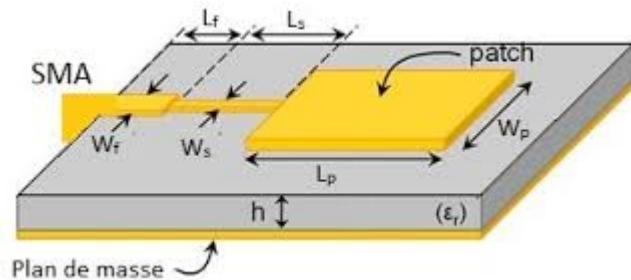


**Filière : Électroniques des Systèmes Embarqués et
Télécommunications**
Niveau : 4ème Année



**Modélisation et Conception d'une Antenne
Patch Rectangulaire**

Réalisé par :

- Kaaouiche Yesmin
- Sfaxi Hamza

Table des matières

I. Introduction :	2
II. Objectifs :	2
III. Théorie et principes de base :	2
1. Définition d'une antenne patch:.....	2
2. Principe de fonctionnement :.....	3
3. Avantages et inconvénients :.....	4
a) Avantages:.....	4
b) Inconvénients:.....	4
4. Paramètres clés :.....	5
a) Fréquence de résonance :.....	5
b) Bande passante :.....	5
c) Impédance d'entrée :.....	5
d) Diagramme de rayonnement :.....	5
5. L'antenne rectangulaire :.....	6
a) Alimentation des éléments rayonnants:.....	6
b) Mécanismes de rayonnement de l'antenne patch rectangulaire :.....	8
6. Conception et simulation :.....	8
a) Outils utilisés :.....	8
b) Spécifications de l'antenne :.....	9
c) Résultats de conception et des simulations:.....	15
IV. Conclusion :	22

I. Introduction :

L'antenne patch est un composant essentiel dans de nombreuses applications modernes de communications, notamment dans les systèmes micro-ondes et les technologies sans fil. Elle se distingue par sa structure plane et compacte, souvent réalisée à partir de circuits imprimés. Ce type d'antenne est particulièrement adapté aux applications où l'encombrement et la discréetion sont des critères importants, comme dans les véhicules terrestres, les avions, et les dispositifs portables.

À travers ce TP, nous aborderons les principes fondamentaux de son fonctionnement, les méthodes de conception et la modélisation de cette antenne en utilisant des paramètres géométriques et électromagnétiques.

II. Objectifs :

- Comprendre les principes de base de l'antenne patch : Étudier son fonctionnement, y compris le rôle des éléments métalliques et du substrat diélectrique.
- Apprendre à dimensionner une antenne patch : Calculer les dimensions (largeur et longueur) du patch en fonction de la fréquence de résonance et des propriétés du substrat.
- Modéliser une antenne patch rectangulaire : Utiliser les équations de résonance pour déterminer les dimensions optimales du patch en fonction des paramètres donnés.
- Analyser les performances de l'antenne : Étudier le diagramme de rayonnement de l'antenne, afin de visualiser la directionnalité, la largeur du faisceau, et les lobes secondaires. Évaluer également d'autres performances telles que la bande passante, le gain, et le coefficient de réflexion (S_{11}) pour juger de l'efficacité de la conception.

III. Théorie et principes de base :

1. Définition d'une antenne patch:

L'antenne patch est une antenne planaire de type microstrip, souvent utilisée dans les applications de communication sans fil. Elle est composée principalement d'un patch conducteur monté sur un substrat diélectrique avec un plan de masse métallique au dos, figure 1 . La forme la plus courante de ce patch est rectangulaire ou carrée, mais il existe

aussi des variantes circulaires et autres formes géométriques. Ces antennes sont généralement compactes, légères, et adaptées aux fréquences de fonctionnement élevées.

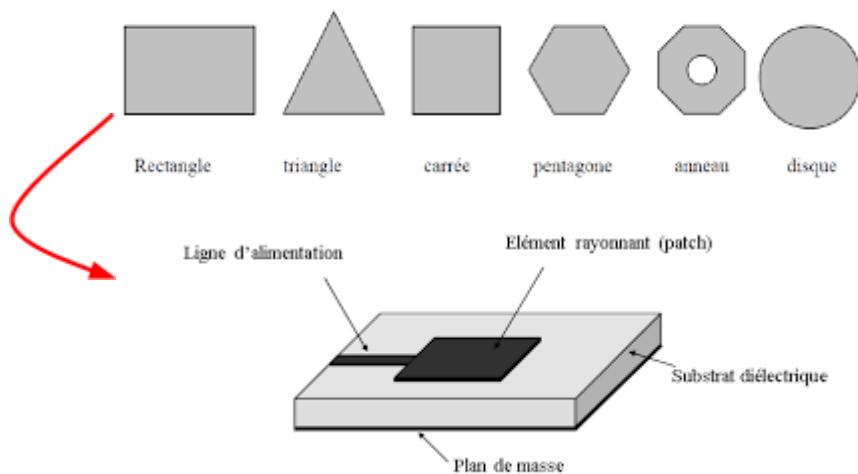


Figure 1 : Conception d'une antenne

2. Principe de fonctionnement :

L'antenne patch fonctionne par résonance électromagnétique. Lorsqu'elle est excitée par une source de signal, le patch génère des ondes électromagnétiques, figure 2, qui se propagent à travers l'espace, produisant un diagramme de rayonnement caractéristique.

La fréquence de résonance est déterminée par les dimensions du patch, notamment la longueur et la largeur de celui-ci. Lorsque la longueur du patch est égale à un quart de la longueur d'onde à la fréquence désirée, l'antenne résonne efficacement et émet des ondes.

Le patch est généralement alimenté via un micro-circuit de transmission (comme une ligne microstrip ou un coaxial), ce qui permet de transférer l'énergie électromagnétique du générateur à l'antenne. Les dimensions du patch ainsi que la méthode d'alimentation influencent les performances de l'antenne, notamment sa bande passante et son impédance d'entrée.

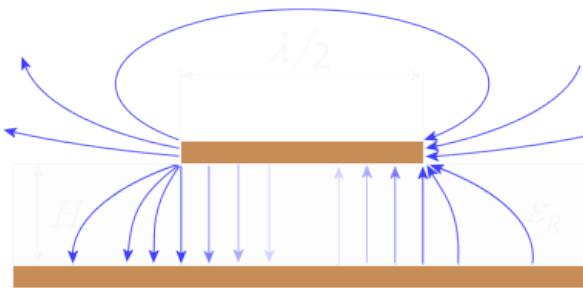


Figure 2 : Les ondes électromagnétiques générées dans l'antenne

3. Avantages et inconvénients :

a) Avantages:

Les antennes microruban se distinguent par une série d'avantages notables par rapport aux antennes micro-ondes traditionnelles. Elles se révèlent particulièrement efficaces sur une vaste gamme de fréquences, allant d'environ 100 MHz jusqu'à 100 GHz.

Parmi les points forts de ces antennes, on peut citer :

- **Compacité** : Les antennes patch sont généralement de petite taille, ce qui les rend adaptées aux appareils mobiles et aux applications où l'espace est limité.
- **Facilité de fabrication** : Leur conception simple à base de circuits imprimés permet une production à faible coût et une intégration facile dans des systèmes complexes.
- **Large éventail d'applications** : Elles sont utilisées dans une variété de domaines, y compris les communications sans fil, les satellites, le GPS, etc.
- **Adaptabilité** : L'antenne patch peut être conçue pour fonctionner dans différentes plages de fréquences.

b) Inconvénients:

- **Bande passante étroite** : Les antennes patch ont souvent une bande passante étroite, bien que cela puisse être amélioré par des techniques de conception avancées.
- **Gain relativement faible (6 dB)** : Comparée à d'autres types d'antennes, le gain de l'antenne patch est modéré.
- **Sensibilité à l'environnement** : La performance peut être affectée par des variations dans l'environnement, notamment la température et les matériaux à proximité.
- Difficulté d'élaborer des antennes à haute pureté de polarisation.
- Supportent uniquement des faibles puissances (<100w).

4. Paramètres clés :

a) Fréquence de résonance :

La fréquence de résonance est l'une des caractéristiques les plus importantes d'une antenne patch. Elle est définie comme la fréquence à laquelle l'antenne est capable de résonner efficacement pour émettre ou recevoir des signaux. Elle dépend des dimensions du patch, en particulier de sa longueur et de sa largeur. La fréquence de résonance (f_0) peut être approximée par la formule :

$$f_0 = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

Où :

- c est la vitesse de la lumière dans le vide.
- L est la longueur du patch.
- ϵ_{eff} est la permittivité effective du substrat.

b) Bande passante :

La bande passante d'une antenne patch définit l'étendue des fréquences sur lesquelles l'antenne peut fonctionner efficacement. Elle est influencée par l'épaisseur du substrat, la taille du patch et la méthode d'alimentation. Les antennes patch classiques ont une bande passante étroite, mais cette caractéristique peut être améliorée en utilisant des techniques comme l'utilisation de plusieurs éléments radiants ou la conception de structures complexes.

c) Impédance d'entrée :

L'impédance d'entrée de l'antenne patch est l'impédance que l'antenne présente à la ligne de transmission qui la connecte au circuit de source. Une impédance d'entrée bien ajustée est cruciale pour maximiser le transfert d'énergie entre l'antenne et la source. Typiquement, l'impédance de l'antenne patch est de 50 ohms, mais cela peut varier en fonction de la conception et des objectifs du système.

d) Diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement , représenté dans la figure 3, représente la distribution de l'énergie radiée par l'antenne dans l'espace. Pour une antenne patch, le diagramme de rayonnement est généralement directionnel, avec une forte concentration d'énergie dans une direction spécifique. L'orientation du patch et la méthode d'alimentation influencent la forme et la largeur du faisceau. Le diagramme peut être ajusté en fonction de l'application en modifiant la forme et les dimensions de l'antenne.

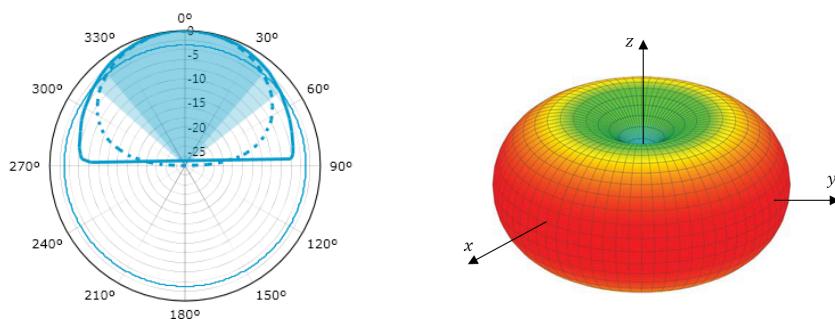


Figure 3 :Diagramme de rayonnement

5. L'antenne rectangulaire :

a) Alimentation des éléments rayonnants:

Dans les antennes patch rectangulaires, plusieurs méthodes d'alimentation sont utilisées pour exciter le patch et produire un rayonnement efficace. Les principales techniques sont :

- **Alimentation par ligne micro-ruban** : La plus courante, où une ligne de transmission est connectée directement au patch. Elle est facile à concevoir et à fabriquer, mais présente une bande passante modérée.

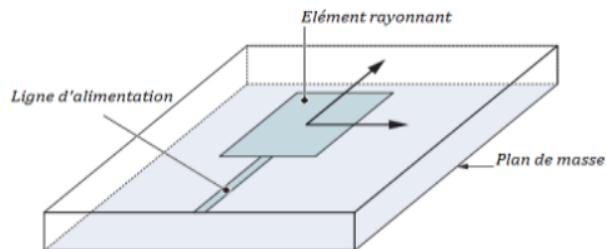


Figure 4 : Alimentation par ligne micro-ruban

- **Alimentation par sonde coaxiale** : Une sonde verticale connectée au centre du patch permet une bonne adaptation d'impédance, mais peut compliquer la fabrication.

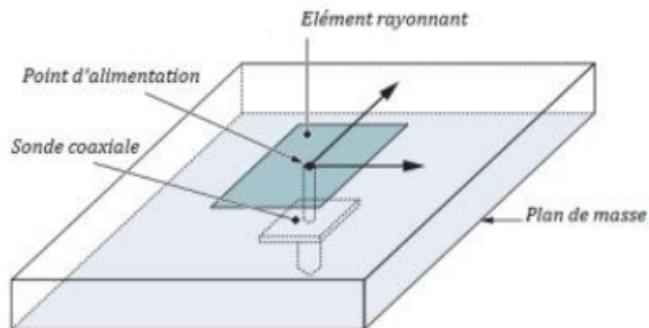


Figure 5 : Alimentation par sonde coaxiale

- **Alimentation par fente (aperture coupling)** : Utilise une ouverture dans le plan de masse pour coupler le signal au patch. Elle offre une meilleure isolation entre la ligne d'alimentation et le patch, au prix d'une complexité de fabrication plus grande.

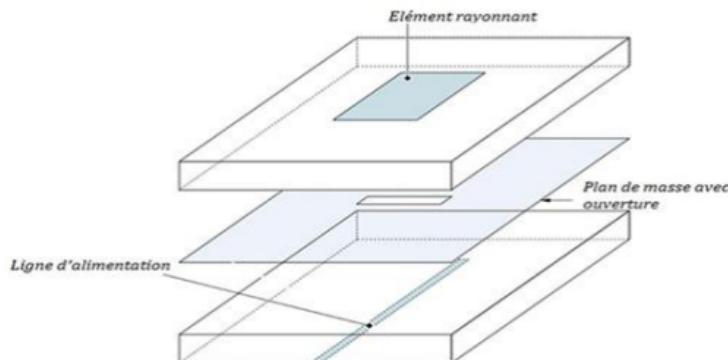


Figure 6 : Alimentation par fente

- **Alimentation par couplage électromagnétique** : Méthode sans contact direct, utilisant le champ électromagnétique pour alimenter le patch. Elle permet une bonne adaptation, mais nécessite un ajustement plus précis.

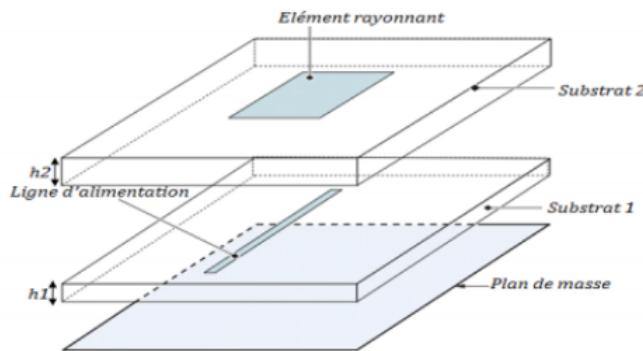


Figure 7 : Alimentation par couplage électromagnétique

b) Mécanismes de rayonnement de l'antenne patch rectangulaire :

Le rayonnement d'une antenne patch rectangulaire repose sur le principe de résonance électromagnétique, figure 8 . Lorsque l'antenne est alimentée par une ligne de transmission, une onde se propage jusqu'au patch. Ce dernier agit comme une cavité résonante : il accumule de l'énergie électromagnétique et la rayonne principalement par ses bords ouverts.

Le mode de fonctionnement le plus efficace se produit lorsque la longueur du patch est égale à la moitié de la longueur d'onde guidée. Dans cette condition, des ondes stationnaires se forment, créant des distributions de courant et de champ électrique caractéristiques.

Le rayonnement est principalement dû aux discontinuités de champ aux extrémités du patch. Ces extrémités se comportent comme deux fentes rayonnantes, générant un rayonnement en phase dans le plan horizontal. Ce modèle simplifié permet d'expliquer les propriétés de l'antenne telles que le diagramme de rayonnement, l'impédance d'entrée, et la fréquence de résonance.

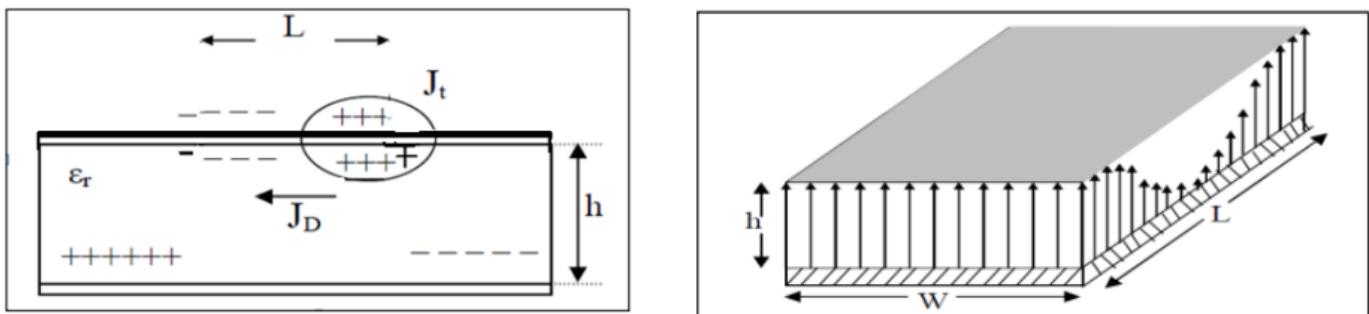


Figure 8 : Mécanismes de rayonnement de l'antenne patch rectangulaire

6. Conception et simulation :

a) Outils utilisés :

Pour la conception de l'antenne patch rectangulaire, deux outils principaux ont été employés :

- **EAGLE** : utilisé pour réaliser le layout de l'antenne, notamment le dessin du patch et de la ligne d'alimentation.
- **StripCalc** : utilisé pour déterminer avec précision la largeur de la ligne de transmission micro-ruban, en fonction de l'impédance souhaitée, de la fréquence de fonctionnement et des caractéristiques du substrat.

b) Spécifications de l'antenne :

La conception a été réalisée pour une fréquence centrale de **3 GHz**. À partir de cette fréquence, et en utilisant les données issues de la fiche technique du substrat, les paramètres géométriques de l'antenne ont été calculés.

❖ Caractéristiques du substrat :

Le substrat FR4 est couramment utilisé pour sa stabilité thermique et sa faible perte diélectrique. Il offre également une bonne résistance mécanique. À une fréquence de **3 GHz**, les paramètres clés du substrat, tels que la permittivité relative et l'épaisseur, influencent directement ses performances.

- **Permittivité relative (ϵ_r) :** $\epsilon_r = 4.5$ affecte la taille et l'impédance des antennes.
- **Hauteur (h) :** $h = 1.55 \text{ mm}$ L'épaisseur du substrat a un impact sur le rayonnement et la bande passante.

❖ **Largeur du patch (W) :**

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

où :

- c est la vitesse de la lumière dans le vide ($3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)
- f est la fréquence de résonance de l'antenne (en Hz),
- ϵ_r est la permittivité relative du substrat (4.5).

AN:

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{4.5 + 1}}$$

$$W = \frac{3 \times 10^8}{6 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{5.5}}$$

$$W = 0.05 \times \sqrt{0.363636}$$

$$W = 0.05 \times 0.603$$

$$W = 0.030150 \text{ m} = 30.150 \text{ mm}$$

❖ **La permittivité effective (ϵ_{eff}) :**

La permittivité effective ϵ_{eff} est calculée à partir de la permittivité relative du substrat ϵ_r et de l'épaisseur du substrat h, La formule est la suivante :

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) \cdot \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2}$$

AN:

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{1.55}{30.150} \right)^{-1}$$

$$\epsilon_{eff} = 2.75 + 1.75 (1 + 12 \times 0.0514)^{-1/2}$$

$$\epsilon_{eff} = 2.75 + 1.75 (1 + 0.6168)^{-1/2}$$

$$\epsilon_{eff} = 2.75 + 1.75 (1.6168)^{-1/2}$$

$$\epsilon_{eff} = 2.75 + 1.75 \times 0.786$$

$$\epsilon_{eff} = 2.75 + 1.3755 = 4.1255$$

❖ **l'extension électrique de la longueur (Δl) :**

Δl l'extension électrique de la longueur due à l'effet de frange des champs électromagnétiques au bord du patch.

$$\Delta L = 0.412h \cdot \frac{(\epsilon_{r_{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{r_{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)}$$

où :

- h : épaisseur du substrat (en mm),
- W : largeur du patch (en mm),
- $\epsilon_{r_{eff}}$: permittivité effective.

AN:

$$\Delta L = 0.412 \times 1.55 \times \frac{(4.1255 + 0.3)(30.150/1.55 + 0.264)}{(4.1255 - 0.258)(30.150/1.55 + 0.8)}$$

$$\Delta L = 0.6386 \times \frac{(4.4255)(19.4516 + 0.264)}{(3.8675)(19.4516 + 0.8)}$$

$$\Delta L = 0.6386 \times \frac{4.4255 \times 19.7156}{3.8675 \times 20.2516}$$

$$\Delta L = 0.6386 \times \frac{87.231}{78.231}$$

$$\Delta L = 0.6386 \times 1.115 = 0.712 \text{ mm}$$

❖ **Longueur du patch (L) :**

Une fois qu'on a déterminé l'extension de longueur Δl et la permittivité effective $\epsilon_{r_{eff}}$, on peut calculer la longueur physique du patch avec la formule suivante :

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} - 2\Delta L$$

où :

- c est la vitesse de la lumière dans le vide ($3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$).
- f : fréquence de fonctionnement (3 GHz).
- $\epsilon_{r_{eff}}$: permittivité effective.
- Δl : allongement électrique (en m).

AN:

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 3 \times 10^9 \sqrt{4.1255}} - 2 \times 0.712 \times 10^{-3}$$

$$L = \frac{3 \times 10^8}{6 \times 10^9 \times 2.031} - 1.424 \times 10^{-3}$$

$$L = \frac{3 \times 10^8}{12.186 \times 10^9} - 1.424 \times 10^{-3}$$

$$L = 0.0246 - 0.001424 = 0.023176 \text{ m} = 23.176 \text{ mm}$$

Après avoir calculé la largeur W et la longueur L du patch, il est nécessaire de déterminer les paramètres de la ligne d'alimentation, tels que l'impédance caractéristique Z_{trans} et l'impédance d'entrée R_{in} , afin d'assurer une correspondance d'impédance optimale entre l'antenne et la source d'excitation.

❖ Impédance d'entrée (R_{in}):

$$R_{in} = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right)^2$$

AN:

$$R_{in} = \frac{90 \cdot 4.5^2}{4.5 - 1} \cdot \left(\frac{23.183}{30.151} \right)^2$$

$$R_{in} = \frac{90 \cdot 20.25}{3.5} \cdot 0.590$$

$$R_{in} = 520.7142857 \cdot 0.590$$

$$R_{in} = 308.130612244898 \Omega$$

❖ Impédance Transformateur quart d'onde (Z_λ):

$$Z_\lambda = \sqrt{Z_0 \times R_{in}}$$

Où :

- $Z_{in} = R_{in}$ est l'impédance d'entrée de l'antenne.
- Z_0 est l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

$$Z_\lambda = 124.043 \Omega$$

Pour déterminer les valeurs de L1 et L2, on doit utiliser les formules associées aux transformations d'impédance et aux sections de transmission à quart d'onde ($\lambda/4$) et trois quarts de longueur d'onde ($3\lambda/4$).

❖ Longueur de la première section (L1) pour $\lambda/4$:

$$L1 = \frac{\lambda}{4}$$

Où :

- λ est la longueur d'onde dans le milieu (qui dépend de la fréquence de fonctionnement et de la permittivité du substrat).

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}$$

AN:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9 \times \sqrt{4.125906}} \approx \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9 \times 2.031} \approx 0.0493 \text{ m} = 49.3 \text{ mm}$$

Donc $L1 = \frac{\lambda}{4} = \frac{49.3 \text{ mm}}{4} = 12.3076923 \text{ mm}$

❖ Largeur de la première section (L1) pour $\lambda/4$:

À l'aide de Z_λ et du logiciel Stripcalc, on obtient la largeur W1 de la première section,

Figure 9. Cette largeur est déterminée en fonction de l'impédance de transformation et des propriétés du substrat, comme la permittivité effective.

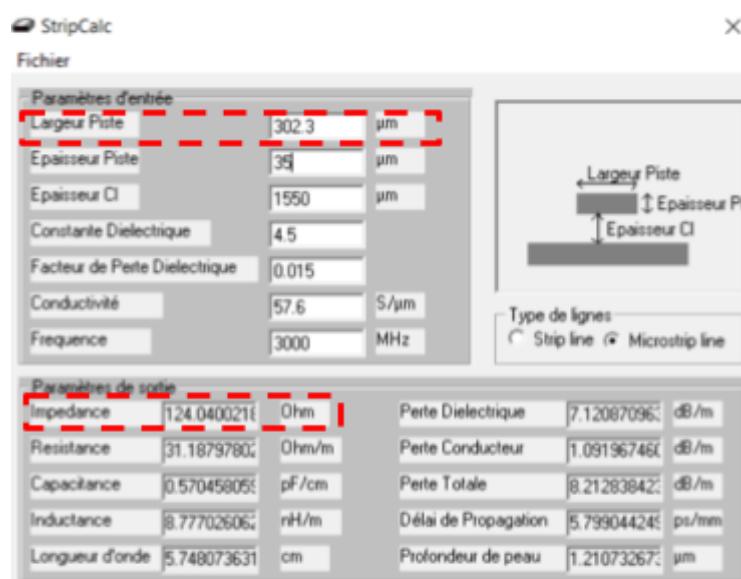


Figure 9 : la Largeur de la première section trouvé sur StripCalc

❖ Longueur de la deuxième section (L2) pour $3\lambda/4$:

La longueur de la deuxième section (L2L2L2) est calculée de manière similaire à la première section, mais pour une longueur de trois quarts d'onde ($3\lambda/4$ \lambda/43λ/4) :

$$L2 = \frac{3\lambda}{4}$$

An:

$$L2 = \frac{3 \times 49.3 \text{ mm}}{4} = 36.92307692 \text{ mm}$$

❖ Largeur de la deuxième section (L2) pour $3\lambda/4$:

La largeur de la deuxième section W2 est déterminée à l'aide de Z0 (l'impédance caractéristique de la ligne d'alimentation) et du logiciel Stripcalc, figure 10. En utilisant ces paramètres, la largeur de la section est calculée en fonction de l'impédance caractéristique et des propriétés du substrat, telles que la permittivité effective.

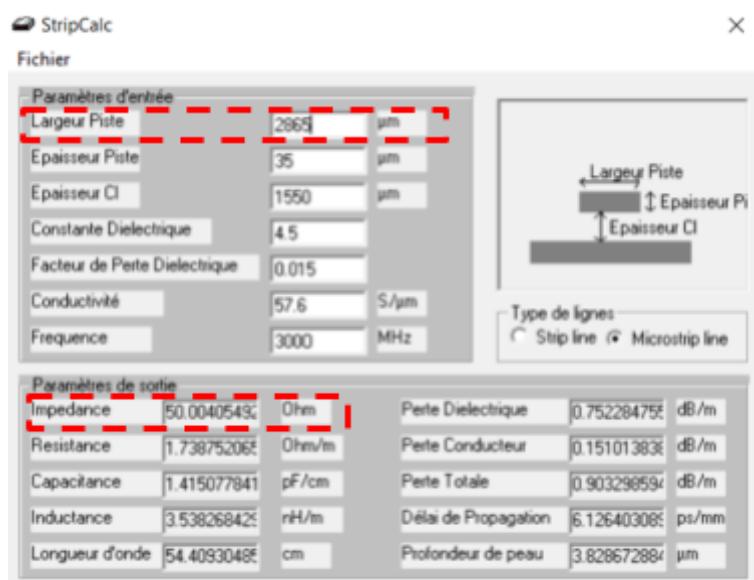


Figure 10 : la Largeur de la deuxième section trouvé sur StripCalc

- Dans ce tableau, on résume les paramètres de l'antenne afin de pouvoir réaliser le layout sur Eagle.

Le tableau 1 suivant récapitule les principales caractéristiques dimensionnelles et électromagnétiques de l'antenne patch conçue. Ces paramètres ont été déterminés à partir des équations de conception standards en tenant compte de la fréquence de fonctionnement visée 3 Ghz.

Tableau 1 : les principales caractéristiques dimensionnelles et électromagnétiques de l'antenne

N°	Caractéristiques de l'antenne	Valeur
1	Fréquence de fonctionnement (f)	3 GHz
2	Permittivité du substrat (ϵ_r)	4.5
3	Permittivité effective (ϵ_{eff})	4.125906
4	Largeur du patch (W)	30.151mm
5	Longueur du patch (L)	23.183mm
6	Impédance d'entrée (R_{in})	308.130Ω
7	impédance caractéristique de la ligne d'alimentation (Z_λ)	124.043Ω
8	Longueur de la première section (L1)	12.3077mm
9	Largeur de la première section (W1)	302.3μm
10	Longueur de la deuxième section (L2)	36.9231mm
11	Largeur de la deuxième section (W2)	2865μm

L'architecture finale réalisée sous Eagle est illustrée dans la figure 11 ci-dessous .

Figure 11 : L'antenne patch réalisé sur eagle

14

c) Résultats de conception et des simulations:

La figure 12 ci-dessous présente la vue réelle de l'antenne patch rectangulaire conçue conformément aux dimensions calculées à l'aide de StripCalc et modélisée sous EAGLE.

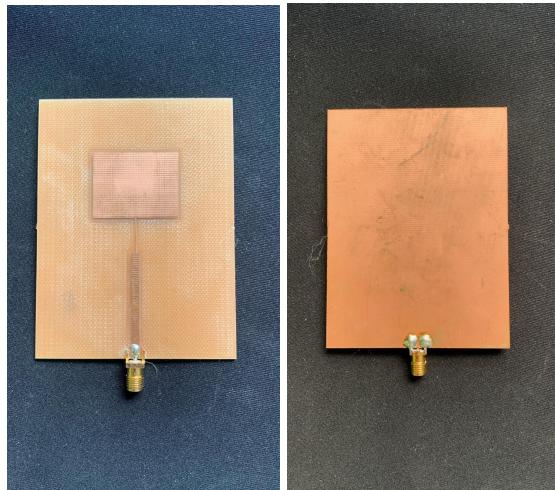


Figure 12 : vue réelle de l'antenne patch

Afin de valider les performances de notre antenne patch conçue, nous avons procédé à une série de mesures expérimentales. Ces mesures permettent d'évaluer la qualité du rayonnement, l'adaptation d'impédance, la fréquence de résonance ainsi que les pertes par réflexion.

❖ Analyse de la fréquence de résonance :

Nous avons observé la réponse fréquentielle de l'antenne sur le ENA network analyser E5063A , notamment le coefficient de réflexion S11 qui indique le niveau de puissance réfléchie et permet de déterminer si l'antenne est bien adaptée à la fréquence de 3 GHz. Le résultat est observé dans la figure 13 ci-dessous.

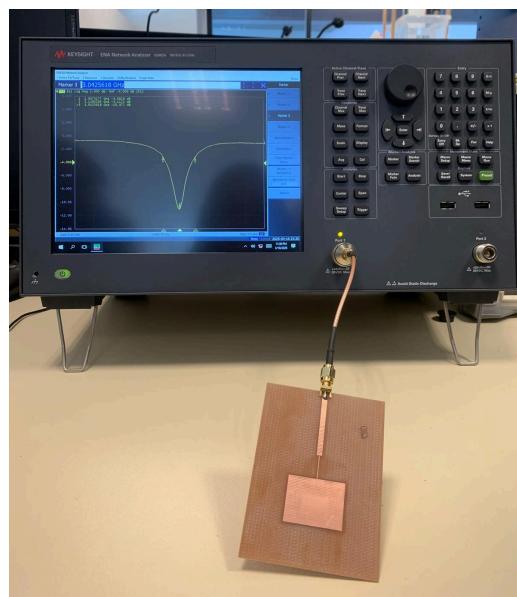


Figure 13 : Simulation de la réponse Fréquentielle par le E5063A.

La figure 14 ci-dessous présente de manière claire la réponse fréquentielle du coefficient de réflexion S11, permettant d'évaluer l'adaptation de l'antenne à la fréquence de résonance.

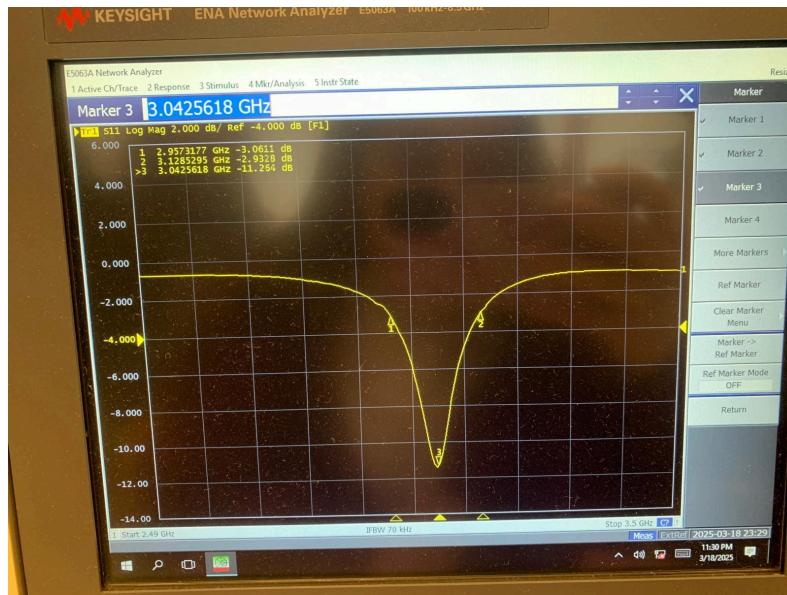


Figure 14 : Caractérisation fréquentielle de l'antenne via le paramètre S11

- Observation :

La fréquence de résonance de notre antenne est observée à 3.042 GHz, ce qui confirme que l'antenne résonne correctement à la fréquence cible. La bande passante de l'antenne, mesurée à -3 dB, s'étend de 2.957 GHz à 3.128 GHz, ce qui démontre une réponse fréquentielle satisfaisante. Le gain obtenu est de -10.771 dB, ce qui indique une perte de signal relativement faible.

- Commentaires :

Les résultats obtenus valident le bon fonctionnement de l'antenne dans la plage de fréquences spécifiée. La fréquence de résonance étant très proche de celle calculée, cela indique une bonne précision dans la conception. La bande passante autour de 3 GHz est également suffisamment large pour permettre une opération efficace dans des applications qui nécessitent une stabilité en fréquence. Cependant, le gain de -10.771 dB, bien qu'acceptable, pourrait être amélioré pour optimiser la performance de l'antenne, notamment en ajustant les paramètres de conception ou en explorant d'autres matériaux pour augmenter l'efficacité.

❖ Visualisation du diagramme de rayonnement :

Pour évaluer le rayonnement de notre antenne, nous avons choisi d'utiliser une méthode basée sur une configuration spécifique. Dans un premier temps, nous avons opté pour un environnement circulaire comportant plusieurs capteurs, avec l'antenne placée au centre

et alimentée pour observer son rayonnement en 2D et en 3D. Cette approche nous a permis d'étudier la répartition de l'énergie rayonnée dans l'espace.

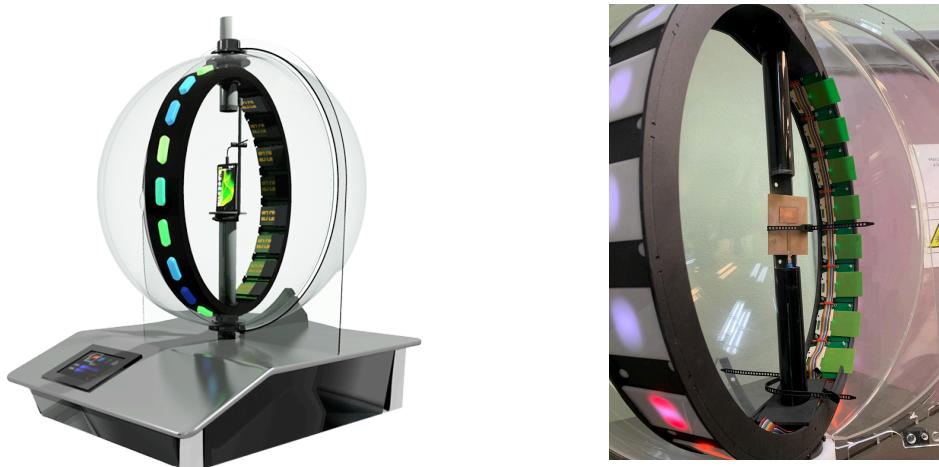


Figure 15 : Le Gyroscanfield, utilisé pour visualiser le diagramme de rayonnement de l'antenne.

L'équipement utilisé pour ces mesures comprend une machine spécialisée Le Gyroscanfield, comme le montre la Figure 15 ci-dessus .

- Observation :

Nous avons obtenu ces résultats à l'aide du Gyroscanfield, figure 16, qui nous a permis de visualiser le diagramme de rayonnement de l'antenne testée en 2D et 3D.

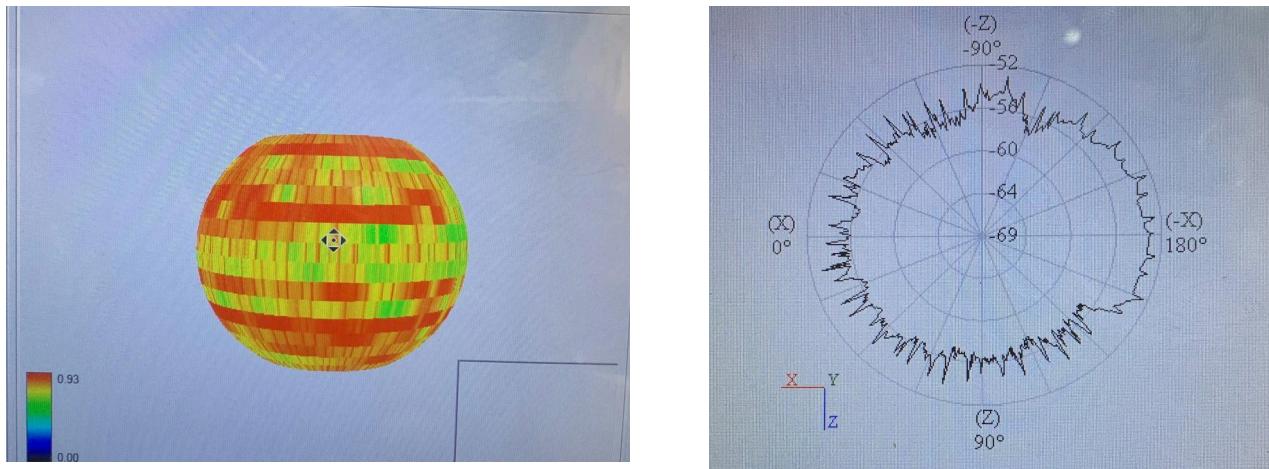


Figure 16 :Diagramme de rayonnement de l'antenne en 2D et 3D.

Ces mesures représentent l'intensité du champ électromagnétique rayonné en fonction des angles d'observation, permettant d'analyser des paramètres clés tels que la directivité et le gain. Cependant, la figure 16 ne présente pas clairement le lobe secondaire, et les résultats obtenus ne sont pas aussi précis que souhaités, ce qui peut indiquer certaines limitations dans la configuration expérimentale ou la précision des mesures

En raison de ces limitations dans la configuration expérimentale et de la fréquence de résonance de l'antenne, il était nécessaire d'adopter une approche plus précise pour garantir la fiabilité des résultats. En fait, Le Gyroscanfield opère jusqu'à une fréquence limite de 3 GHz, ce qui correspond précisément à la fréquence de résonance de notre antenne. donc afin d'éviter toute incertitude liée aux mesures en limite de bande, nous avons choisi d'adopter une autre méthode de calcul plus complexe, mais offrant une meilleure précision et une plus grande fiabilité des résultats.

Afin de réaliser une caractérisation plus précise du rayonnement de notre antenne, nous avons utilisé la configuration matériel suivante :

- **Antenne biconique omnidirectionnelle Schwarzbeck RS0460** : cette antenne est idéale pour les mesures en champ libre grâce à sa large bande (jusqu'à 5 GHz) passante et son rayonnement quasi isotrope, garantissant une mesure fiable et précise des signaux émis.
- La figure 17 ci-dessous illustre cette antenne :



Figure 17 : Antenne biconique omnidirectionnelle

- **Analyseur de spectre Rohde & Schwarz FPH** : cet appareil permet une mesure précise du spectre des signaux reçus, avec une couverture de fréquence allant de 9 kHz à 6 GHz, offrant ainsi des mesures fiables pour une gamme étendue de tests.



Figure 18 : Analyseur de spectre Rohde & Schwarz FPH

- Le générateur Rohde & Schwarz : est utilisé pour générer des signaux à des fréquences précises et de puissances contrôlées. La figure 19 illustre ce générateur utilisé :

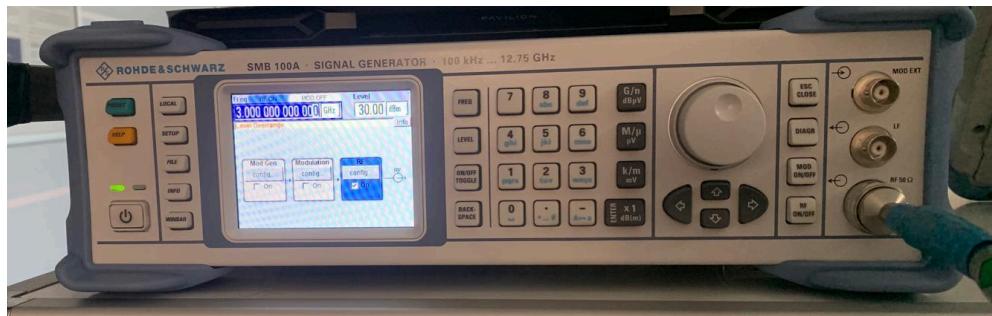


Figure 19 : Le générateur Rohde & Schwarz

- Alimentation stabilisée : utilisée pour fournir une alimentation constante et stable à l'antenne pendant les tests.

La figure 20 ci-dessous illustre l'ensemble du matériel utilisé pour mesurer le rayonnement de notre antenne, incluant l'antenne elle-même, le générateur de signaux, l'analyseur de spectre et l'alimentation stabilisée, ainsi que le processus expérimental mis en place.



Figure 20 : L'ensemble du matériel utilisé

- Observation :

En utilisant tout ce matériel, nous avons procédé à des mesures du rayonnement de l'antenne à différents angles. Les valeurs obtenues ont été enregistrées dans un tableau Excel, et à partir de ces données, nous avons généré le diagramme de rayonnement correspondant. La figure 21 ci-dessous présente le tableau excel et le diagramme de rayonnement obtenu à partir des mesures effectuées

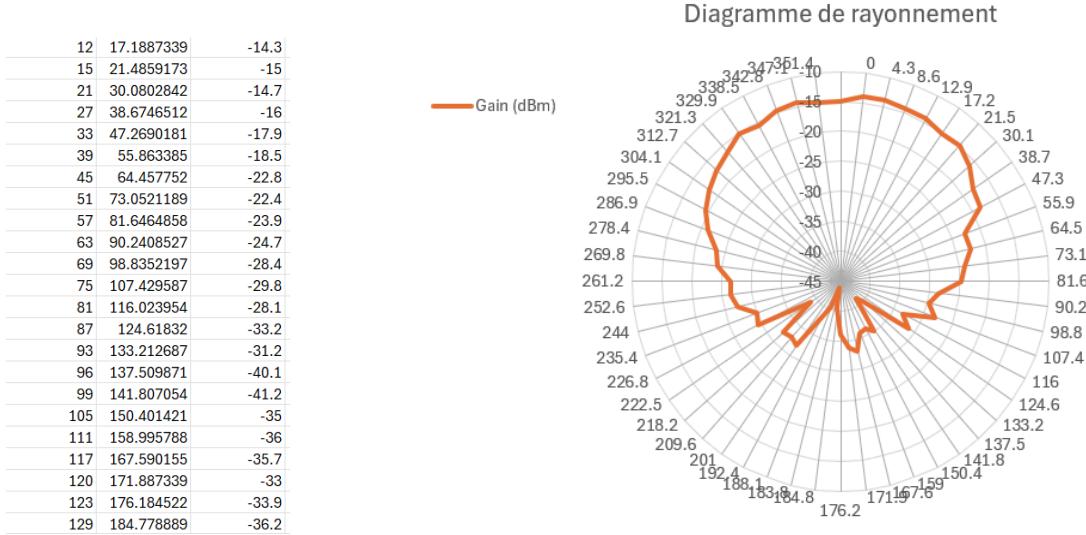


Figure 21 :Tableau des mesures de rayonnement et diagramme de rayonnement généré.

Ce diagramme de rayonnement illustre les performances directionnelles d'une antenne patch dans un plan donné. On y observe un lobe principal bien marqué centré autour de 0°, indiquant la direction privilégiée d'émission de l'antenne. Ce lobe principal correspond à la zone où l'antenne rayonne avec le maximum de puissance, ce qui est typique pour une antenne patch à rayonnement directionnel.

Autour de ce lobe, plusieurs lobes secondaires apparaissent, notamment entre 135° et 230°, mais leur intensité reste nettement inférieure à celle du lobe principal. Ces lobes secondaires représentent des émissions parasites dans d'autres directions, qu'on cherche généralement à minimiser pour éviter des pertes d'énergie ou des interférences. On remarque également des zones de nulles, où le rayonnement est quasi nul ce qui peut créer des zones mortes selon l'orientation de l'antenne.

- Le diagramme n'est pas parfaitement symétrique, ce qui peut être dû à une alimentation asymétrique ou à l'environnement de mesure.
- Globalement, ce comportement confirme que l'antenne est bien conçue pour concentrer son énergie dans une direction principale, tout en réduisant les émissions indésirables.

IV. Conclusion :

La conception et la modélisation d'une antenne patch rectangulaire résonant à 3 GHz se sont révélées être un exercice complexe, mêlant théorie, calculs précis, choix techniques et simulations pratiques. Malgré l'application rigoureuse des formules de base et l'utilisation d'outils de modélisation, plusieurs obstacles ont été rencontrés tout au long du projet. Le dimensionnement du patch, le choix du substrat, l'adaptation d'impédance, ainsi que les limites des logiciels utilisés ont tous contribué à des résultats imparfaits.

Les simulations ont permis d'approcher les performances attendues, mais des écarts persistent, notamment au niveau de la symétrie du diagramme de rayonnement. Ces écarts soulignent l'importance de prendre en compte les effets réels (franges, pertes, tolérances de fabrication) dès la phase de conception.

Ainsi, bien que le projet ait permis de comprendre en profondeur le fonctionnement et la conception d'une antenne patch, il reste des marges d'amélioration. L'utilisation de logiciels de simulation plus avancés, l'optimisation fine du point d'alimentation, et l'exploration de techniques pour élargir la bande passante (telles que l'ajout de fentes ou de substrats multicouches) constituent des pistes intéressantes pour les travaux futurs.

Ce projet met en lumière la nécessité d'un équilibre entre la théorie, la pratique, et les contraintes techniques réelles pour parvenir à une antenne performante et fonctionnelle.