

Conception d'antennes pour réseaux 5G bande microwave 2 à 6 GHz



Réalisé par :

AL JADD Mohammed

Nossaiba EL Asri

Professeur encadrant :

Mr Abdellah Najid

2020/11/27, Vendredi 14:30.

REMERCIEMENTS

Nous voulons remercier avant, Allah, le tout puissant, de nous avoir donné la volonté pour faire ce travail d'ingénierie.

Nos parents pour leur soutien indéfectible.

Un remerciement et une reconnaissance particulière à notre professeur Mr Abdellah Najid qui nous a aidé pendant la période de préparation de ce travail.

Grace à son cours d'antenne que nous avons faite l'année dernière, ce travail était bien organisé et les solutions des problèmes rencontrés sont déjà mentionnées dans le cours.

Sommaire

I. Introduction

| | |
|----------------------|---|
| I.1. La 5G | 6 |
| I.2. Les antennes 5G | 7 |

II. Logiciel de simulation

III. Antennes

| | |
|---|----|
| III.1. Définition d'une antenne | 13 |
| III.2. Les paramètres d'une antenne | 13 |
| III.2.1 Impédance d'entrée | 13 |
| III.2.2 Coefficient de réflexion | 13 |
| III.2.3 Diagramme de rayonnement | 14 |
| III.2.4 Directivité | 15 |
| III.2.5 Gain | 15 |
| III.2.6 Fréquence centrale et bande passante | 16 |
| III.3. Antennes imprimées | 17 |
| III.3.1 Structure d'une antenne imprimée | 17 |
| III.3.2 Avantages et inconvénients de l'antenne patch | 18 |
| III.3.3 Techniques d'alimentation des antennes patch | 18 |
| III.3.4 Réseau D'antennes Imprimées | 19 |

IV. L'antenne 5G bande microwave

| | |
|---|----|
| IV.1. Conception de l'antenne patch résonante à 3.6 GHz | 23 |
| IV.2. Dimensionnement | 24 |
| IV.3. Simulation | 25 |
| IV.3.1 .Coefficient de réflexion: S_{11} | 25 |
| IV.3.2 VSWR | 25 |

| | |
|---------------------------------|----|
| IV.3.3 Diagramme de rayonnement | 26 |
| IV.3.4 L'angle d'ouverture | 27 |
| IV.3.5 Tableau récapulatif | 28 |
| IV.3.6 Amélioration | 29 |

V. Réseau 1x2 d'antennes

| | |
|---|----|
| V.1. Conception | 33 |
| V.2. Simulation | 34 |
| V.2.1 .Coefficient de réflexion: S_{11} | 34 |
| V.2.2 VSWR | 34 |
| V.2.3 Diagramme de rayonnement | 35 |
| V.2.4 L'angle d'ouverture | 36 |
| V.2.5 Tableau récapulatif | 37 |

VI. Réseau 2x2 d'antennes

| | |
|--|----|
| VI.1. Conception | 39 |
| VI.2. Simulation | 40 |
| VI.2.1 .Coefficient de réflexion: S_{11} | 40 |
| VI.2.2 VSWR | 40 |
| VI.2.3 Diagramme de rayonnement | 41 |
| VI.2.4 L'angle d'ouverture | 42 |
| VI.2.5 Tableau récapulatif | 43 |

VII. Comparaison des 3 antennes

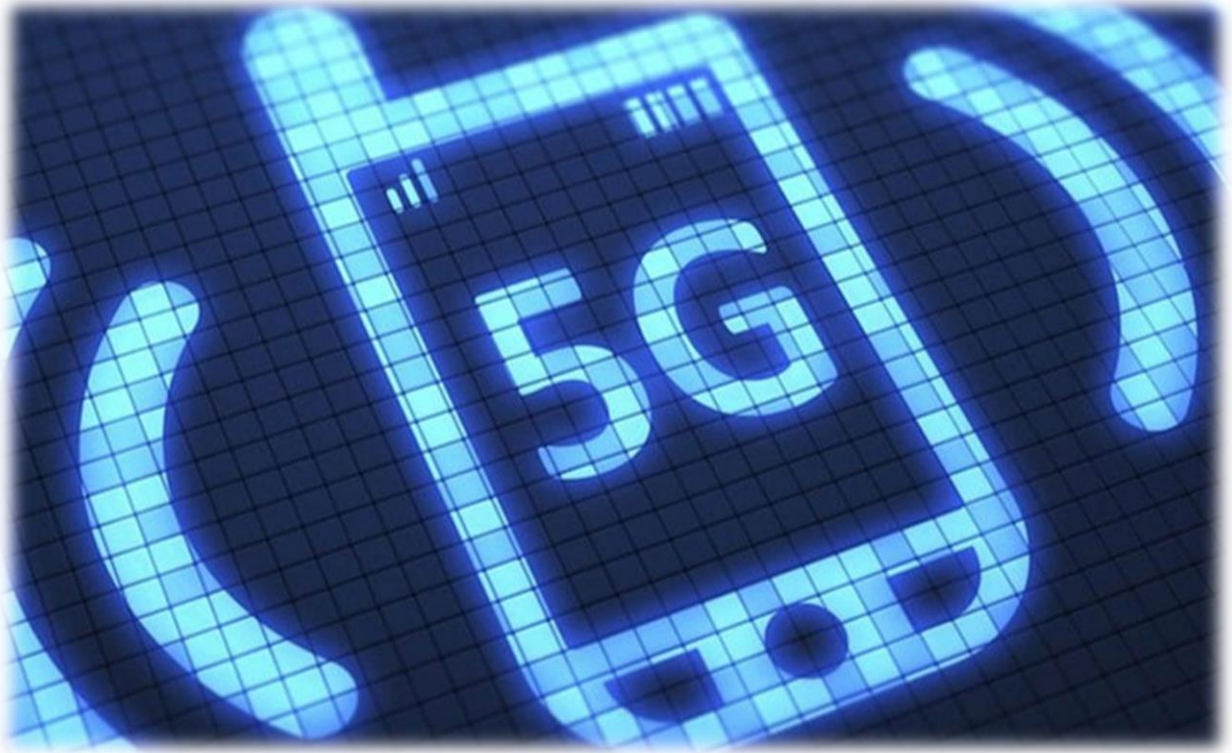
| | |
|------------------------|----|
| VI.1. Table 3 antennes | 45 |
|------------------------|----|

VIII. Conclusion

| | |
|--------------------------|----|
| VIII.1 Conclusion finale | 47 |
|--------------------------|----|

I. Introduction :

I.1. La 5G :



La 5G est la cinquième génération des standards pour la téléphonie mobile, elle donnera un accès à un transfert élevé de, avec des temps de latence très courts et une haute fiabilité.

Elle vise à supporter jusqu'à un million de mobiles au kilomètre carré (dix fois plus que la 4G).

Une fois déployée, elle doit permettre des débits de télécommunications mobiles de plusieurs gigabits de données par seconde, soit jusqu'à 100 fois plus rapides que la 4G initiale. La 5G aura une bande passante plus importante, plus large que la 4G.

Selon Nicolas Sironneau, de la Fondation Concorde, la 5G présente trois intérêts économiques :

1. soulager les réseaux de télécommunications mobiles qui vont arriver à saturation, et ainsi éviter un phénomène d'engorgement des données;
2. permettre aux entreprises d'optimiser certains processus, à travers l'automatisation et la fluidification de tâches (prenant l'exemple de la réalité augmentée utilisée dans des usines pilotes d'Ericsson pour aider la détection de défaut de fabrication) ;
3. permettre le développement de nouvelles applications s'appuyant sur les nouvelles performances (par exemple la téléchirurgie permise par un temps de latence très court et garanti)

I.2. Les antennes 5G :



Les antennes déployées pour la **5G** sont différentes de celles utilisées par la **4G**.

Les antennes **5G** sont plus intelligentes car il s'agit d'antennes qui dirigent un signal dans une direction précise plutôt que dans toutes les directions. En outre, elles émettent un signal adapté aux besoins de chaque utilisateur.

Équipées d'un très grand nombre de connecteurs, elles vont aussi permettre de prendre en charge un très grand nombre d'appareils.

Ces nouvelles antennes seront particulièrement utiles pour une autre bande de fréquences qui utilisera ensuite la **5G** : la **26 GHz**, utilisant les ondes millimétriques. Elles offrent un débit bien supérieur aux ondes basses fréquences, mais leur portée est plus courte et leur taux de pénétration assez mauvais. Un mur ou une simple averse suffisent à les ralentir. Afin d'obtenir une bonne couverture de réseau, il faudra donc multiplier les antennes pour contourner les obstacles.

Leur déploiement devrait cependant prendre du temps. D'abord parce que la bande du **26 GHz** n'est pas encore disponible. Ensuite, parce que le coût, encore incertain, en sera élevé. Sans compter les autorisations administratives et les réticences de la population. C'est pourquoi les opérateurs de téléphonie vont se contenter pour l'instant de passer à la **5G** en adaptant leurs sites existants pour la bande de fréquences de **3,4-3,8 GHz**.

II. Logiciel de simulation :

CST Microwave Studio



CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 dimensions basée sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales finies (Finite Integration Technique) .

Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3 dimensions de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle.

Justification du choix du logiciel :

- Plusieurs fonctionnalités
- Meilleur pour les antennes patch
- Simple à utiliser
- Optimisation des antennes est automatique

III. Les antennes :

III.1. Définition d'une antenne :

Une antenne est un dispositif qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission et vice versa en réception afin d'assurer la transmission sans fil de l'information. On peut qualifier les antennes comme des adaptateurs d'impédances entre l'espace et l'émetteur ou le récepteur.

III.2. Les paramètres d'une antenne

III.2.1 Impédance d'entrée :

L'impédance d'entrée est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ; elle est égale au rapport de la tension V_e sur le courant I_e présenté à l'entrée :

$$Z = \frac{V_e}{I_e}$$

III.2.2 Coefficient de réflexion :

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui permet de quantifier la quantité du signal réfléchi par rapport au signal incident :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c}$$

Avec Z_e est l'impédance d'entrée de l'antenne et Z_c est l'impédance caractéristique.

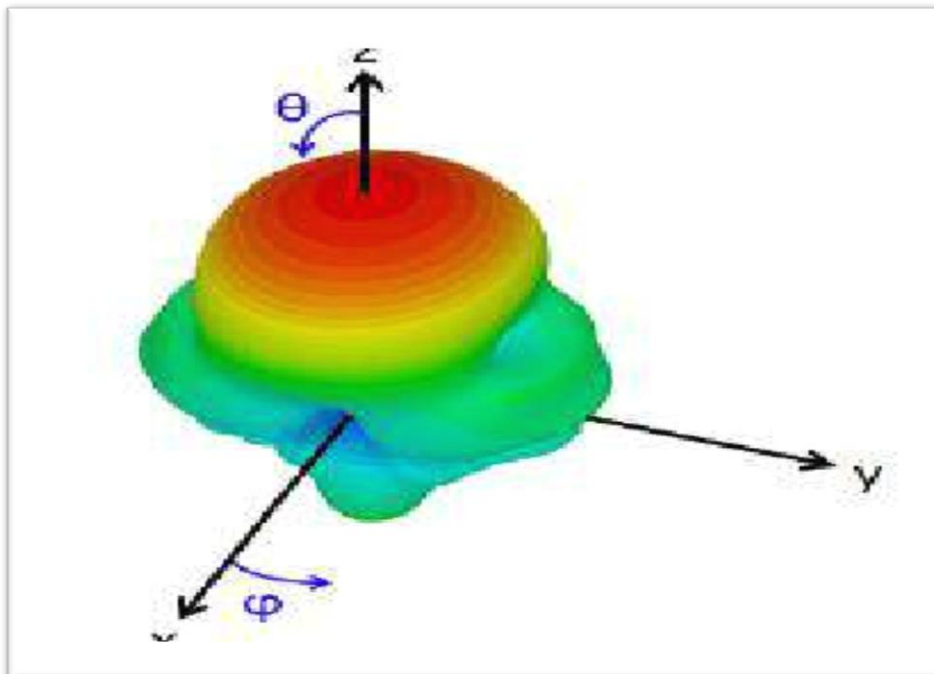
Signalons qu'on peut représenter Γ sous forme de paramètre S en dB tel que :

$$S_{11} = 20 \times \log(\Gamma)$$

III.2.3 Diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement d'une antenne présente les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace.

En dehors du cas des antennes omnidirectionnelles dans certains plans, les antennes ne rayonnent pas leurs puissances de façon uniforme dans toutes les directions de l'espace.



III.2.4 Directivité :

La directivité est le rapport de la puissance émise dans la direction maximum sur toute sa répartition spatiale. On dira donc qu'une antenne fortement directive quand l'antenne admet une faible ouverture de rayonnement, et qu'une antenne faiblement directive admet une large ouverture de rayonnement :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi U(\theta, \varphi)}{P}$$

Ou : U est l'intensité de rayonnement de l'antenne, et P est la puissance totale rayonnée

III.2.5 Gain :

Le gain est une quantité descriptive de la performance d'une antenne. Le gain d'une antenne isotrope est pris comme une référence unité (0 dB). Le gain d'une antenne dans une direction donnée est le rapport de l'intensité de rayonnement et de celle d'une antenne isotrope:

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{I_{iso}}$$

Ou I_{iso} : l'intensité de rayonnement d'une antenne isotrope

III.2.6 Fréquence de résonance et bande passante :

La bande passante de l'antenne détermine la bande de fréquences où le coefficient de réflexion est inférieur au seuil arbitrairement défini. La bande passante est généralement proportionnelle à la bande de fréquence avec un facteur de réflexion inférieur à **-10 dB**. Dans certaines applications, ce niveau peut être augmenté à **-6 dB**, ce qui permet certaines limitations dans la conception de l'antenne, par exemple, pour certaines antennes mobiles.

La fréquence de résonance, correspond à la fréquence pour laquelle l'antenne est la mieux adaptée, c'est-à-dire pour laquelle le coefficient de réflexion est le plus faible. Sur une bande passante donnée, il est possible d'observer plusieurs minimas donc plusieurs fréquences de résonance.

La bande passante est définie par la formule suivante:

$$BP = \frac{f_2 - f_1}{f_c}$$

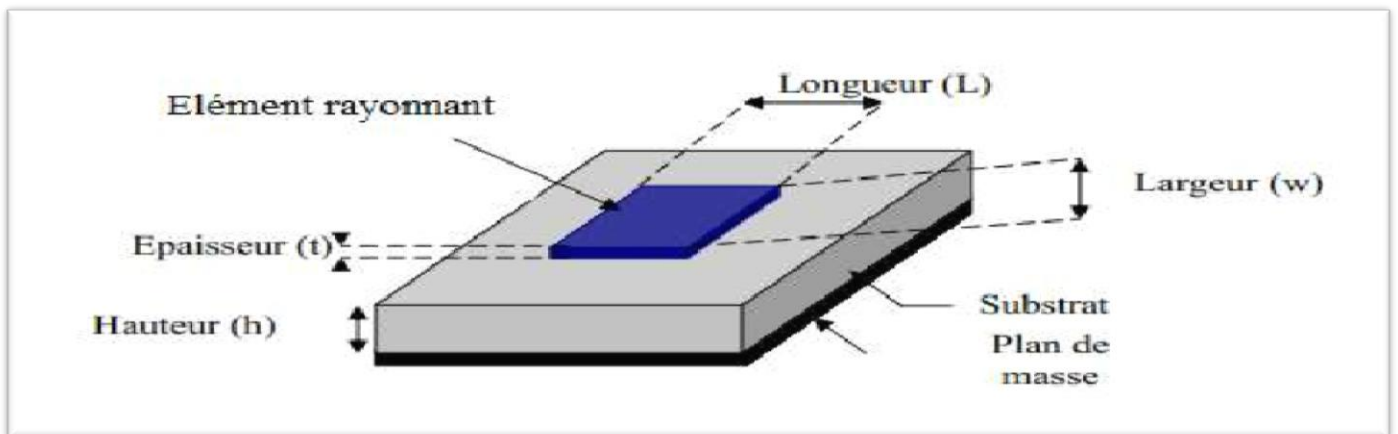
Avec f_2 la fréquence maximale et f_1 la fréquence minimale entre lesquelles le coefficient de réflexion est inférieur à **-10 dB** (voire **-6dB**) et f_c la fréquence centrale.

III.3. Antennes imprimées:

Une antenne imprimée est généralement constituée d'un plan de masse, d'une ou plusieurs couches de substrat qui sont de permittivités égales ou différentes. Sur la surface, on a un élément rayonnant de géométrie quelconque appelé Patch. Il existe plusieurs modes d'alimentations ou d'excitations qui permettent d'avoir des diagrammes de rayonnements en polarisations linéaires ou circulaires

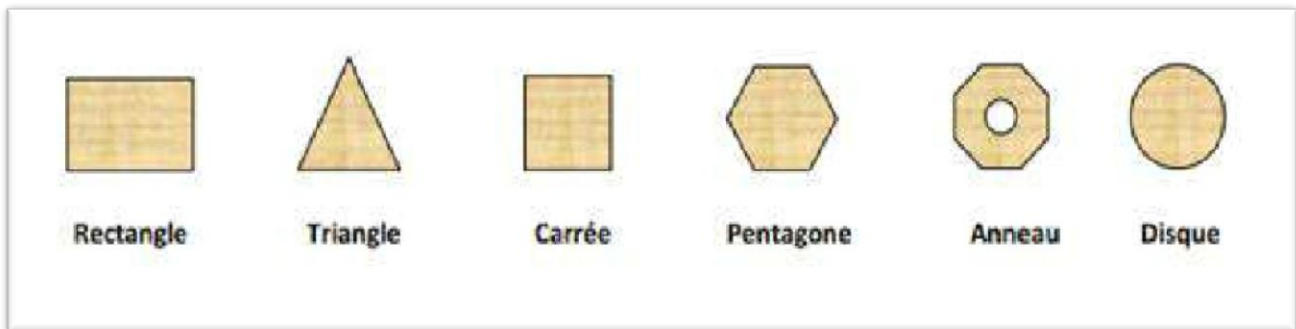
III.3.1 Structure d'une antenne imprimée :

L'antenne imprimée qui porte aussi l'appellation Microstrip, micro-ruban, ou encore patch est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique. Ce type d'antennes est caractérisé par une bonne directivité avec un rayonnement maximal dans la direction perpendiculaire à l'antenne.



L'élément rayonnant de l'antenne imprimée peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carré, triangulaire, circulaire, ...etc. Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, et également un diagramme de rayonnement

très intéressant. La figure ci-dessous illustre les formes des éléments rayonnants les plus utilisées.



III.3.2 Avantages et inconvénients de l'antenne patch :

Les principaux avantages et inconvénients de l'antenne patch sont récapitulés dans le tableau suivant :

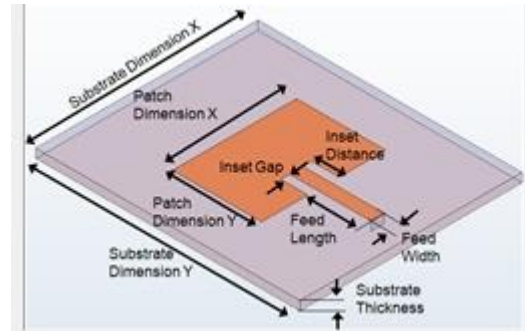
| Avantages | Inconvénient |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Poids et volume réduits ➤ Faible coût et robustesse ➤ Polyvalence (fréquence, polarisation..) ➤ IL est facile d'être intégré aux circuits intégrés micro-ondes. ➤ Adaptable aux surfaces courbes | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Ils nécessitent des substrats de qualité avec des valeurs comprises entre : $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ ➤ Faible puissance ➤ L'impédance d'entrée est difficile à calculer et à ajuster ➤ Réduction de l'efficacité des correctifs (pertes dans le réseau électrique). |

III.3.3 Techniques d'alimentation des antennes patch :

A- Méthode de couplage directe:

Avantages: Facilité de fabrication et de modélisation.

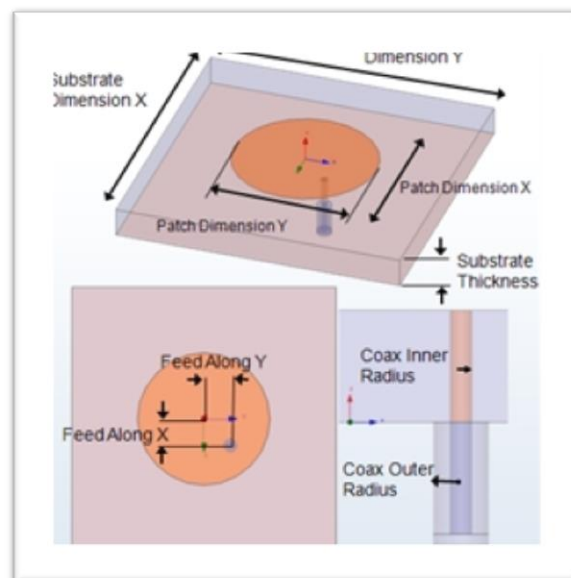
Inconvénients: Le couplage entre le patch et la ligne produit des niveaux élevés de radiation dans les champs polarisés croisés et induits.



B- Méthode de sonde coaxiale :

Avantages : Facile à construire et posséder un faible niveau de rayonnements parasites.

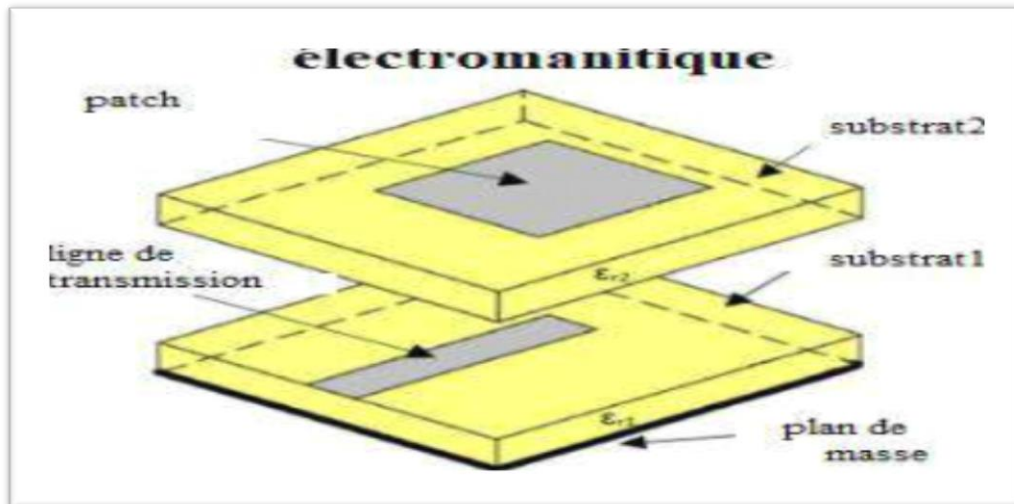
Inconvénients : La bande passante réduite est obtenue, et Modélisation difficile.



C- Méthode de couplage électromagnétique ::

Avantages : Faible rayonnement parasite, et très utile quand il s'agit de construire des réseaux d'antennes.

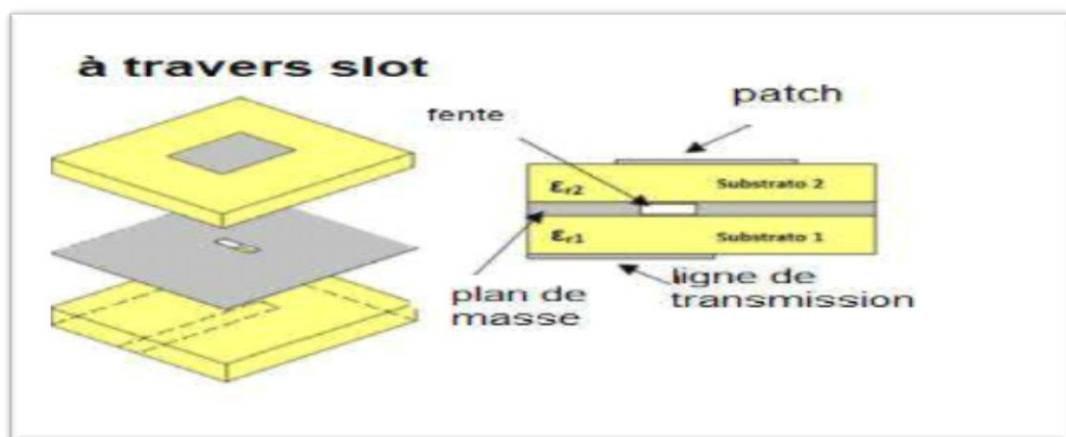
Inconvénients : Fabrication difficile.



D- Méthode de couplage électromagnétique ::

Avantages : Modélisation facile, et très faible niveau de rayonnement parasite.

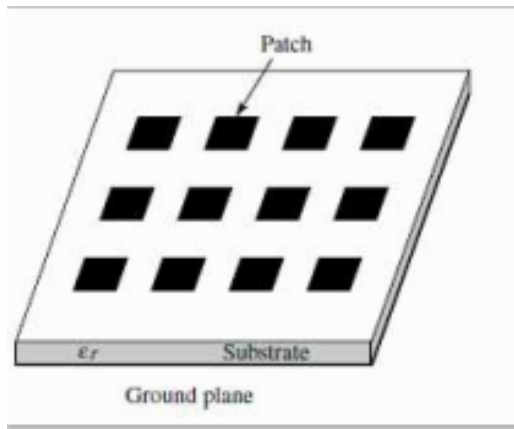
Inconvénients : Fabrication difficile.



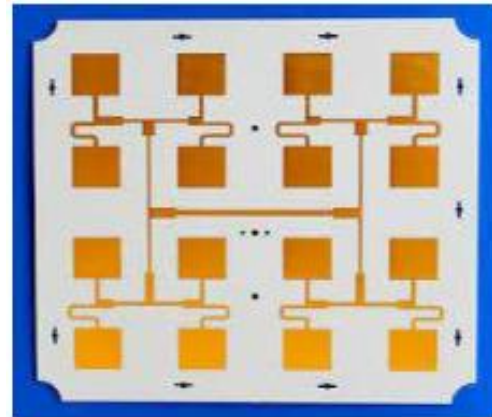
III.3.4 Réseau D'antennes Imprimées :

L'utilisation d'une antenne imprimée à patch unique s'avère souvent insuffisante pour répondre aux contraintes de rayonnement imposées. Des caractéristiques spécifiques comme un gain élevé ou un lobe principal conformé ne peuvent généralement être obtenus que par le regroupement de plusieurs sources rayonnantes pour former un système appelé réseau d'antennes [25,28]. L'avantage de l'assemblage de plusieurs antennes primaires permet donc d'obtenir des rayonnements hautement dirigés, En fonction du nombre et de la

nature des éléments, de la forme de leur alimentation électrique ainsi que de leur disposition technique dans le réseau.



Géométrie d'un réseau antenne patch 4x4



Réseau antenne patch réel 4x4

IV. L'antenne 5G microwave :

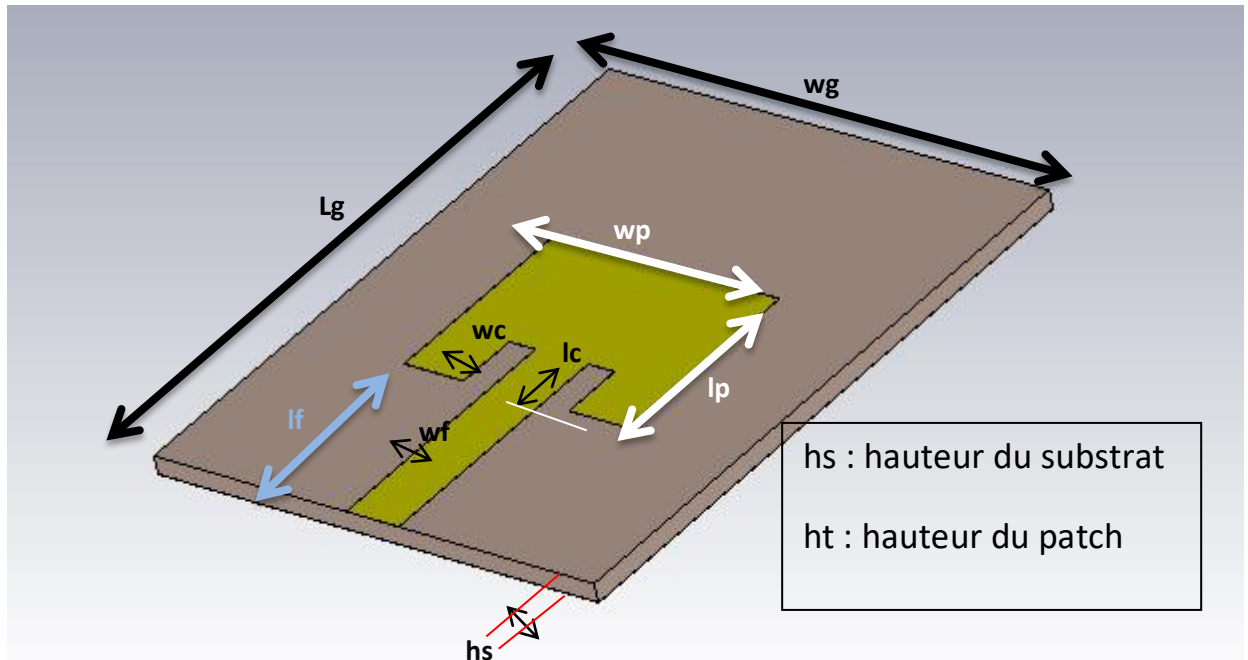
Pour la 5G, les opérateurs de téléphonie vont dans un premier temps utiliser la bande comprise entre 3.400 et 3.800 MHz, soit entre 3,4 et 3,8 gigahertz (GHz). La 5G offrira un débit plus important, même s'il demeure difficile d'estimer avec précision le gain pour le consommateur final. « Les premiers clients équipés d'un téléphone 5G ne verront pas d'écarts gigantesques par rapport à la 4G déjà existante et performante. Ce sera progressif, au fur et à mesure du déploiement », assure Alain Sibille, professeur à Télécom ParisTech et spécialiste des réseaux.

IV.1. Conception de l'antenne patch résonante à 3.6 GHz

| | Valeur | Pourquoi ? |
|-----------------------------|--------------------------------------|--|
| Technologie | Microstrip | Simple |
| La bande passante | [3.4 GHz, 3.8 GHz] 400 MHz | La même bande de 4G qui va être utilisée |
| Fréquence centrale | 3.6 GHz | $\frac{3.8 - 3.4}{2}$ |
| Gain | >12 GHz | Antenne doit atteindre un gain élevé |
| Taille | 15x15 cm ² | Pour une tablette |
| Directivité | Angle d'ouverture $\leq 30^\circ$ | Antenne 5G doit être fortement directive |
| S₁₁ | S ₁₁ (3.4 ou 3.8) < -6 dB | Réseau mobile |
| Matériel de substrat | rogers rt5880 $\epsilon_r = 2.2$ | bon gain |

Matériel de patch : Copper avec h = 0.035 mm.

IV.2. Dimensionnement :



$$w_g = \frac{c}{2 \times f_0 \times \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} = \frac{3 \times 10^6}{2 \times 3.6 \times 10^6 \times \sqrt{\frac{2.2 + 1}{2}}} = 32.94 \text{ mm}$$

$$w_f = \left(\frac{377}{Z_0 \sqrt{\epsilon}} - 2 \right) h, \quad Z = 50 \Omega \rightarrow w_f = \left(\frac{377}{50 \sqrt{\epsilon_{2.2}}} - 2 \right) 1.6 = 4.93 \text{ mm}$$

| Paramètre | Valeur (mm) | Paramètre | Valeur (mm) |
|-----------|-------------|-----------|-------------|
| w_g | 59 | l_f | 25.383 |
| l_g | 81.9 | w_c | 2.465 |
| w_p | 32.94 | l_c | 8.317 |
| l_p | 27.23 | h_s | 1.6 |
| w_f | 4.93 | h_t | 0.035 |

IV.3. Simulation :

IV.3.1 .Coefficient de réflexion: S_{11} :

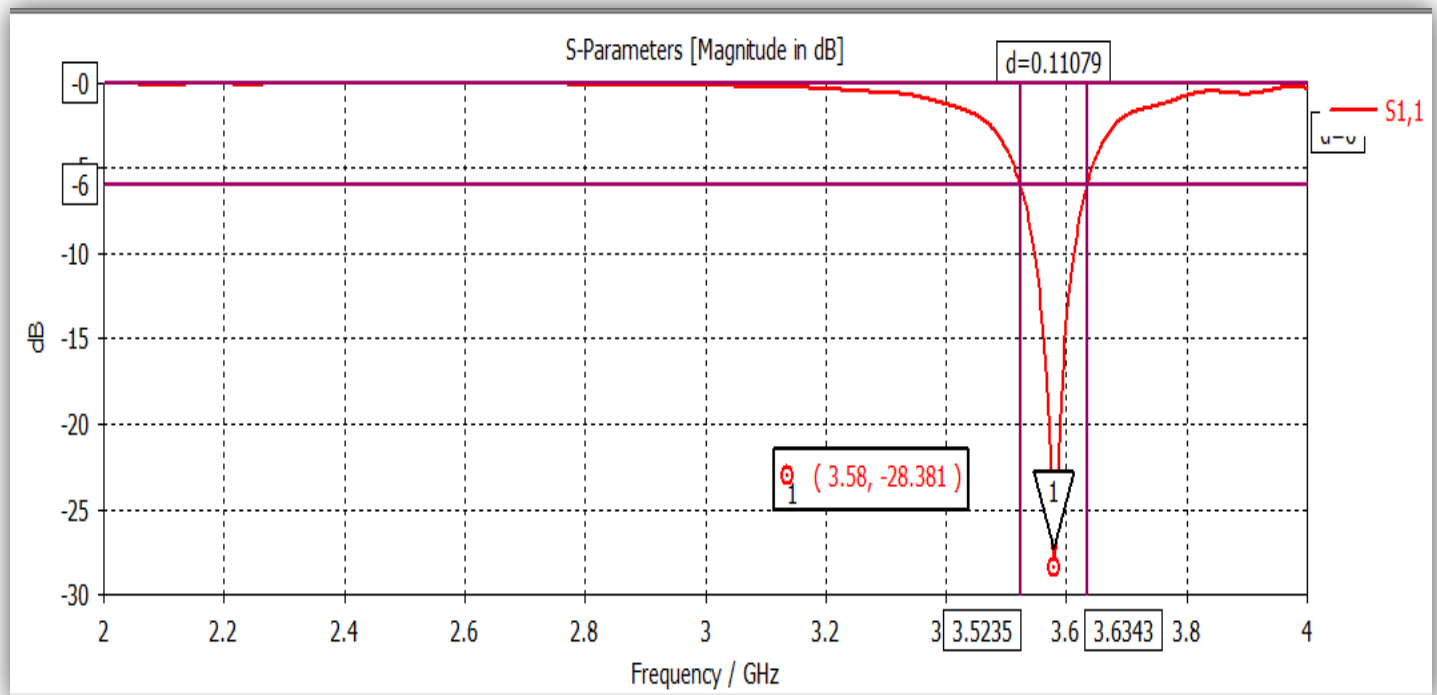


Figure : VSWR

On peut visualiser que l'antenne a une largeur de bande de **110.79 MHz** autour de la fréquence de résonance (**3.58 GHz**) dans l'intervalle (**3.5235 – 3.6343**) GHz.

IV.3.2 .VSWR :

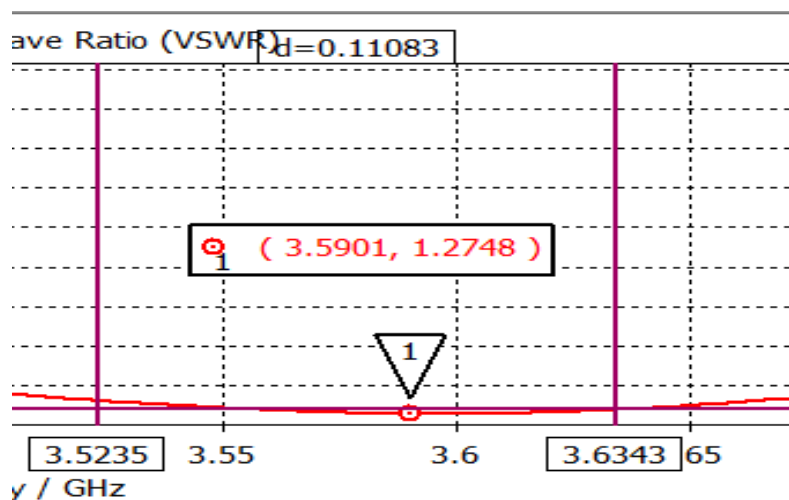


Figure : VSWR (valeur < 2)

IV.3.3 Diagramme de rayonnement :

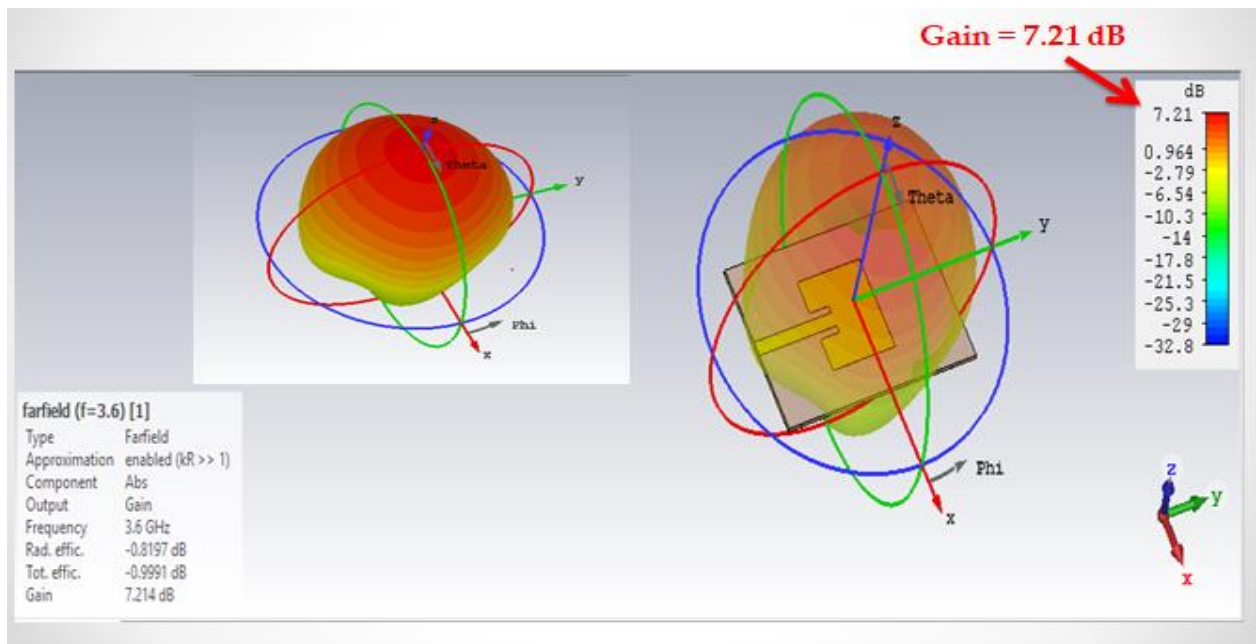


Figure 3D : Gain

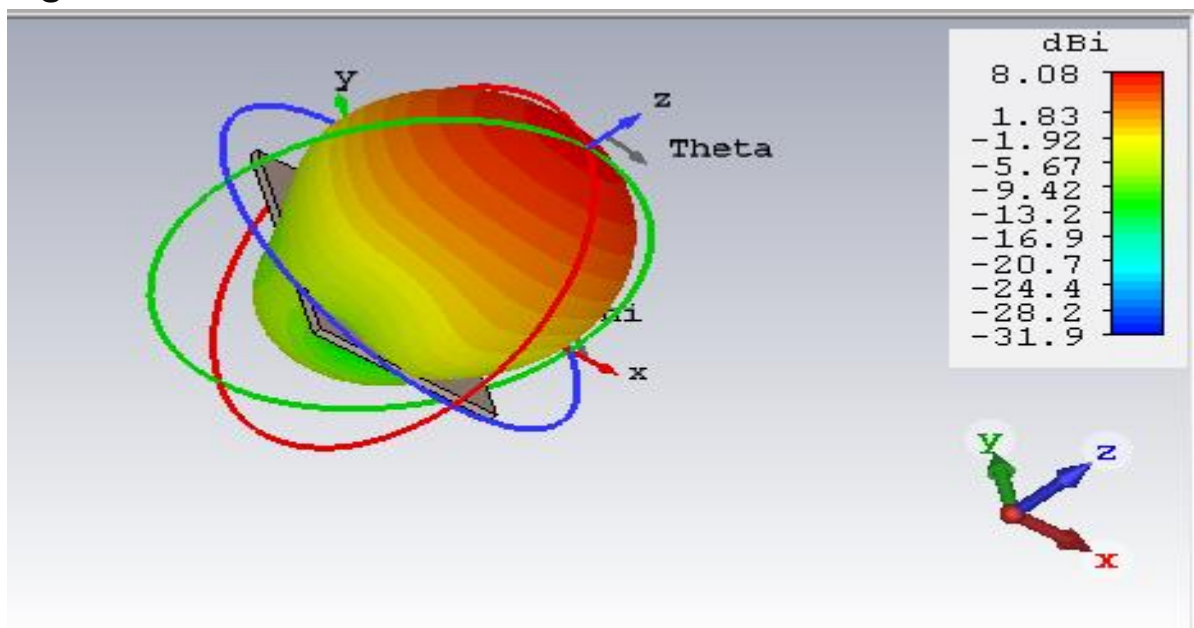


Figure 3D : Directivité

Le diagramme de rayonnement de l'antenne a une forme appropriée comme le montre les figures en dessus. Le rayonnement est concentré dans la partie supérieure de l'antenne. Le gain de l'antenne est 7.21 dB

IV.3.4 L'angle d'ouverture :

Phi = 0°

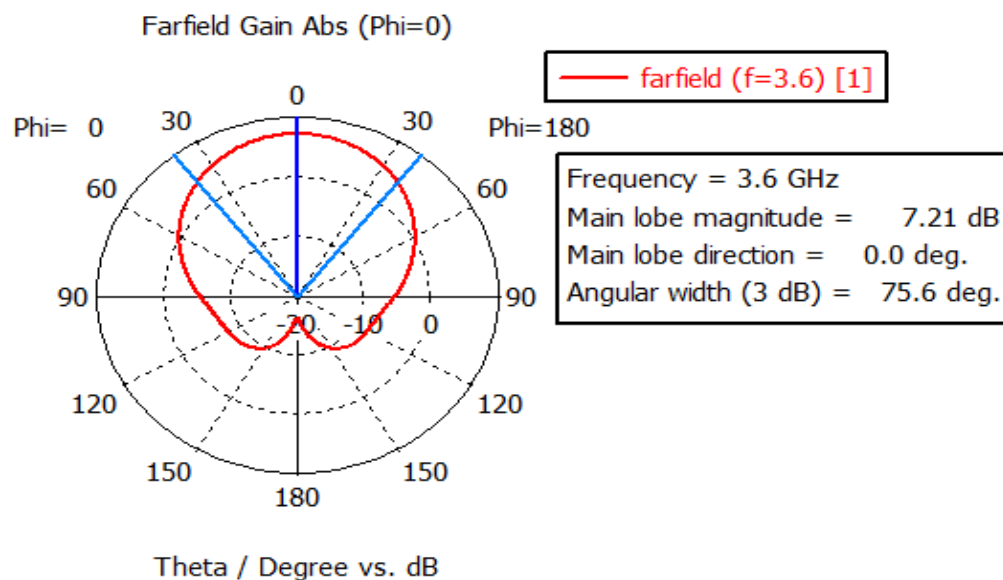


Figure 2D : diagramme de rayonnement

Phi = 90°

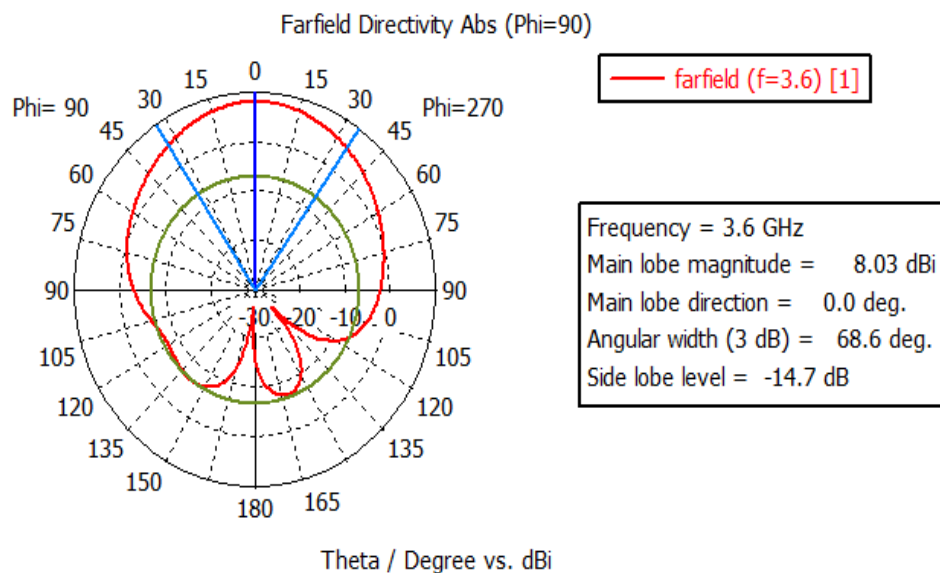


Figure 2D : diagramme de rayonnement

L'angle d'ouverture est : **75.6 °** (Phi = 0°), **68.6 °** (Phi = 90°)

IV.3.5. Tableau récapitulatif :

| | Antenne 5G | Objectif |
|--------------------------|---|----------|
| Fréquence centrale (GHz) | 3.58 | 3.6 |
| Bande passante (MHz) | 110.79 | 400 |
| Gain (dB) | 7.21 | >12 |
| Angle d'ouverture (deg) | 75.7 deg(Phi : 0°) 68.6 deg(Phi : 90°) | 30 ° |

On voit qu'on est loin un peu de nos objectifs, donc on doit :

- **Augmenter le gain**
- **Décaler la fréquence de résonance**
- **Élargir la bande passante**
- **Réduire l'angle d'ouverture**
-

IV.3.6. Amélioration: Donc comment on va procéder ?

Pour changer La fréquence de résonance et La bande passante on doit donc jouer sur les paramètres de l'antenne.

Pour augmenter le gain et réduire l'angle d'ouverture on doit utiliser un réseau d'antenne.

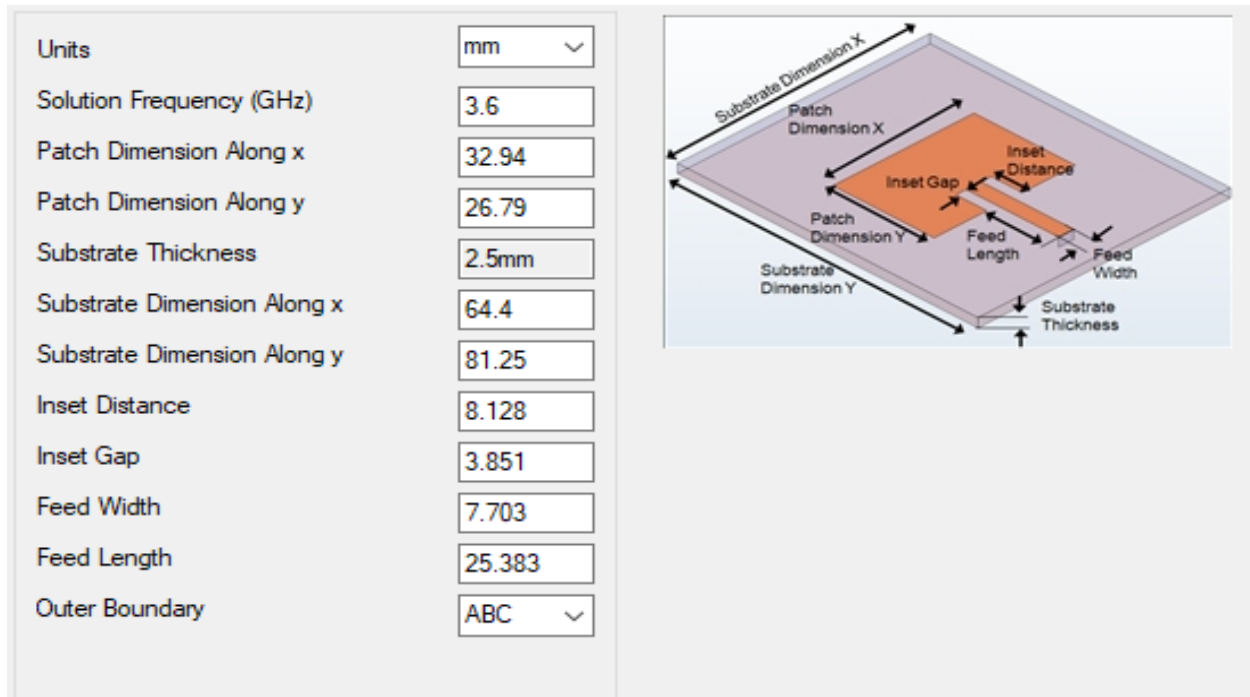
1) **La bande passante** est directement proportionnelle à l'épaisseur du substrat h , donc on augmenter h la bande va augmenter

$$\rightarrow h = 2.5 \text{ mm } (h_{\text{initiale}} = 1.5 \text{ mm})$$

2) **La fréquence** est inversement proportionnelle au longueur du Patch

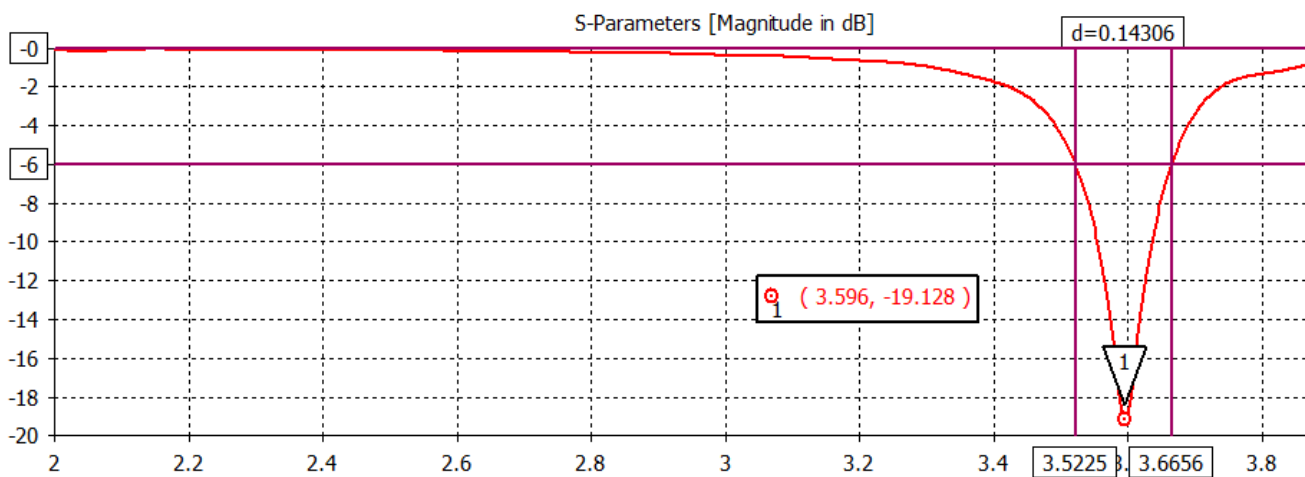
$$L = \frac{c}{2 \times f_0 \times \sqrt{\epsilon}} \rightarrow L = 26.79 \text{ mm} \quad (L_{\text{initiale}} = 27.23 \text{ mm})$$

On recalcule tous les paramètres :



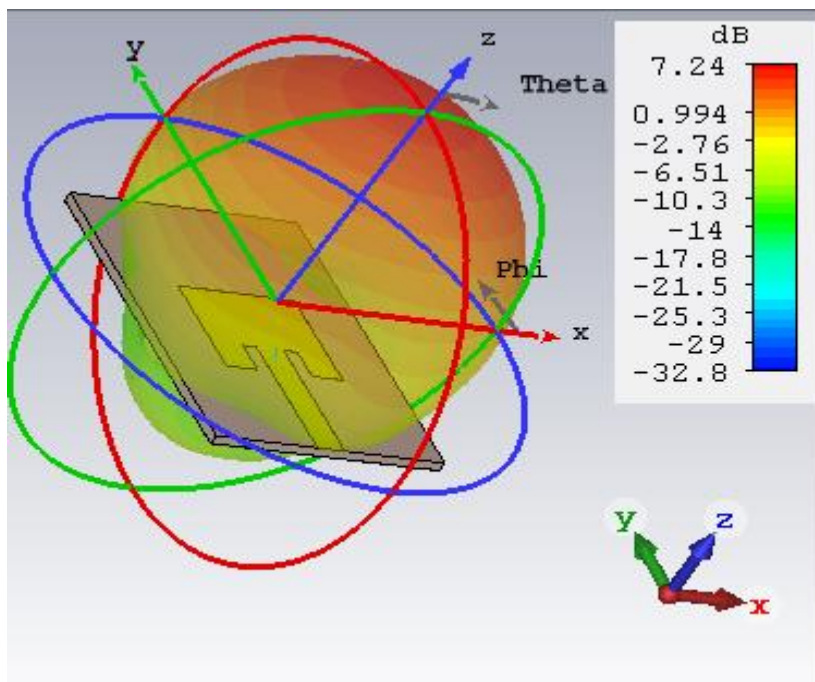
Les résultats :

-S₁₁ :

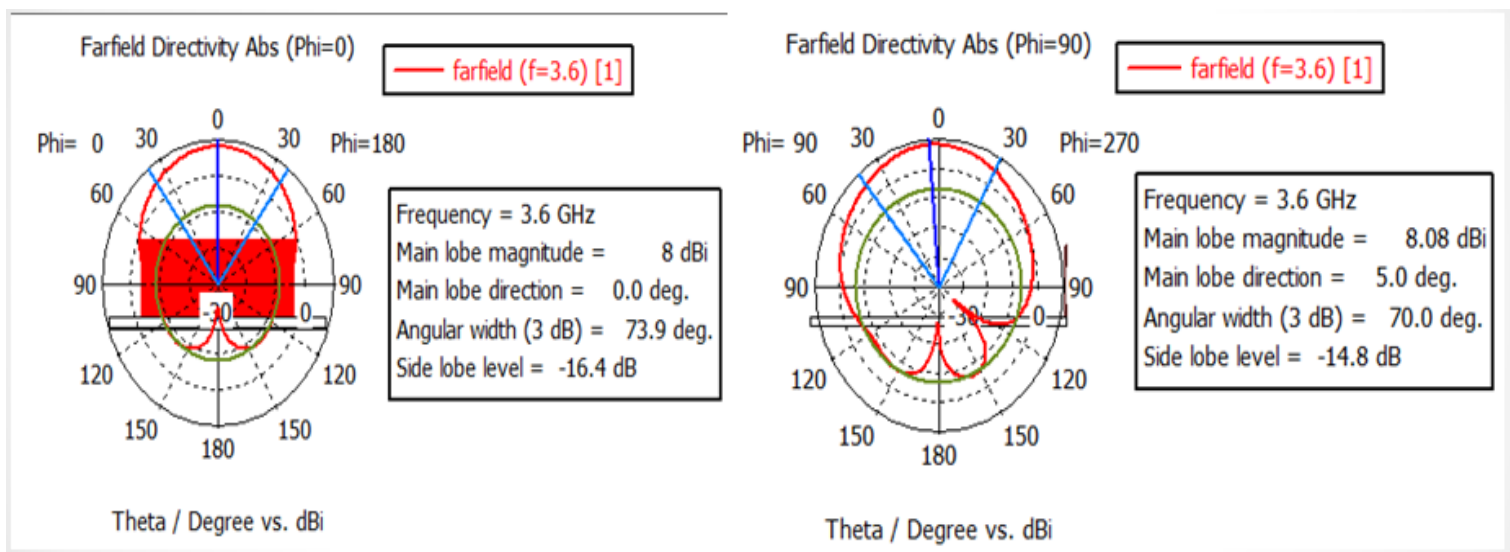


On trouve la bande passante est : 143.06 MHz

-Gain : Le gain = 7.24 dB



-L'angle d'ouverture : $\Phi = 0^\circ$ et $\Phi = 90^\circ$



Si on compare les résultats après optimisation on trouve :

| Longueur du patch(mm) | Fréquence centrale(GHz) | Bande passante(MHz) | Gain(dB) | L'angle d'ouverture (deg) |
|-----------------------|-------------------------|---------------------|----------|---|
| 27.23 | 3.58 | 110.79 | 7.21 | 75.7 deg(0°) 68.6 deg(90°) |

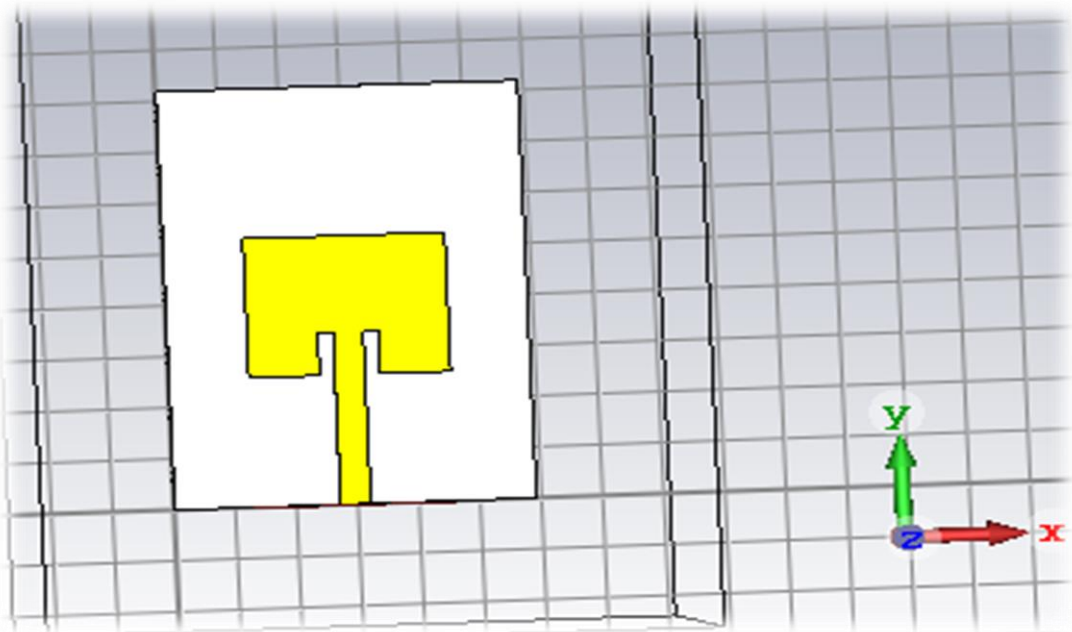
| Longueur du patch(mm) | Fréquence centrale(GHz) | Bande passante(MHz) | Gain(dB) | L'angle d'ouverture (deg) |
|-----------------------|-------------------------|---------------------|----------|---|
| 26.79 | 3.596 | 143.06 | 7.24 | 73.9 deg(0°) 70 deg(90°) |

Pour augmenter le gain et réduire l'angle d'ouverture on doit utiliser un **réseau d'antenne**.

Un alignement de n antennes suivant l'axe x (**réseau $nx1$**) va réduire l'angle d'ouverture pour **$\Phi = 0^\circ$** .

Un alignement de n antennes suivant l'axe y (**réseau $1xn$**) va réduire l'angle d'ouverture pour **$\Phi = 90^\circ$** .

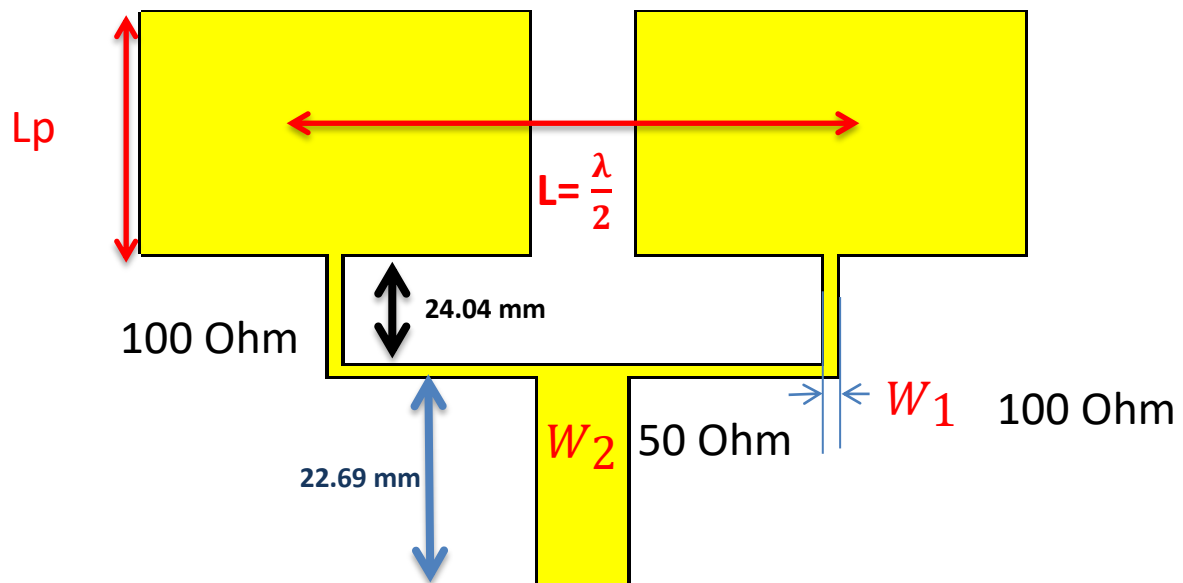
Donc l'objective est de construire un **réseau nxn** .



**V. Réseau 1x2
d'antenne :**

V.1. Conception :

Les valeurs sont mentionnées dans la figure ci-dessous :



La formule pour calculer la largeur de chaque ligne : $W = \left(\frac{377}{Z_0 \sqrt{\epsilon}} - 2 \right) h$

avec h : épaisseur du substrat, Z_0 est l'impédance de la ligne

$$Z = 100\Omega \rightarrow W1 = \left(\frac{377}{100\sqrt{2.2}} - 2 \right) 2.2 = 1.354 \text{ mm}$$

$$Z = 50\Omega \rightarrow W2 = \left(\frac{377}{50\sqrt{2.2}} - 2 \right) 2.2 = 7.708 \text{ mm}$$

$$Lp = 25 \text{ mm}$$

$$L = \frac{\lambda}{2} \text{ avec } \lambda = c \times f = 3.10^8 \times 3.6 = 83.33 \text{ mm}$$

V.2. Simulations :

V.2.1 .Coefficient de réflexion: S_{11} :

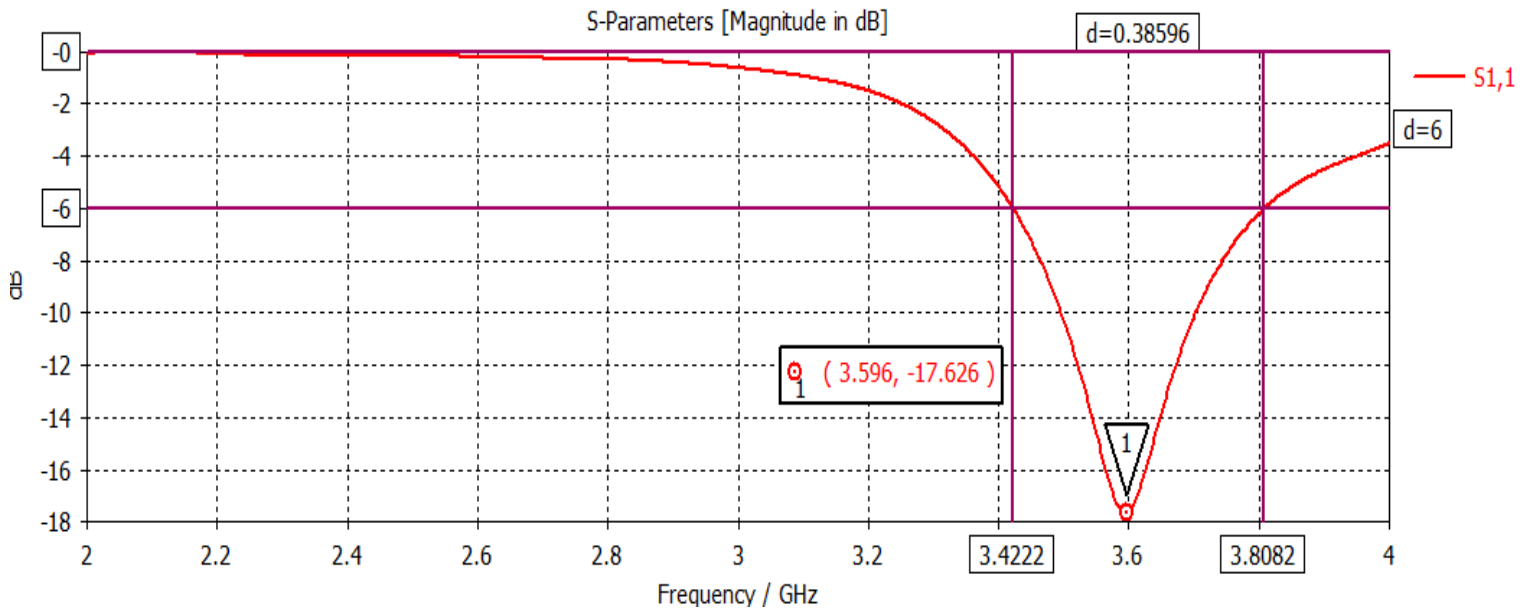


Figure : S_{11}

Notre nouvelle antenne a une largeur de bande de **385.96 MHz** autour de la fréquence de résonance (**3.596 GHz**) dans l'intervalle (**3.4222 – 3.8082**) GHz.

V.2.2 .VSWR :

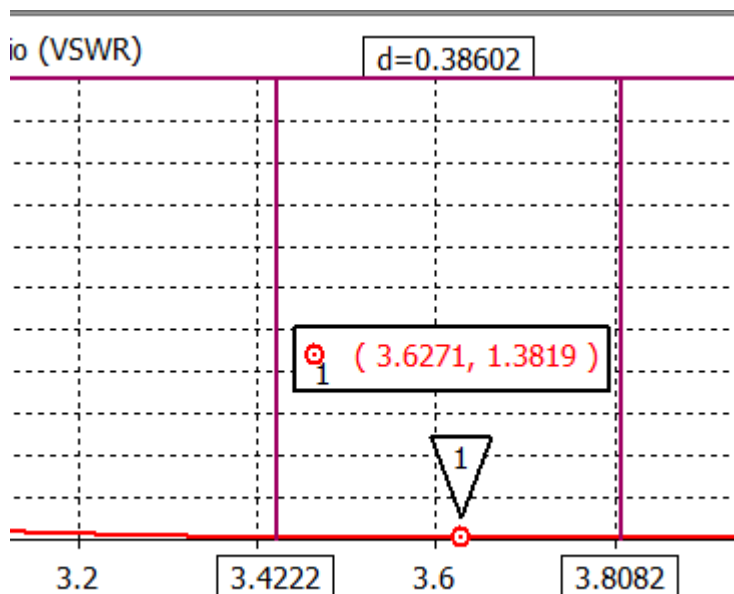


Figure : VSWR (valeur < 2)

L'antenne est bien adaptée.

V.2.3 Diagramme de rayonnement :

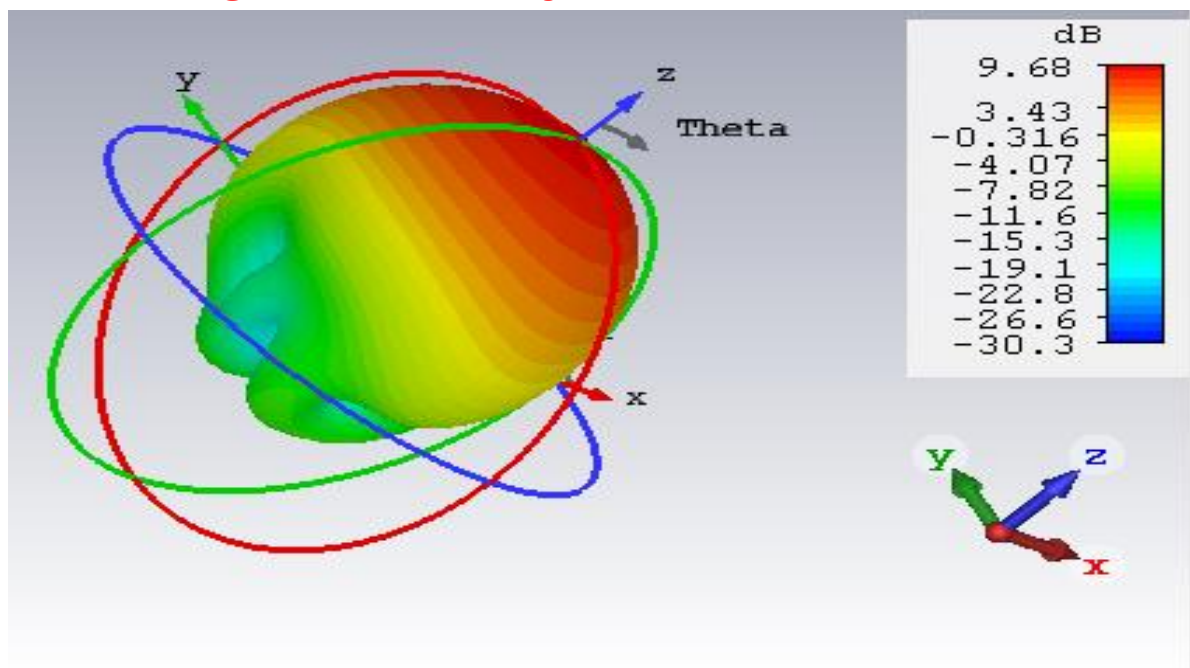


Figure 3D : Gain

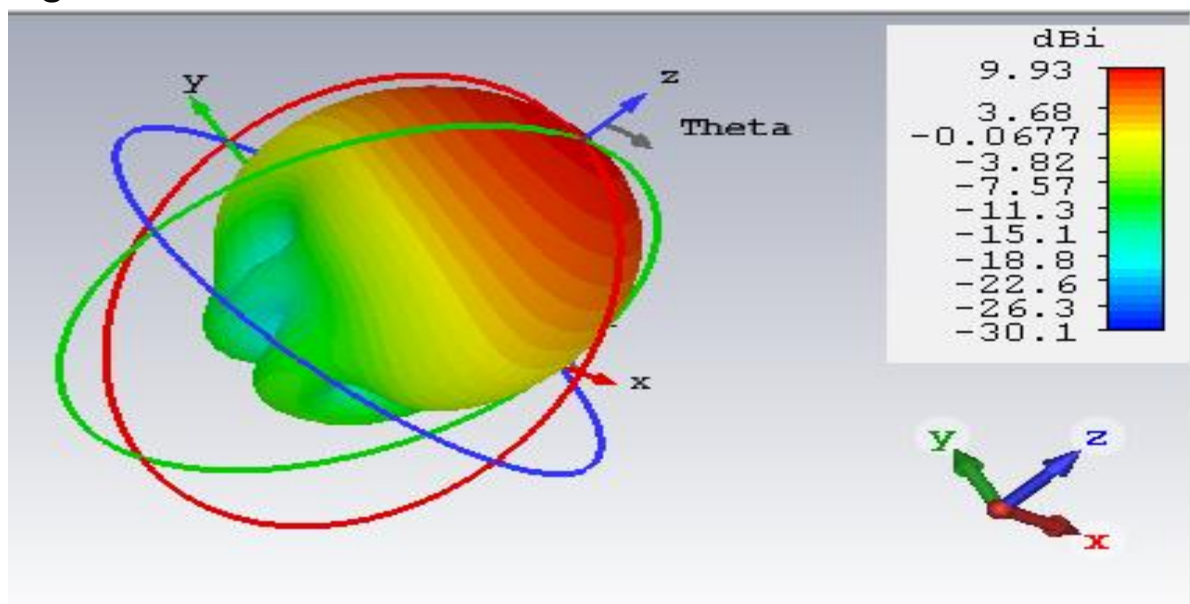


Figure 3D : Directivité

Le diagramme de rayonnement de l'antenne a une forme appropriée comme le montre les figures en dessus. Le rayonnement est concentré dans la partie supérieure de l'antenne. Le gain de l'antenne est **9.68 dB**

V.3.4 L'angle d'ouverture :

Phi = 0°

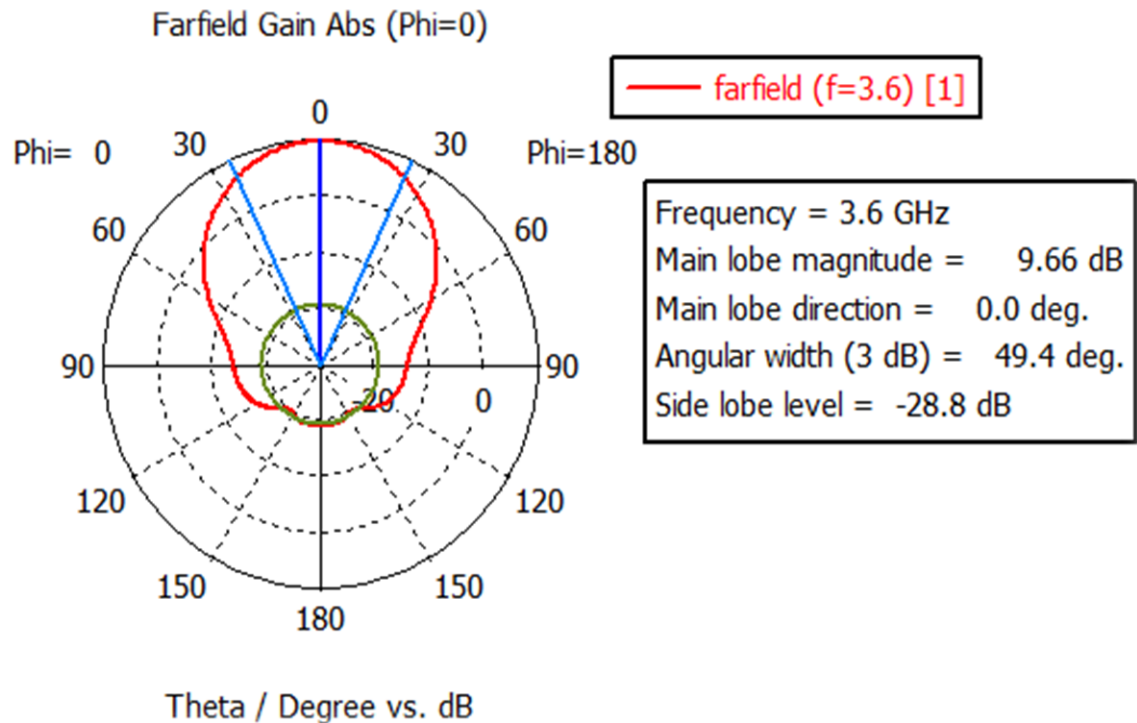


Figure 2D : diagramme de rayonnement

Phi = 90°

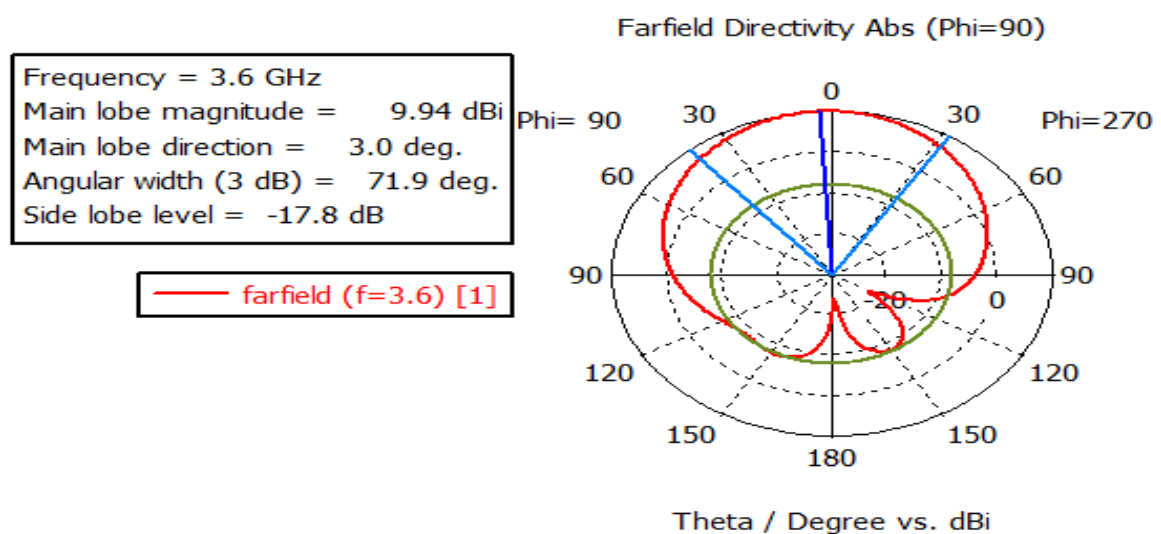


Figure 2D : diagramme de rayonnement

L'angle d'ouverture est : **49.4°** (Phi = 0°), **71.9°** (Phi = 90°)

V.3.5. Tableau récapitulatif :

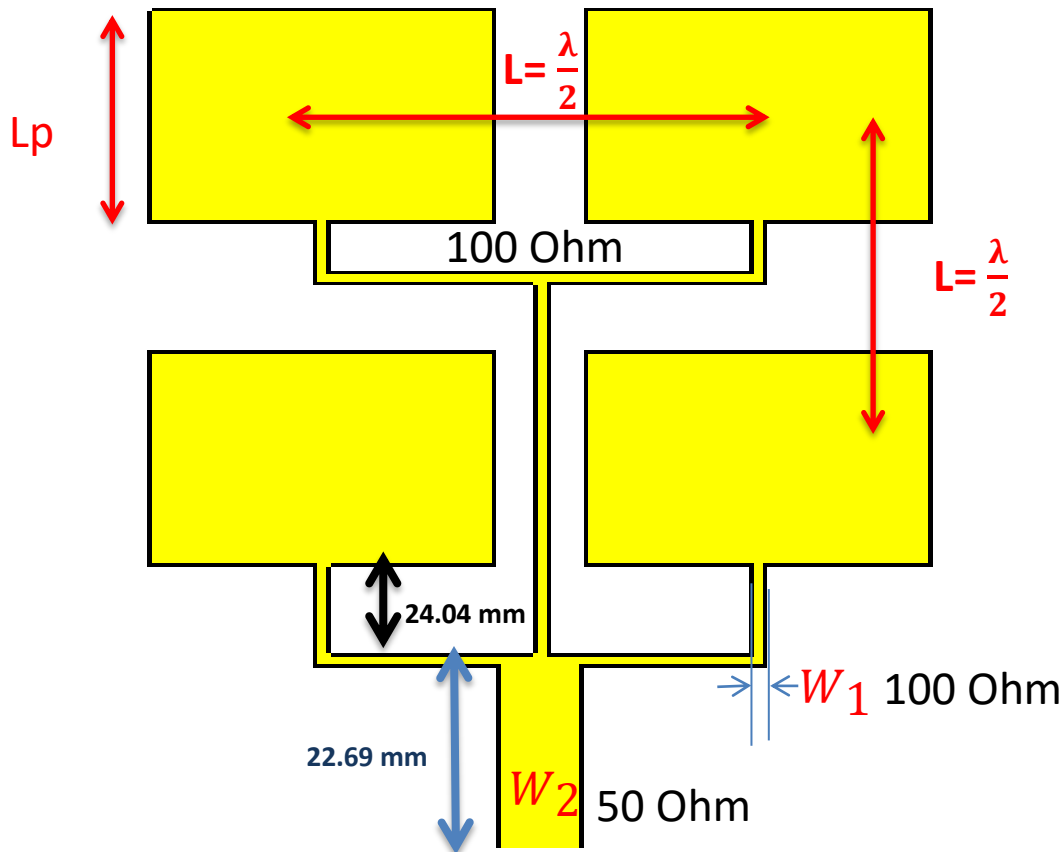
| Paramètre | Un seul antenne | Réseau 1x2 | Objective | précision |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|-------------------------|
| Fréquence central (GHz) | 3.596 | 3.596 | 3.6 | -0.004 |
| Bande passante (MHz) | 110.79 | 385.96 | 400 | -12.04 |
| Gain (dB) | 7.21 | 9.93 | >12 | -2.07 |
| Angle d'ouverture (deg) | 75.7 (0°) 68.6 (90°) | 49.4 (0°) 71.9 (90°) | <30 | 19.4 (0°) 41.9 (90°) |

On voit d'après le tableau en dessus on a approché un petit peu de nos objectifs, même si cela on doit encore améliorer les performances de notre antenne. Donc on passe à un réseau 2x2 d'antenne.

VI. Réseau 2x2 d'antenne :

VI.1. Conception :

Les valeurs sont mentionnées dans la figure ci-dessous :



La formule pour calculer la largeur de chaque ligne : $W = \left(\frac{377}{Z_0 \sqrt{\epsilon}} - 2 \right) h$

avec h : épaisseur du substrat, Z_0 est l'impédance de la ligne

$$Z = 100\Omega \rightarrow W_1 = \left(\frac{377}{100\sqrt{2.2}} - 2 \right) 2.2 = 1.354 \text{ mm}$$

$$Z = 50\Omega \rightarrow W_2 = \left(\frac{377}{50\sqrt{2.2}} - 2 \right) 2.2 = 7.708 \text{ mm}$$

$$L_p = 25 \text{ mm}$$

$$L = \frac{\lambda}{2} \text{ avec } \lambda = c \times f = 3.10^8 \times 3.6 = 83.33 \text{ mm}$$

VI.2. Simulations :

VI.2.1 .Coefficient de réflexion: S_{11} :

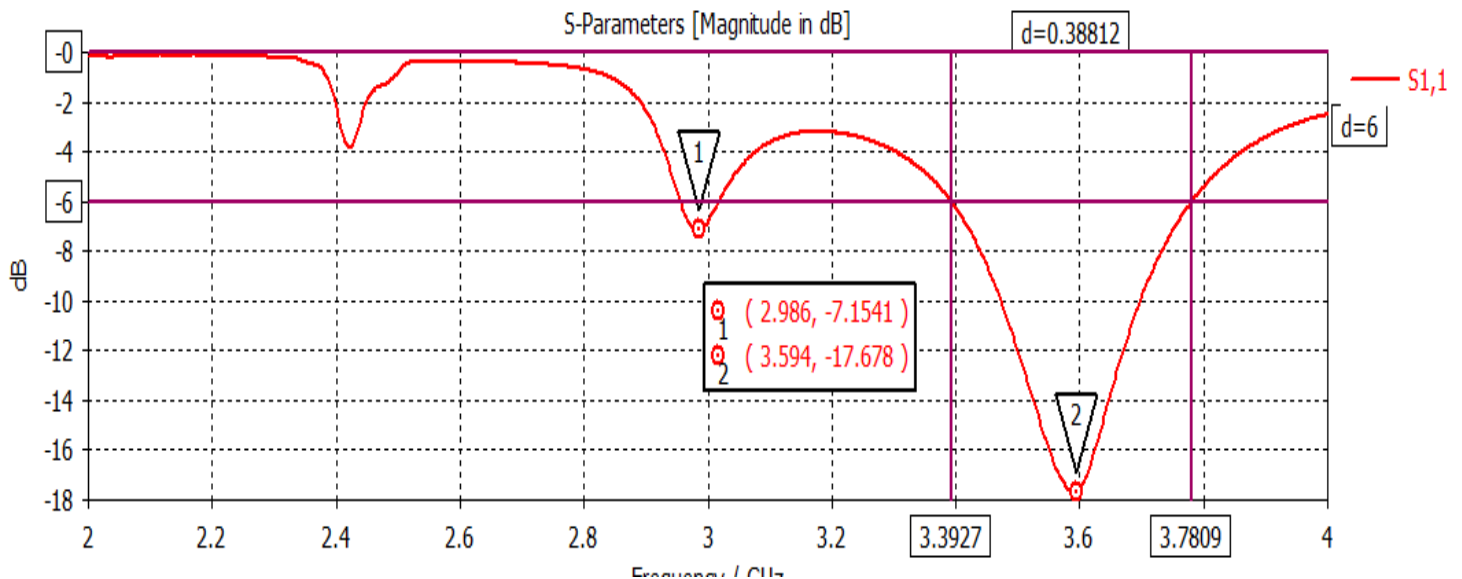


Figure : S_{11}

Notre nouvelle antenne a une largeur de bande de **388.12 MHz** autour de la fréquence de résonance (**3.594 GHz**) dans l'intervalle (**3.3927 – 3.7809**) GHz. La première fréquence n'a pas une grande influence puisque $S_{11}(f_1) = -7$ dB.

VI.2.2 .VSWR :

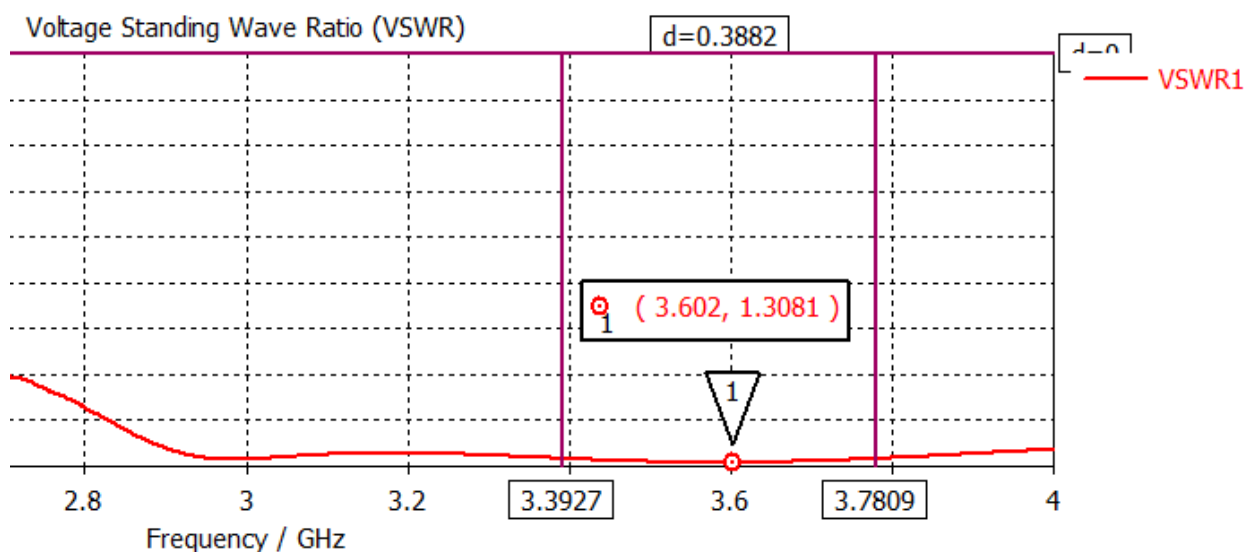


Figure : VSWR (valeur < 2)

L'antenne est bien adaptée.

VI.2.3 Diagramme de rayonnement :

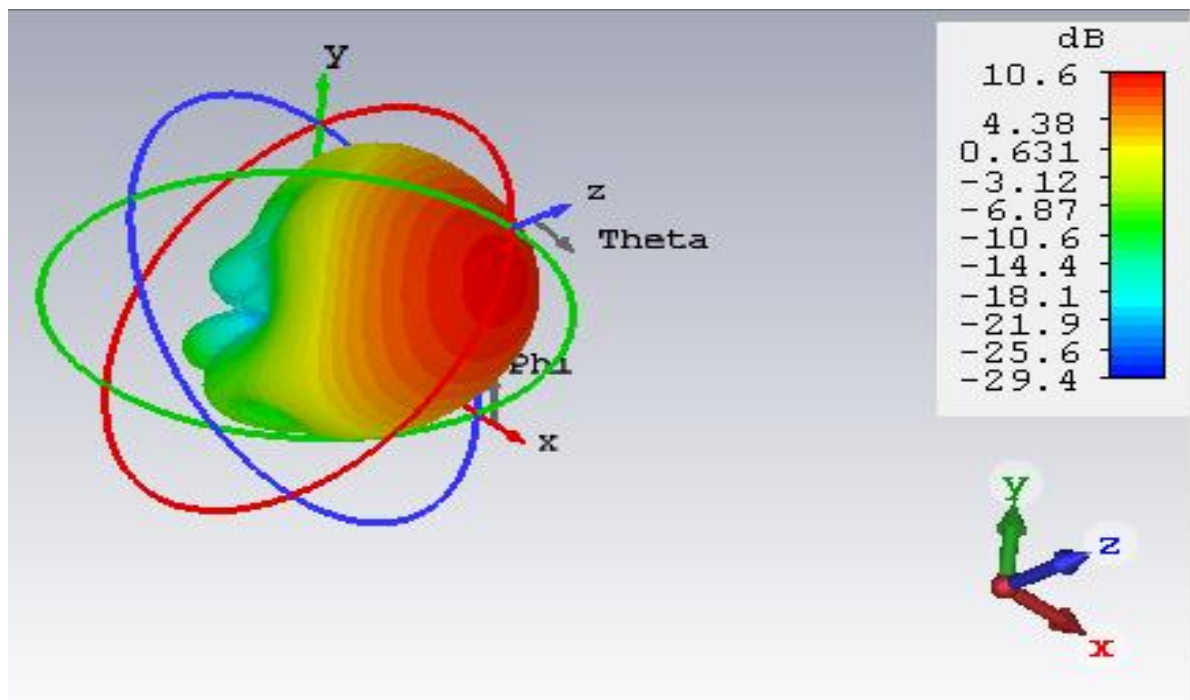


Figure 3D : Gain

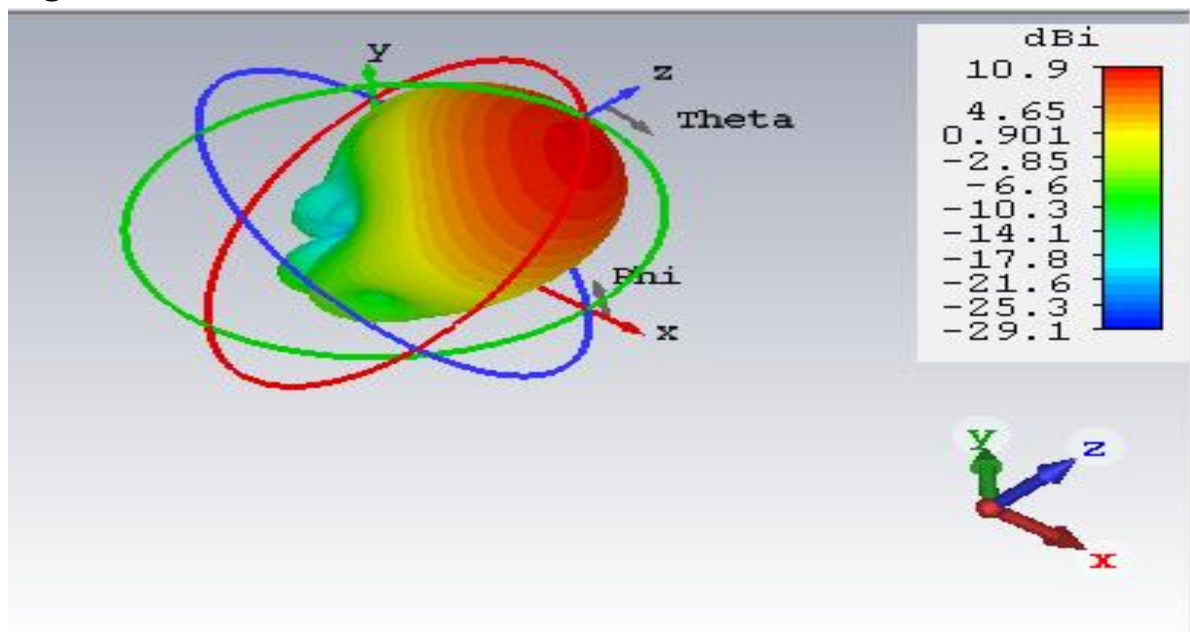


Figure 3D : Directivité

Le diagramme de rayonnement de l'antenne a une forme appropriée similaire a celle de dernière antenne. Le gain de l'antenne est **10.6 dB**.

VI.2.4 L'angle d'ouverture :

Phi = 0°

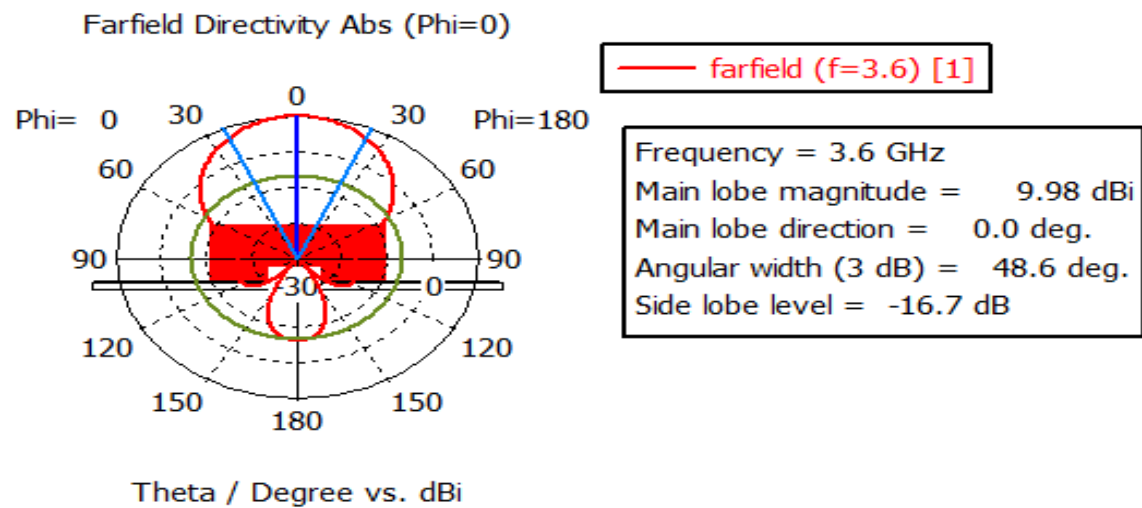


Figure 2D : diagramme de rayonnement

Phi = 90°

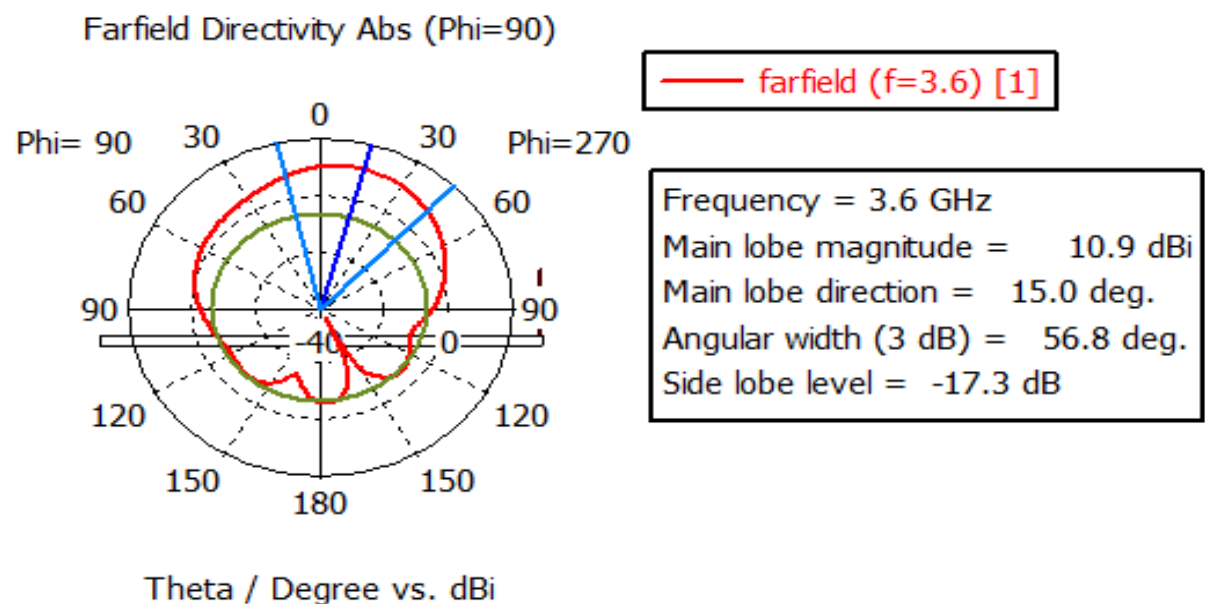


Figure 2D : diagramme de rayonnement

L'angle d'ouverture est : **48.6°** (Phi = 0°), **56.8°** (Phi = 90°)

VI.2.5. Tableau récapitulatif :

| Paramètre | Réseau 2x2 | Objective |
|--------------------------|--------------------------------|---------------|
| Fréquence centrale (GHz) | 3.594 | 3.6 |
| Bande passante (MHz) | 388.12 | 400 |
| Gain (dB) | 10.6 | >12 |
| Angle d'ouverture (deg) | 48.6 (0°) 56.8(90°) | <30 |

On voit d'après le tableau en dessus on a approché de nos objectifs avec un réseau d'antennes 2x2.

VII. Comparaison des 3 antennes :

VII.1 Table 3 antennes :

Dans le tableau en dessous, on récapitule tous les résultats des 3 antennes conçus :

| Paramètre | Un seul antenne | Réseau 1x2 | Réseau 2x2 | Objective |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-----------|
| Fréquence centrale (GHz) | 3.596 | 3.596 | 3.594 | 3.6 |
| Bande passante (MHz) | 110.79 | 385.96 | 388.12 | 400 |
| Gain (dB) | 7.21 | 9.93 | 10.6 | >12 |
| Angle d'ouverture (deg) | 75.7 (0°) 68.6 (90°) | 49.4 (0°) 71.9 (90°) | 48.6 (0°) 56.8(90°) | <30 |

Comme vous voyez, à l'aide d'un réseau d'antenne 2x2, on a pu approcher de nos objectives.

VIII. Conclusion :

VIII.1 Conclusion finale :

L'antenne que nous avons conçue a bien répondu au cahier des charges pour le réseau 5G, avec un gain de 10.6 dB, une bande passante de 388 MHz centrée sur 3.594 GHz et un angle d'ouverture de 50°, notre antenne peut être déployée pour des services qu'un réseau 5G peut offrir.

Les conclusions suivantes ont été tirées :

- 1) L'utilisation d'un réseau d'antenne nous a permis d'atteindre un gain supérieur à 10 dB qu'une antenne patch rectangulaire ne peut pas l'atteindre.
- 2) Le réseau 2x2 d'antenne patch a permis d'avoir une bande de fréquence un petit peu large. Une antenne patch simple donne toujours une bande étroite.
- 3) L'alignement des antennes a permis de réduire l'angle d'ouverture, car l'interaction de plusieurs lobes primaires donne un lobe étroit.
- 4) Cette antenne va être utilisée pour la première bande de fréquence (3.4-3.8 GHz) qui est déjà utilisée pour la 4G. Cette étape est simple pour le déploiement du réseau 5G puisque elle ne demande pas un grand changement d'infrastructure.

