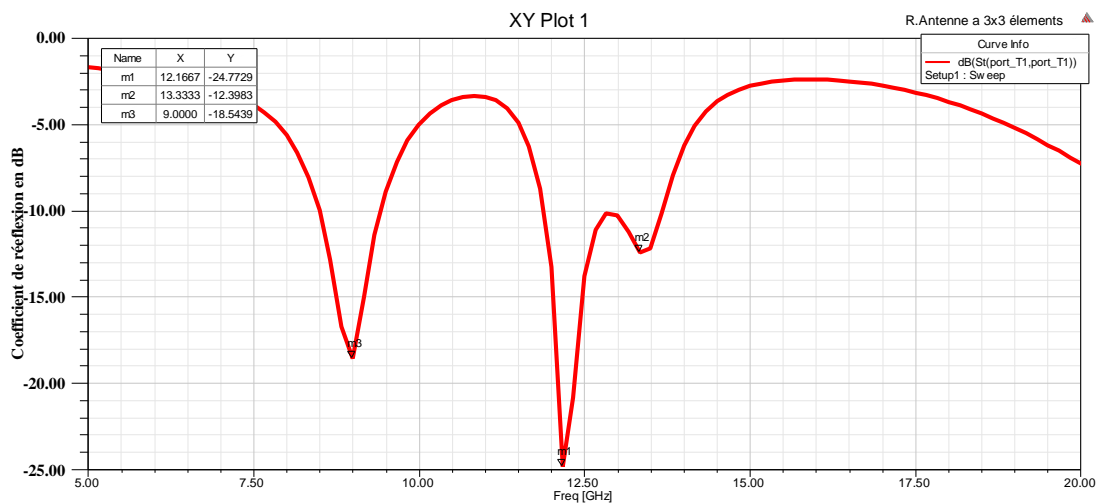


Figure 46: Coefficient de réflexion (S11) en dB : Nos résultats

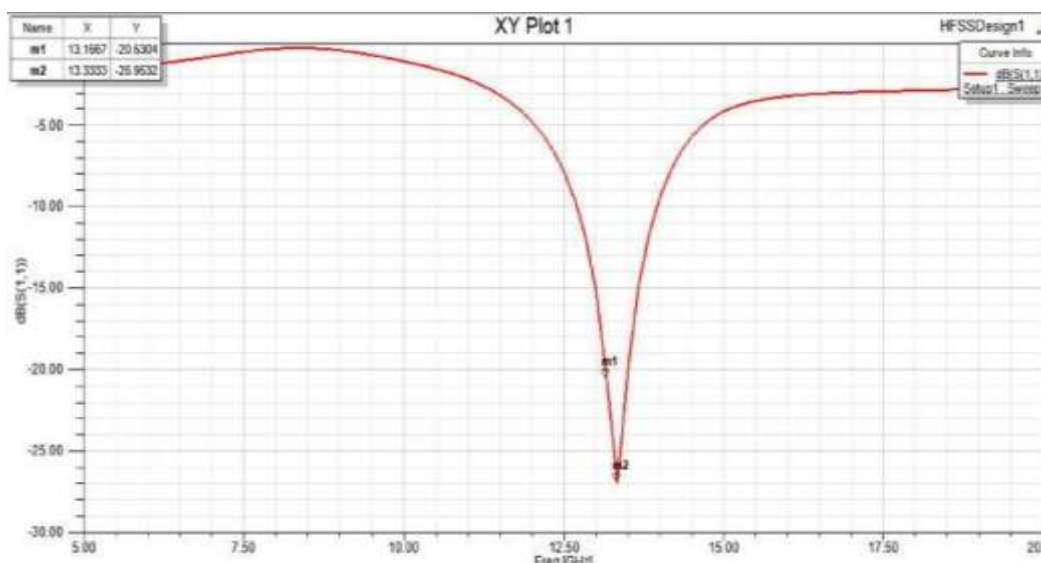


Figure 47: Coefficient de réflexion (S11) en dB : -Résultats de l'article [11]

Le rapport d'onde stationnaire (ROS) en fonction de la fréquence de notre simulation est représenté dans la figure (48), d'après cette dernière on remarque :

- ❖ Pour $f_1 = 12.1667$ GHz \Rightarrow ROS=1.0039
- ❖ Pour $f_2 = 13.3333$ GHz \Rightarrow ROS=4.2509
- ❖ Pour $f_3 = 9.0000$ GHz \Rightarrow ROS=2.0639

On remarque que les deux fréquences (f_2 et f_3) sont défavorables car les coefficients correspondant représentent une valeur supérieure à 2 tandis que la fréquence (f_1) est acceptable (inférieur à 2).

Pour la simulation de l'article qui est représenté dans la figure (49), on remarque que le rapport d'onde stationnaire (ROS) est (0.7807) à la fréquence (13.33 GHz).

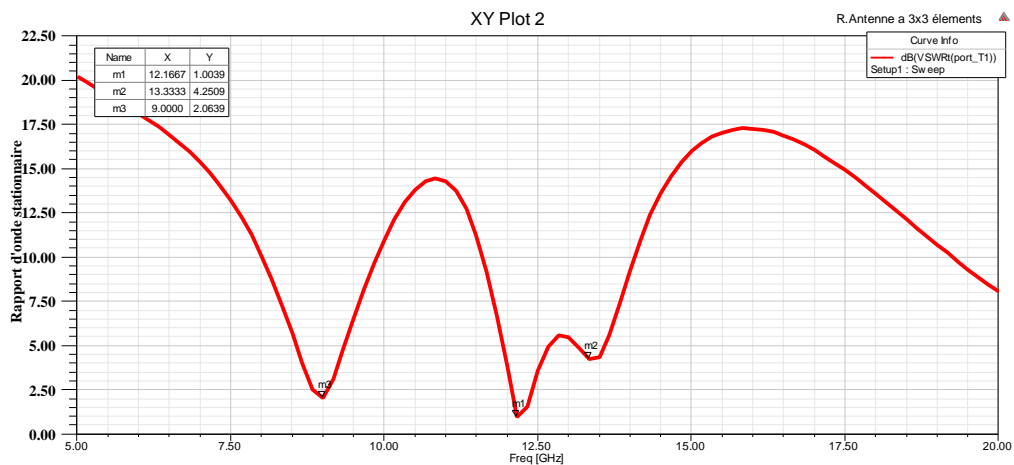


Figure 48: Rapport d'Onde Stationnaire pour réseau d'antenne 3x3). (Notre résultat)

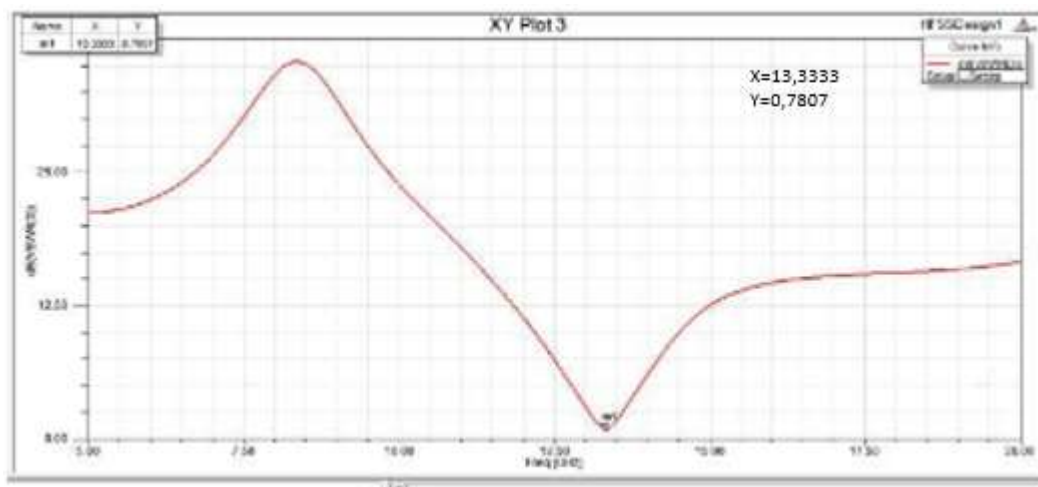


Figure 49: Rapport d'Onde Stationnaire pour réseau d'antenne 3x3) ([11])

3.8.2.2 Diagramme de rayonnement

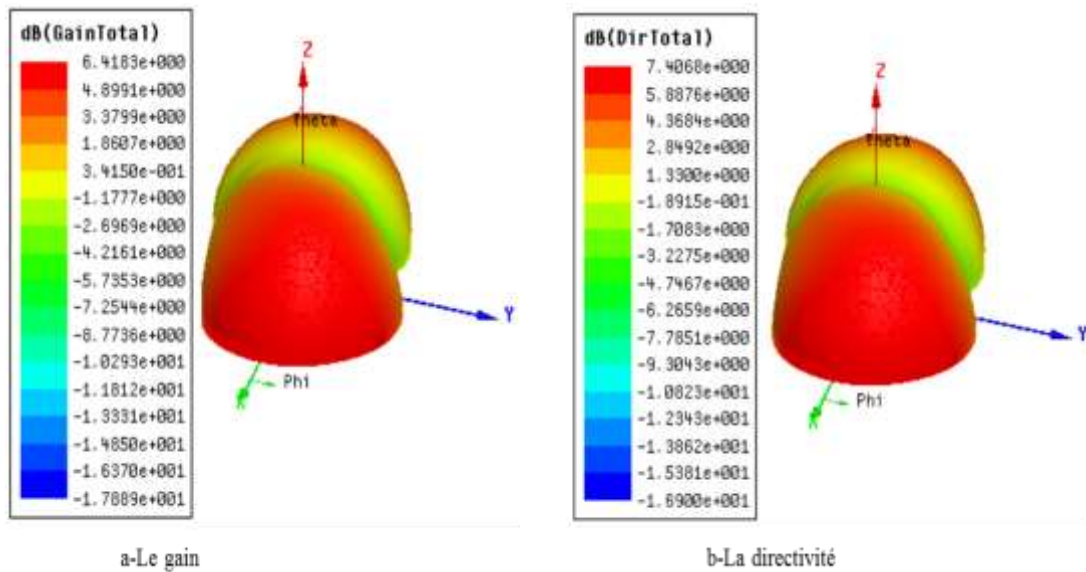


Figure 50: Le gain et la Directivité (nos résultats)

La figure 50 représente les diagrammes du gain et de la directivité (de gauche à droite) respectivement de notre simulation. Cette figure montre que les valeurs max du gain et de la directivité de l'antenne, sont respectivement (6.4183 dB) et (7.4068 dB) pour la fréquence de fonctionnement (12.1667 GHz).

La valeur du gain de l'antenne de la référence [11] est égale à 17.29 dB, pour la fréquence (13.3333GHz).

3.8.2.3 L'efficacité

$$\text{Le rendement est donné par : } \eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} = \frac{6.4183}{7.4068} = 86.65\%$$

3.8.2.4 Interprétation Résultats récapitulés de la partie 2

Les résultats de la simulation sont groupés dans le tableau (4).

Paramètre d'antenne	Nos résultats	Résultats d'article
S ₁₁	-24.7729	-20.6304
Gain en dB	6.4183	17.29
Fr en GHZ	12.1667	13.3333
VSWR en dB	1.0039	0.7807

Tableau 4: Résultat comparative de simulation d'un réseau d'antenne à 3x3 éléments

D'après le tableau ci-avant, on remarque un petit décalage entre nos résultats et ceux de l'article [11] et parfois nos résultats sont médiocres rapport à ceux de l'article. Et ceci peut être dû au fait au manque de certains paramètres qui sont la position de l'alimentation et le diamètre extérieur du câble coaxial d'alimentation.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les simulations de la conception des quatre structures de réseau d'antennes imprimées alimentées par des sondes coaxiales opérantes à la fréquence 5.5025 GHz. Dans un premier lieu, on a simulé une antenne à un seul élément, après à deux éléments ensuite à trois éléments et en fin à six éléments. Les performances et les caractéristiques de ces réseaux ont été illustrées et comparées. Dans la deuxième phase on a simulé l'antenne de l'article [11] à un seule élément opérante à la fréquence 13 GHz ensuite on la met en réseau à 3x3 éléments.

Les travaux de ce chapitre qu'un réseau linéaire peut être utilisé comme une cellule de base pour construire un réseau plan.

D'après les résultats de la simulation, on constate que l'augmentation du nombre d'élément rayonnant a porté une légère amélioration en gain et en directivité.

Conclusion générale

Ce projet que nous avons présenté dans le cadre de fin d'étude, nous a permis de concevoir et simuler quatre structures de réseau d'antennes imprimées à base d'un patch de forme rectangulaire alimenté par une sonde coaxiale. Dans le premier chapitre on a présenté l'essentielle sur les antennes imprimées en mettant l'accent sur les principales caractéristiques (gain, directivité, bande passante, coefficient de réflexion...). Le deuxième chapitre est consacré aux réseaux d'antennes imprimées.

Le troisième chapitre est consacré à la description de la conception et la simulation des diverses structures d'antennes. Les conceptions sont simulées à l'aide du logiciel HFSS 14.0 (High Frequency Structure Simulation). On a commencé par la simulation de l'antenne à un seul élément où on a obtenu des résultats acceptables (concernant la directivité, le gain, fréquence de résonance,... etc). Puis, on a simulé un réseau d'antennes à deux éléments, à trois éléments et en quatrième étape à six éléments. D'après les résultats trouvés des structures simulées, on a conclu que la mise en réseau améliore principalement le gain et la directivité. D'autre part, la comparaison de nos résultats avec ceux de la référence [11] présente un décalage entre nos résultats et ceux de l'article et parfois une dégradation par rapport à ceux de l'article. Et ceci peut être dû au fait au manque de certains paramètres qui sont la position de l'alimentation et le diamètre extérieur du câble coaxial d'alimentation.

Les travaux de ce mémoire qu'un réseau linéaire peut être utilisé comme une cellule de base pour construire un réseau plan

D'après les résultats de la simulation, on constate que l'augmentation du nombre d'élément rayonnant a porté une légère amélioration en gain et en directivité.

D'une façon générale la mise en réseau permet d'augmenter le gain et la directivité et l'utilisation des simulateurs électromagnétiques c'est atout important.

Bibliographie

1. **BOUAKA, ASMA et TEMMAR, LOUIZA.** *Simulation d'un réseau d'antenne pour les mobiles 5G avec CST Micro Wave Studio.* 25/06/2018.
2. **ANDREE, FOUQUE.** *Contribution à la conception d'un récepteur mobile faible cout et faible consommation dans la bande Ku pour le standard DVB-S.* Université de Bordeaux : s.n.
3. **BAHLOUL, MOHAMED SALIM.** *Etude et coception de Réseaux d'Antenne Imprimées larges bandes à polarisation diverse par l'utilisation d'architectures log périodiques .* Université Aboubakr Belkaid Telemcen : s.n., 02/2017.
4. **BEN BRAHEM, SEYF EL ISLAM.** *Etude et simulation d'une antenne imprimée rectangulaire mise en réseau .* Université Saad Dahleb Blida : s.n., 2009.
5. **KADRI, BOUFELDJA.** *Modélisation des Synthèse de Réseaux Periodiques et non periodiques d'antenne micro-rubans par l'application d'un algorithme Génétique-Flou.* 2011.
6. **NELSON JORGE , Gonçalve Fonseca.** *Etude de Systèmes Micro-ondes d'Alimentation d'Antennes Réseau pour Application Multifaisceaux.* Université de Toulouse : s.n., 15/10/2010.
7. **Odile , Picon et COLL.** *Les Antennes Théorie, Conception et application.* Pais : s.n., 2009.
8. **RABIA, ZAINAB.** *Design and Performance Analysis of Switched Beam Series-Fed Patch Antenna Array for 60 GHZ wpan.* 2014.
9. **VINCENT, JAECK.** *Développement d'antennes de communication reconfigurables en bande C pour munition intelligentes.* Université Rennes : s.n., 2016.
10. **ZAOUI, BACHIR.** *Modélisation d'une antenne micro-ruban compacte.* Université Chahid Hamma Lakhdar El Oued : s.n., 02/06/2015.
11. **Vasujadevi Midsala, Siddaiah.** *Microstript Patch Antenna Array design to Iprov Better Gains.* Université Acharya Nagarjuna ende : s.n.