

Département d'Automatique, Télécommunications et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de télécommunications

Thème

Conception d'antennes patches large-bande à différentes formes de plan de masse

Préparé par :

- DELLYS Wassila
- GUERNA Abdenour

Dirigé par :

Mme. HAMZAOUI Dahbia.

Examiné par :

M. BERRAH Smail

M. KASMI Reda

Année universitaire : 2023/2024

REMERCIEMENT

Je souhaite exprimer ma plus profonde gratitude à toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement mon encadrante, Mme D. Hamzaoui, pour son encadrement rigoureux, ses conseils avisés et son soutien indéfectible tout au long de cette recherche. Sa disponibilité et sa bienveillance ont été déterminantes dans l'aboutissement de ce travail.

Je tiens également à exprimer ma sincère gratitude à M. S. Berrah et M. R. Kasmi pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour leur participation en tant que membres du jury.

Je souhaite remercier l'ensemble des enseignants du département ATE pour la qualité de leur enseignement et leur passion communicative, qui ont éveillé en moi un intérêt profond pour le domaine des télécommunications.

Je suis particulièrement reconnaissant envers ma famille pour leur patience, leur compréhension et leurs encouragements constants. Leur soutien et leur bienveillance ont été une source inestimable de motivation.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes et institutions qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Votre aide et votre collaboration ont été précieuses.

*Ce mémoire est le fruit d'un travail collectif et je vous en suis profondément reconnaissant.
Merci à tous.*

DÉDICACE

Je dédie ce travail à :

*Mes chers parents pour leurs encouragements,
leur soutien moral, spirituel et leur tolérance durant toutes
mes années d'études, aucun hommage ne pourrait être
à la hauteur de ce que j'ai pu recevoir de leur part,
amour, espoir et motivation.*

Que dieu leur procure bonne santé et longue vie,

Mes très chers frères, Athmane et Nassim.

A ma chère petite sœur Nefissa.

Que dieu leur donne santé, bonheur, courage et réussite,

Mon cher fiancé Walid,

pour son soutien et encouragement,

Mes enseignants pour qui j'ai un énorme respect, plus particulièrement

Mme D.hamzaoui Et M. A.Alliche

qui ont toujours été une source de motivation.

Pour moi, les deux sont une école !

A mes amies, Raghda, Kahina, Imene, Dyhia, Fatima, Sahra, Alicia.

A tous ceux qui m'ont soutenu depuis le début.

W.Dellys

DÉDICACE

Je dédie ce travail à :

*ma mère qui m'a soutenu et encouragé durant
ces années d'études.*

*Quelle trouve ici le témoignage
de ma profonde reconnaissance.*

*Mes 3 sœurs ainsi que mon petit frère,
que dieu leur donne santé, bonheur, courage et réussite,*

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Tables des Matières	
Liste des Tableaux	
Liste des figures	
Introduction Générale	11
Chapitre 01 : <i>Généralités sur les antennes patches</i>	2
I.1 L'introduction	3
I.2 Description des antennes patches micro ruban	3
I.2.1 Les types d'antennes patches	3
I.3 Les avantages et inconvénients de l'antenne patch	4
I.3.1 Les avantages :	4
I.3.2 Les inconvénients	4
I.4 Limitations de la bande passante de l'antenne patch	5
I.5 Principe de fonctionnement	5
I.6 Applications	6
I.7 Techniques d'alimentation.....	6
I.7.1 Alimentation par contact.....	6
I.7.1.1 Alimentation par ligne micro-ruban	6
I.7.1.2 Alimentation par câble coaxial	7
I.7.2 Alimentation par proximité	7
I.7.2.1 Alimentation par fente	7
I.7.2.2 Alimentation par couplage de proximité.....	8
I.8 Etude théorique de l'antenne patch	9
I.9 Caractéristiques de l'antenne patch.....	10
I.9.1 L'impédance d'entrée	10
I.9.2 Le facteur de qualité	11
I.9.3 La bande passante.....	12
I.9.4 Le diagramme de rayonnement	12
I.9.5 La directivité	13
I.9.6 Le gain	13
I.9.7 Le coefficient de réflexion	13
I.9.8 Rapport d'onde stationnaire (ROS)	14
I.9.9 La polarisation croisée et la co-polarisation (co and cross polarization).....	14

Table des matières

I.10 Conclusion	16
Chapitre 2 : <i>Antennes patches large bande</i>	18
II.1 Introduction	19
II.2 Problématique de la bande passante étroite.....	19
II.3 L'importance d'élargir la bande passante de l'antenne patch	20
II.4 Techniques d'élargissement de la bande passante	20
II.4.1 Impact du choix du substrat	20
II.4.2 Impact de l'alimentation	22
II.5 L'effet du plan de masse sur les MSAs.....	28
II.6 Conclusion	29
Chapitre 3 : <i>Simulations et discussion</i>	31
III.1 Introduction	32
III.2 Objectif.....	32
III.3 Conception de l'antenne patch	32
III.3.1 Plan de masse forme rectangulaire	32
III.3.2 Plan de masse forme papillon	35
III.3.2.1 Les effets des paramètres.....	37
III.3.3 Plan de masse de forme H	45
III.3.3.1 Les effets des paramètres.....	47
III.3.3.2 Résultats.....	53
III.4 Etude comparative entre les deux plans modifiés	56
III.5 Conclusion.....	57
Conclusion Générale	58
Références bibliographies	

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Propriétés de l'antenne patch conçue.	33
Tableau III. 2 : Propriétés de l'antenne patch conçue	36
Tableau III.3 : Valeurs de « d ».....	37
Tableau III.4 : Valeurs de « xf »	38
Tableau III.5 : valeurs de « h ».	39
Tableau III.6 : Valeurs de « R ».	40
Tableau III.7 : Valeurs de « Lf ».....	41
Tableau III.8 : Valeurs de « ha ».	41
Tableau III. 9 : Propriétés de l'antenne patch conçue.	46
Tableau III.10 : Valeurs de « d ».....	47
Tableau III.11 : Valeurs de « xf ».	48
Tableau III.12 : Valeurs de « h ».....	49
Tableau III.13 : Valeurs de « ha ».	50
Tableau III.14 : Valeurs de « R ».	51
Tableau III.15 : Valeurs de « Lf ».....	52

Liste des figures

Figure I. 1 : Antenne patch micro-ruban [2].	3
Figure I. 2 : Différentes formes d'antenne patch	4
Figure I. 3 : Principe de fonctionnement de l'antenne patch micro-ruban.	5
Figure I. 4 : Alimentation par ligne micro-ruban.	6
Figure I. 5 : Les techniques d'alimentation par ligne micro-ruban.	Error! Bookmark not defined.
Figure I. 6 : Alimentation par câble coaxiale.	7
Figure I. 7 : Alimentation par fente.	8
Figure I. 8 : Alimentation par couplage électromagnétique.	9
Figure I. 9 : Constante diélectrique effective $\epsilon_r \text{ eff}$.	Error! Bookmark not defined.
Figure I. 10 : Extension de longueur de l'antenne patch ΔL .	Error! Bookmark not defined.
Figure I. 11 : La longueur physique d'une antenne patch rectangulaire.	Error! Bookmark not defined.
Figure I. 12 : Exemple d'un diagramme de rayonnement d'une antenne patch. [12]	Error! Bookmark not defined.
Figure I. 13 : antenne patch microstrip. [5]	Error! Bookmark not defined.
Figure I. 14 : La polarisation croisée.	15
Figure I. 15 : Co and Cross polarizations. [18]	16
Figure II. 1 : Effet de l'épaisseur du substrat et de sa permittivité sur la bande passante de l'antenne patch.[1]	21
Figure II. 2 : RMSA avec différents types de compensation de la sonde : (a) petit trou autour de la sonde, (b) bande de cuivre à l'extrémité de la sonde, (c) bande métallique connectée à la sonde sous le patch.	23
Figure II. 3 : Alimentation par couplage avec fente. [8]	23
Figure II. 4 : Différentes formes utilisées pour la fente de couplage : (a) rectangulaire mince, (b) rectangulaire plus longue, (c) rectangulaire plus large, (d) en forme de 'H', (e) en forme de papillon (bowtie), et (f) en forme de sablier [3][10].	24
Figure II. 5 : Amélioration de la largeur de bande en introduisant un patch factice couplé au patch excité, (les fréquences de résonance des deux résonateurs sont assez différentes). [2]	25
Figure II. 6: Le concept de superposition (Un patch rectangulaire empilé).	26
Figure II. 7: La configuration générale d'une antenne à patch empilé par ouverture [1].	27
Figure III.1 : Réalisation de CMSA plan de masse rectangulaire. (a) : la structure vue du bas où le plan de masse apparaît. (b) : la structure vue de haut où l'élément rayonnant (le patch) apparaît	33
Figure III.2 : antenne patch conçu	34
Figure III.3 : le coefficient de réflexion S11 de l'antenne patch conçu avec plan de masse rectangulaire.	34
Figure III.4 : le diagramme de rayonnement de l'antenne.	35
Figure III.5 : Réalisation de CMSA plan de masse papillon. (a) : la structure vue du bas où le plan de masse apparaît. (b) : la structure vue de haut où l'élément rayonnant (le patch) apparaît.	36
Figure III.6 : Antenne patch conçu.	37
Figure III. 7 : Effet de « d ».	38
Figure III. 8 : Effet de « xf ».	39

Liste des figures

Figure III. 9 : Effet de « h ».	39
Figure III. 10 : Effet de « R ».	40
Figure III. 11 : Effet de « Lf ».	41
Figure III. 12 : Effet de « ha ».	42
Figure III. 13 : Le coefficient de réflexion S_{11} .	42
Figure III. 14: (a) Diagramme de rayonnement 3D. (b) Gain en coordonnées polaires ($\Phi=0^\circ$). (c) Gain en coordonnées polaires ($\Theta=90^\circ$) à $f=1.16$ GHz.	43
Figure III. 15 : Variation du gain en fonction de la fréquence.	44
Figure III.16 : (a) Co et Cross polarisations ($f = 550$ MHz). (b) Co et Cross polarisations ($f = 1150$ MHz)	45
Figure III. 17 : structure plane de masse H. (a) : la structure vue d'en bas où le plan de masse apparait. (b) : la structure vue d'en haut où le patch rayonnant apparait.	45
Figure III.18 : Antenne patch conçue.	46
Figure III. 19 : Effet de « d ».	47
Figure III. 201: Effet de «xf».	48
Figure III. 21 : Effet de «h».	49
Figure III. 222 : Effet de « ha ».	50
Figure III. 23 : Effet de « R».	51
Figure III. 24: Effet de « Lf».	52
Figure III. 25 : Le coefficient de réflexion.	53
Figure III. 26: Diagramme de rayonnement. (a) Le diagramme de rayonnement en 3D. (b) Le gain en polaire ($\Phi=0^\circ$). (c) Le gain en polaire ($\Theta=90^\circ$) à $f=1.06$ GHz.	54
Figure III. 27: Variation du gain en fonction de la fréquence.	54
Figure III. 28 : (a) Co et cross polarisations ($f = 610$ MHz). (b) Co et cross polarisation ($f = 1135$ MHz).	55

Liste des abréviations

a : Rayon du patch.

a_e : Rayon effectif du patch.

BW : Bandwidth (Bande passante).

CMSA : Circular microstrip antenna.

D : directivité.

f : Fréquence.

G : Gain.

Gt/l : est la conductance totale par unité de longueur de l'ouverture rayonnante

K : est un facteur de proportionnalité.

k_0 : Le nombre d'onde dans le vide.

L : Longueur réelle du patch.

L_{eff} : Longueur effective du patch.

MSA : Microstrip antenna.

RMSA : Rectangular microstrip antenna.

ROS : Rapport d'onde stationnaire.

S_{11} : Coefficient de réflexion.

Q_c : facteur de qualité dû aux pertes par conduction (ohmiques)

Q_d : facteur de qualité dû aux pertes diélectriques

Q_{rad} : facteur de qualité dû aux pertes par rayonnement (ondes spatiales)

Q_{sw} : facteur de qualité dû aux ondes de surface

Q_t : facteur de qualité total

$\tan \delta$: la tangente de perte du matériau du substrat.

W : Largeur du patch.

Z_c : Impédance caractéristique.

Z_e, Z_{in} : Impédance d'entrée.

Liste des abréviations

ΔL : Extension de longueur de du patch.

η : Rendement de l'antenne.

ϵ_r : Permittivité.

ϵ_{eff} : Constante diélectrique effective.

σ : la conductivité

Introduction Générale

Dans le domaine des télécommunications modernes, les antennes jouent un rôle crucial dans la transmission et la réception des signaux électromagnétiques. Parmi les diverses configurations d'antennes, l'antenne patch se distingue par ses nombreux avantages, notamment sa faible épaisseur, sa facilité de fabrication et son intégration aisée dans les dispositifs sans fil. Ce mémoire vise à explorer en profondeur les caractéristiques, les techniques d'alimentation et les méthodes d'optimisation des antennes patch, tout en mettant en lumière les résultats obtenus à travers des études et des simulations.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à la description détaillée de l'antenne patch. Nous y aborderons les différentes techniques d'alimentation disponibles, telles que l'alimentation par ligne micro-ruban, par sonde coaxiale, ou encore par couplage électromagnétique. En outre, nous examinerons les principales caractéristiques de l'antenne patch, incluant ses paramètres de rayonnement, son gain, et son efficacité.

Dans le deuxième chapitre, nous nous concentrerons sur les techniques permettant d'élargir la bande passante de l'antenne patch, un aspect essentiel pour améliorer ses performances dans diverses applications. Nous discuterons des méthodes comme l'utilisation de substrats à faible permittivité, les configurations multi-résonantes, et les techniques de couplage parasite. De plus, nous analyserons l'impact du plan de masse sur le comportement de l'antenne patch, en mettant en évidence son rôle dans la stabilisation des caractéristiques de rayonnement et la réduction des pertes.

Enfin, le troisième chapitre sera dédié à la discussion des résultats obtenus au cours de nos recherches. Nous présenterons les données expérimentales et les simulations réalisées, en comparant les performances des différentes configurations étudiées. Nous analyserons également la technique utilisée pour chaque expérimentation, en fournissant une évaluation critique de leur efficacité et de leur applicabilité dans des scénarios réels.

Ce mémoire, en présentant une étude approfondie des antennes patch, vise à offrir une compréhension claire et détaillée des aspects théoriques et pratiques associés à ces dispositifs, tout en contribuant à l'amélioration continue de leurs performances pour répondre aux besoins croissants des technologies sans fil modernes.

Chapitre 01 :
Généralités sur les antennes patches

I.1 L'introduction

Ce chapitre va contenir une analyse détaillée de l'antenne patch micro-ruban ainsi que ses caractéristiques. Nous commencerons par une description de l'antenne patch puis nous allons présenter de diverses techniques d'alimentation. Nous discuterons également des défis associés à chaque technique d'alimentation et des solutions potentielles pour optimiser les performances de l'antenne. Enfin, nous présenterons des exemples pratiques et des études de cas pour illustrer l'application de ces techniques dans des scénarios réels.

Après cela, une description des principales caractéristiques de l'antenne patch, telles que le gain, la bande passante, l'impédance, la directivité et le diagramme de rayonnement sera donnée pour comprendre leur impact sur la performance globale de l'antenne.

I.2 Description des antennes patches micro ruban

Une antenne patch est une structure métallique de forme diverse (rectangulaire, circulaire, à fente ou plus complexe), placée sur la surface d'un substrat diélectrique qui présente un plan conducteur (plan de masse) sur l'autre face comme le montre la figure 1.1 [1].

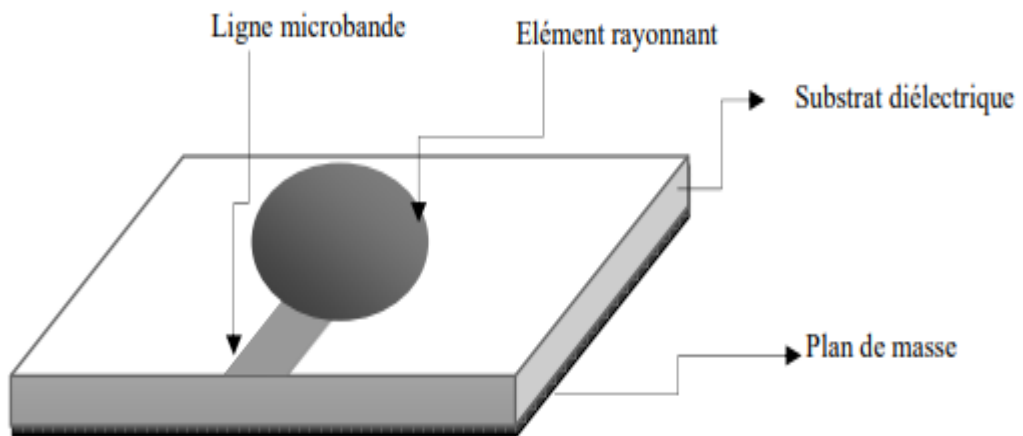


Figure I. 1: Antenne patch micro-ruban.

I.2.1 Les types d'antennes patches

Différentes formes de l'antenne patch existent, la figure 1.2 montre les formes les plus utilisées. Les configurations carrées, rectangulaires, dipôles (en bande) et circulaires sont les plus utilisées en raison de leur simplicité d'analyse et de fabrication, ainsi que de leurs caractéristiques de rayonnement avantageuses, notamment leur faible polarisation croisée. Les

dipôles microstrips sont appréciés pour leur large bande passante intrinsèque et leur faible encombrement, ce qui les rend particulièrement adaptés aux réseaux [3], [4], [5], [6].

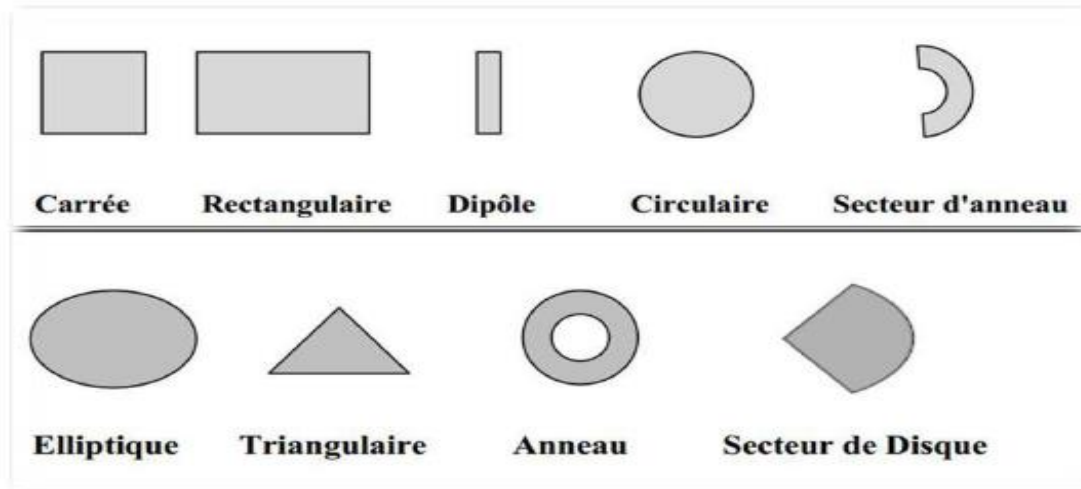


Figure I. 2 : Différentes formes d'antenne patch

I.3 Les avantages et inconvénients de l'antenne patch

I.3.1 Les avantages :

L'antenne imprimée présente plusieurs avantages. Les principaux sont énumérés ci-dessous [7] :

- Un poids faible, une petite épaisseur et une configuration planaire à profil bas ;
- Facilité de fabrication (mise en réseau, intégration aisée de composants ou de circuits actifs hybrides) ;
- Un faible coût de fabrication ;
- Elle permet une polarisation linéaire et circulaire ;
- Il est possible de les réduire en taille afin de les utiliser dans les communications mobiles personnelles ;
- Possibilité d'imprimer sur des substrats souples ;
- Elle permet des opérations à double ou triple fréquence ;
- Facilité d'optimisation ;
- Facilité d'intégration dans des appareils électroniques nomades ou transportables (ordinateurs personnels, récepteurs portable GPS, transpondeurs RFID, téléphones mobiles, etc.).

I.3.2 Les inconvénients

Les antennes patches représentent certains inconvénients. Ces derniers sont les suivants :

- Une bande passante souvent étroite, habituellement comprise entre 1 et 5%, ce qui représente le principal obstacle à l'utilisation généralisée de ces antennes ;
- Un faible gain (relativement) ;
- Faible tenue en puissance ;
- Problèmes de tolérances de fabrication si les motifs imprimés sont petits ;
- Rendement limité de surface.

De nombreux progrès ont été réalisés pour améliorer les performances des antennes micro-ruban, en particulier pour l'augmentation de la bande passante.

I.4 Limitations de la bande passante de l'antenne patch

Les antennes patches présentent des limitations de bande passante en raison de plusieurs facteurs. La principale cause de ces limitations est liée à la structure même de l'antenne, qui est généralement conçue pour fonctionner à une fréquence spécifique. En dehors de cette fréquence de résonance, la réponse en fréquence de l'antenne diminue considérablement, ce qui entraîne une limitation de la bande passante. D'autres facteurs tels que les pertes dans le substrat, les pertes par rayonnement et les pertes ohmiques contribuent également à limiter la bande passante des antennes patch [6][7][8][9].

I.5 Principe de fonctionnement

L'antenne patch micro-ruban, comme illustré dans la figure 1.3, fonctionne en créant des champs électriques et magnétiques dans le substrat (entre le patch et le plan de masse). Ce phénomène permet le rayonnement des ondes qui se propagent dans l'air avec une vitesse de propagation V_0 (dans le vide) qui est égale à $V_0 = C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

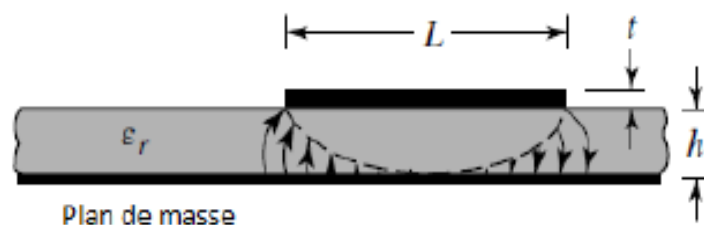


Figure I. 3 : Principe de fonctionnement de l'antenne patch micro-ruban.

I.6 Applications

Vu les nombreuses exigences dans de le domaine de communications et grâce à ses avantages, les antennes imprimées remplacent les antennes classiques dans de multiples domaines, nous citons [8]:

- Les communications satellitaires.
- Les antennes d'émission utilisées en médecine.
- La télémétrie par missile.
- Les équipements portatifs.
- Les satellites de navigation.
- Antennes GPS.
- Les commandes et contrôles à distance.

I.7 Techniques d'alimentation

L'alimentation des antennes patches est l'une des parties les plus importantes dans le processus de la conception, un bon fonctionnement de l'antenne patch réside aussi dans la réalisation d'une alimentation de qualité. Plusieurs configurations peuvent être employées pour alimenter des antennes micro-ruban. Les quatre plus courantes sont la ligne micro-ruban, la sonde coaxiale, le couplage par ouverture et le couplage par proximité [1], [5], [9], [10-12].

I.7.1 Alimentation par contact

I.7.1.1 Alimentation par ligne micro-ruban

Comme illustré dans la **figure 1.4**, la ligne micro-ruban est directement reliée à l'élément rayonnant. Le point de jonction peut être situé sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé afin d'obtenir une meilleure adaptation de l'impédance.

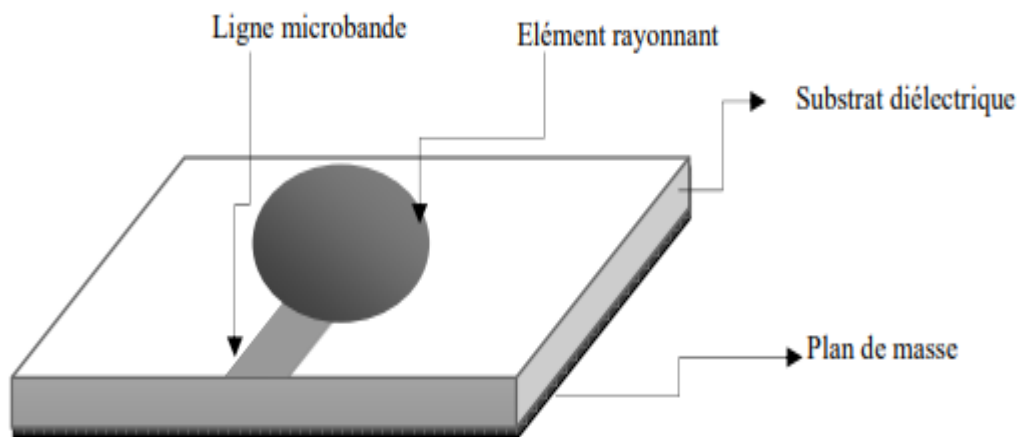


Figure I. 4 : Alimentation par ligne micro-ruban.

L'intérêt d'une telle méthode réside dans sa facilité de fabrication, sa facilité d'intégration, et son prix abordable. Toutefois, son principal inconvénient réside dans le fort rayonnement parasite, ce qui les rend utiles seulement dans des applications qui ne nécessitent pas des performances élevées.

I.7.1.2 Alimentation par câble coaxial

L'alimentation par câble coaxial est couramment utilisée, également connue sous le nom d'alimentation par sonde coaxiale. Dans ce type d'alimentation, Le conducteur intérieur du câble coaxial est relié au patch en un point situé sur l'axe de symétrie, On le fixe directement à l'élément rayonnant en un point où l'adaptation d'impédance est obtenue, tandis que le conducteur extérieur est connecté au plan de masse, comme illustré dans la figure 1.5.

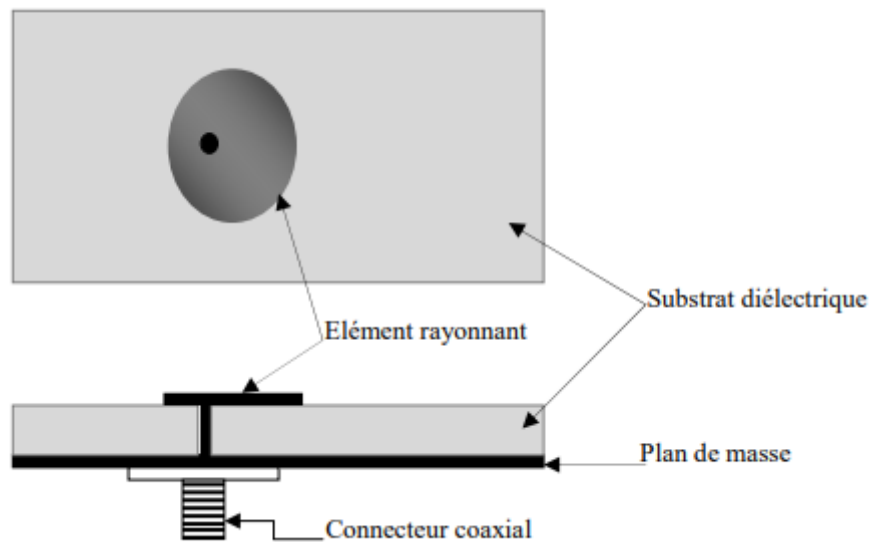


Figure I. 5 : Alimentation par câble coaxial.

Le principal avantage de ce type d'alimentation réside dans sa capacité à être placée à n'importe quel endroit souhaité du patch pour garantir une adaptation de l'impédance. Cette méthode d'alimentation est simple à concevoir et présente un rayonnement parasite faible. En revanche, le principal inconvénient est dans le fait qu'elle offre une bande passante étroite et qu'elle est difficile à modéliser.

I.7.2 Alimentation par proximité

I.7.2.1 Alimentation par fente

Dans ce type d'alimentation, la structure de l'antenne est constituée par deux substrats séparés par un plan de masse, l'un (le substrat supérieur) portant l'élément rayonnant et l'autre la ligne micro-ruban, un couplage électromagnétique est introduit à travers une fente réalisée sur le plan

de masse, Cette fente permet un transfert de puissance par couplage électromagnétique vers le patch rayonnant situé sur le substrat supérieur. Le signal RF excite le patch, qui à son tour rayonne les ondes électromagnétiques dans l'espace. La structure est illustrée dans la figure 1.6.

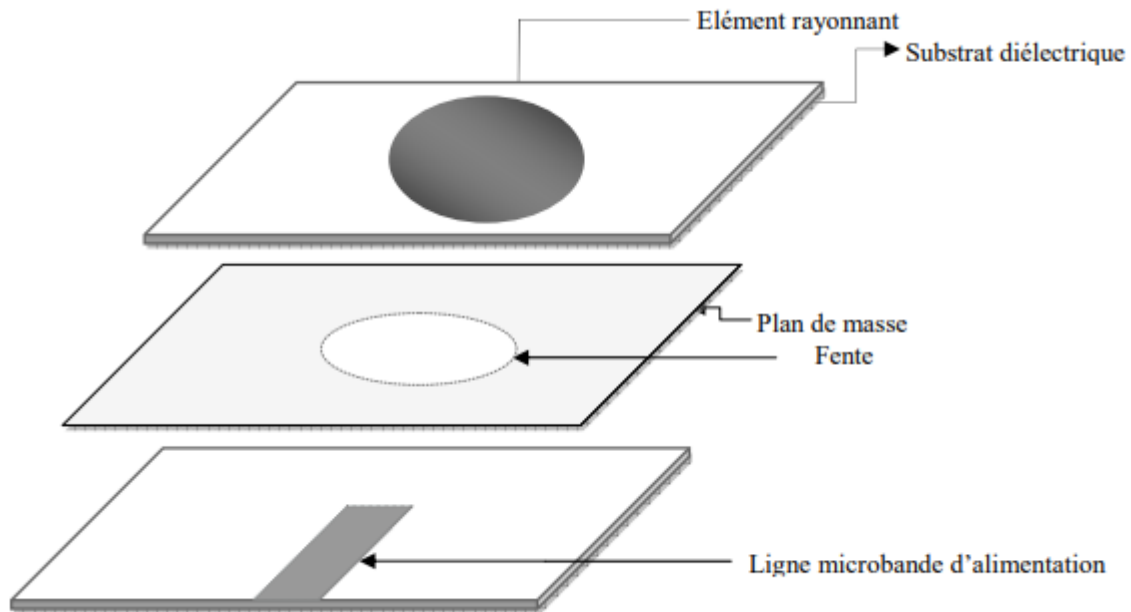


Figure I. 6 : Alimentation par fente.

Ce type d'alimentation a comme avantage une optimisation autonome du mécanisme d'alimentation et de l'élément rayonnant et cela veut dire que le rayonnement parasite ne perturbe pas le rayonnement du patch, et ce grâce au plan de masse. En revanche, cette technique est coûteuse et il est difficile de la réaliser en raison des multiples couches qui augmentent l'épaisseur de l'antenne.

I.7.2.2 Alimentation par couplage de proximité

Connue également sous le nom de couplage électromagnétique. L'antenne est composée de deux substrats diélectriques entre lesquels est située la ligne d'alimentation. L'élément rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur (Figure 1.7). L'excitation est provoquée par une connexion électromagnétique. L'avantage de cette technique réside dans l'amélioration de la largeur de la bande passante. Cependant, sa difficulté de fabrication ainsi que celle de l'intégration des circuits actifs se manifestent tant que inconvénients.

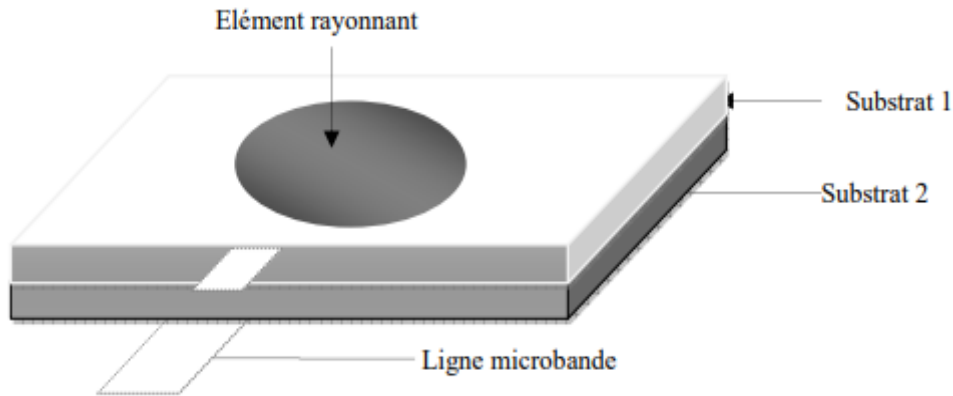


Figure I. 7 : Alimentation par couplage électromagnétique.

I.8 Etude théorique de l'antenne patch

L'étude théorique de l'antenne patch se fait en quelques étapes. La procédure est la suivante :

- Pour obtenir un élément rayonnant efficace, il est recommandé d'utiliser un rayon pratique (a) qui assure une bonne efficacité de rayonnement. Il est donné par : [2] :

$$a = \frac{F}{\sqrt{1 + \frac{2h}{\pi \cdot \epsilon_r \cdot F \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1.7726 \right]}}} \quad (I.1)$$

Où : F : est la fonction logarithmique de l'élément rayonnant.

H : est l'épaisseur du substrat (en cm),

ϵ_r : est la permittivité relative du matériau du substrat.

F peut être calculée par l'équation (2) ci-dessous [2] :

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (I.2)$$

Où : f_r est la fréquence de résonance

- L'équation (I.1) ne prend pas en compte les effets de bord. Ces derniers rendent le patch électriquement plus grand, une correction est introduite en utilisant un rayon effectif a_e pour remplacer le rayon réel a , donné par [2]:

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln\left(\frac{\pi a}{2h}\right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (I.3)$$

- Le mode dominant est le mode TM_{110}^z dont la fréquence de résonance est [13] :

$$(f_r)_{110} = \frac{1.8412 v_0}{2 \pi a_e \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{I.4})$$

- La largeur W_g et la longueur L_g du substrat et du plan de masse peuvent être calculées comme suit [2] :

$$W_g = 6h + \frac{\pi}{2} a \quad (\text{I.5})$$

$$L_g = 6h + a \quad (\text{I.6})$$

I.9 Caractéristiques de l'antenne patch

L'évaluation des performances de l'antenne est possible à partir de plusieurs paramètres, Les principaux paramètres seront définis de la manière suivante :

I.9.1 L'impédance d'entrée

L'antenne peut être vue comme une série de circuits résonants parallèles. Chaque circuit correspond à un mode de propagation spécifique. Tout comme pour l'antenne patch rectangulaire, l'impédance d'entrée d'un patch circulaire en résonance est réelle. La puissance d'entrée ne dépend pas de la position du point d'alimentation le long de la circonférence. En prenant pour référence l'alimentation à $\varphi = 0^\circ$, la résistance d'entrée à une distance radiale $\rho = \rho_0$ depuis le centre du patch, pour le mode dominant TM_{11} (celui qui n'a pas de zéro dans le motif d'amplitude perpendiculaire au patch), peut être exprimée comme suit [2] :

$$Z_{in} (\rho' = \rho_0) = \frac{1}{G_t} \frac{J_1^2(k\rho_0)}{J_1^2(ka_e)} \quad (\text{I.7})$$

Où :

J_1 est la fonction de Bessel de premier type d'ordre 1

G_t est la conductance totale due au rayonnement, à la conduction (ohmique) et aux pertes diélectriques, elle est donnée par [2]:

$$G_t = G_{rad} + G_c + G_d \quad (\text{I.8})$$

Où :

G_{rad} est la conductance à travers l'espace entre le patch et le plan de masse, elle est donnée par :

$$G_{rad} = \frac{(k_0 a_e)^2}{480} \int_0^{\pi/2} [J_{02}'^2 + \cos^2 \theta J_{02}^2] \sin \theta d\theta \quad (\text{I.9})$$

G_c est la conductance due aux pertes de conduction, elle est donnée par [2] :

$$G_c = \frac{\varepsilon_{m0}\pi(\pi\mu_0 f_r)^{-3/2}}{4h^2\sqrt{\sigma}} [(ka_e)^2 - m^2] \quad (\text{I.10})$$

G_d est la conductivité due aux pertes diélectriques, elle est donnée par [2]:

$$G_d = \frac{\varepsilon_{m0} \tan \delta}{4\mu_0 h f_r} [(ka_e)^2 - m^2] \quad (\text{I.11})$$

Où : $\varepsilon_{m0} = 2$ pour $m = 0$, $\varepsilon_{m0} = 1$ pour $m \neq 0$ et f_r représente la fréquence de résonance du mode mn_0 .

tan δ : est la tangente de perte du matériau du substrat.

• L'impédance d'entrée résonante d'un patch circulaire avec une alimentation encastrée, qui est généralement une sonde, peut être écrite comme [2] :

$$Z_{in}(\rho' = \rho_0) = Z_{in}(\rho' = a_e) = \frac{1}{G_t} \frac{J_1^2(k\rho_0)}{J_1^2(ka_e)} \quad (\text{I.12})$$

$$Z_{in}(\rho' = a_e) = \frac{1}{G_t} \quad (\text{I.13})$$

I.9.2 Le facteur de qualité

Le facteur de qualité est une figure de mérite représentative des pertes de l'antenne. En général, il y a des pertes de rayonnement, de conduction (ohmiques), diélectriques et de surface d'onde. Par conséquent, le facteur de qualité total Q_t est influencé par toutes ces pertes et est, en général, écrit comme [14] :

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (\text{I.14})$$

Q_t = facteur de qualité total ;

Q_{rad} = facteur de qualité dû aux pertes par rayonnement (ondes spatiales) ;

Q_c = facteur de qualité dû aux pertes par conduction (ohmiques) ;

Q_d = facteur de qualité dû aux pertes diélectriques ;

Q_{sw} = facteur de qualité dû aux ondes de surface.

Pour des substrats très fins, les pertes dues aux ondes de surface sont très faibles et peuvent être négligées. Cependant, pour des substrats plus épais, elles doivent être prises en compte [15]. Ces pertes peuvent également être éliminées en utilisant des cavités [16] [17]. Pour des substrats très fins ($h \ll \lambda_0$) de formes arbitraires (y compris rectangulaires et circulaires), il existe des

formules approximatives pour représenter les facteurs de qualité des différentes pertes [2] [15] [18]. Celles-ci peuvent être exprimées comme :

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (\text{I.15})$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (\text{I.16})$$

$$Q_{\text{rad}} = \frac{2\omega \varepsilon_r}{hG_t/l} K \quad (\text{I.17})$$

où $\tan \delta$ est la tangente de perte du matériau du substrat, σ est la conductivité des conducteurs associés au patch et au plan de masse, G_t/l est la conductance totale par unité de longueur de l'ouverture rayonnante et K est un facteur de proportionnalité ou de correction qui dépend des spécificités de l'antenne.

I.9.3 La bande passante

La bande passante est une caractéristique essentielle qui permet de déterminer la plage de fréquences sur laquelle l'antenne peut fonctionner efficacement. Autrement dit, c'est l'intervalle de fréquences où les performances de l'antenne sont acceptables et adaptées à l'application prévue. Les antennes patches sont par nature des antennes à bande étroite. La BW d'une antenne CMSA est inversement proportionnelle à la racine carrée de la constante diélectrique du substrat. : [2]

$$BW = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (\text{I.18})$$

I.9.4 Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est crucial pour comprendre comment l'antenne émet et reçoit les ondes électromagnétiques. Le diagramme de rayonnement d'une antenne patch typique présente un lobe principal dominant. Ce lobe principal est généralement dirigé perpendiculairement à la surface du patch, c'est-à-dire à 90° par rapport au plan de l'antenne. Les diagrammes de rayonnement théoriques et mesurés dans les plans E et H sont donnés dans la Figure 1.8. Le rayonnement est dans la direction broadside, et le gain théorique est de 6,4 dB. Les niveaux de polarisation croisée mesurés sont inférieurs à -20 dB. L'écart entre les diagrammes théoriques et expérimentaux est dû au plan de masse fini du patch circulaire. Le diagramme de rayonnement normalisé du CMSA peut également être calculé en utilisant les équations suivantes [19] :

$$E_\theta = [J_{n+1}(k_0 a \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a \sin \theta)] \cos n\theta \quad (\text{I.19})$$

$$E_{\varphi} = [J_{n+1}(k_0 a \sin \theta) + J_{n-1}(k_0 a \sin \theta)] \cos \theta \sin n\varphi \quad (I.20)$$

où : J_{n+1} et J_{n-1} sont respectivement les fonctions de Bessel d'ordre $n+1$ et $n-1$ [19].

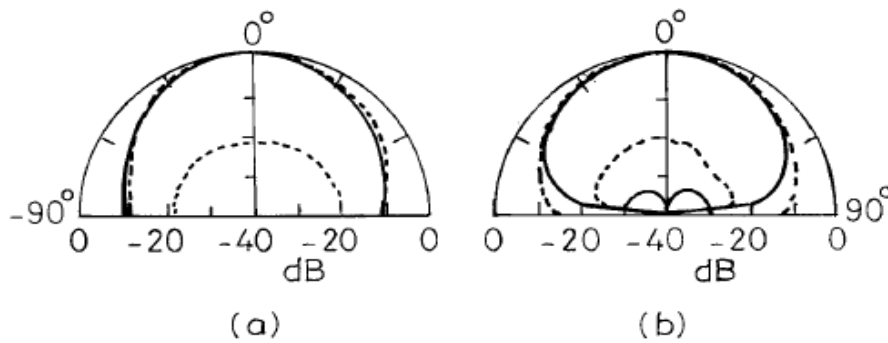


Figure 1.8 : Diagramme de rayonnement du CMSA dans le (a) plan E et (b) plan H : (—) théorique et (- - -) mesuré.

- L'amplitude des champs est donnée par :

$$f(\theta, \varphi) = \sqrt{E_{\theta}^2 + E_{\varphi}^2} \quad (I.21)$$

I.9.5 La directivité

La directivité des antennes patches est généralement de l'ordre de 5 à 7 dB. Les champs électromagnétiques qu'elles émettent sont polarisés de manière linéaire, principalement dans la direction horizontale lorsqu'on observe l'antenne microstrip. La directivité du CMSA est donnée par [2] :

$$D = \frac{(k_0 a_e)^2}{120 Grad} \quad (I.22)$$

Où : k_0 est le nombre d'onde dans le vide tel que :

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (I.23)$$

I.9.6 Le gain

Pour les antennes patches courantes, le gain est situé entre 5 et 7 dBi. On peut déterminer le gain en fonction de la directivité et du rendement de l'antenne comme suit : [2] [19]

$$G = \eta D \quad (I.24)$$

Où : η représente le rendement de l'antenne (L'efficacité).

I.9.7 Le coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion Γ est souvent calculé par le paramètre S_{11} de la matrice S . C'est une mesure de la proportion de la puissance de l'onde électromagnétique incidente qui est réfléchie

par l'antenne. Autrement dit, il s'agit du rapport entre les amplitudes des ondes réfléchies et celles des ondes incidentes.

Pour une antenne d'impédance d'entrée Z_e , reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique Z_c , le coefficient de réflexion est défini comme suit [2] [19] [20] :

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad (I.25)$$

Le coefficient de réflexion est exprimé en dB par :

$$S_{11}(dB) = 20 \log(S_{11}) \quad (I.26)$$

I.9.8 Rapport d'onde stationnaire (ROS)

Connu également sous le nom « Taux d'onde stationnaire », est un paramètre qui permet de s'assurer que l'énergie est efficacement transférée de l'émetteur à l'antenne, sa valeur doit être inférieure ou égale à 1. Il est défini par [2] [19] [20] :

$$ROS = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (I.27)$$

Où : Γ représente le module du coefficient de réflexion.

I.9.9 La polarisation croisée et la co-polarisation (co and cross polarization)

La polarisation croisée et la co-polarisation sont des phénomènes très importants à prendre en considération lors de la conception et de l'analyse des antennes patches, car ils ont un impact majeur sur leur fonctionnement. Ces termes font référence à l'orientation du champ électrique généré par l'antenne par rapport à un plan de référence spécifique.

La polarisation croisée se produit lorsque les champs électriques dominants de deux antennes ne sont pas alignés. En d'autres termes, les ondes électromagnétiques émises par les antennes ne se propagent pas dans la même direction. La polarisation croisée est la polarisation orthogonale à la polarisation souhaitée. Par exemple, si les champs d'une antenne sont censés être polarisés horizontalement, la polarisation croisée dans ce cas est la polarisation verticale. Si la polarisation est circulaire droite, la polarisation croisée est circulaire gauche.

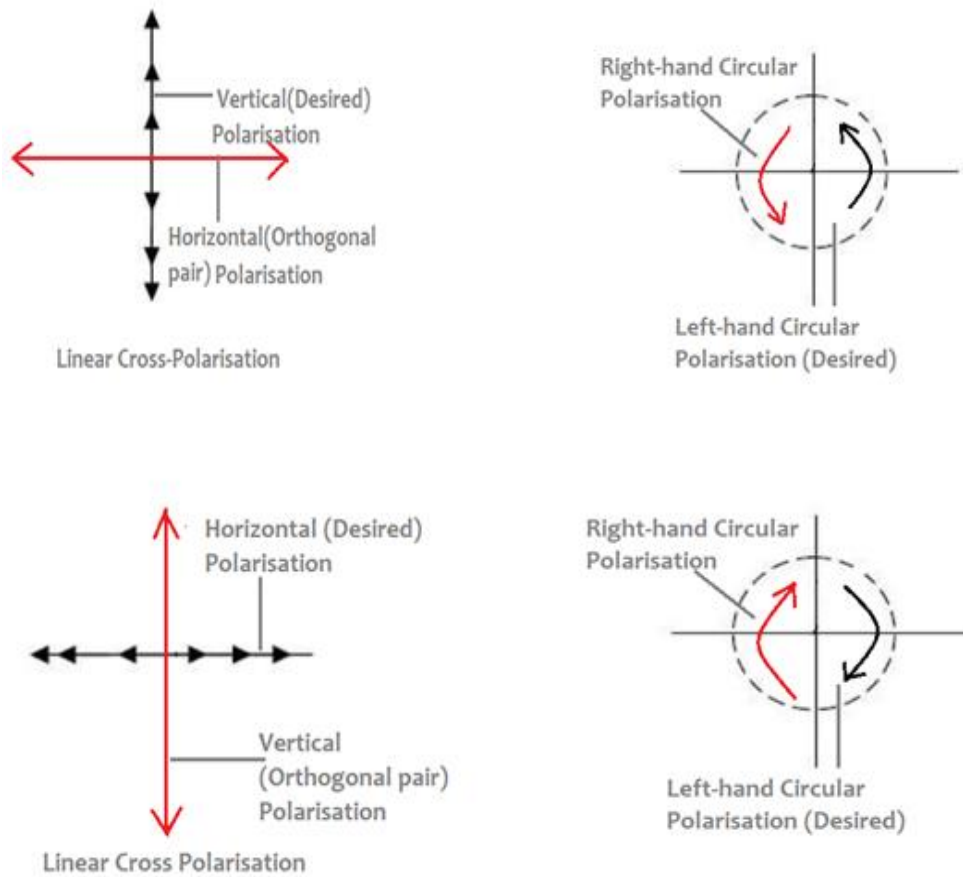


Figure I. 9 : La polarisation croisée.

D'autre part, la co-polarisation se produit lorsque les champs électriques dominants de deux antennes sont alignés. Cela signifie que les ondes électromagnétiques se propagent dans la même direction, ce qui permet de maximiser la puissance du signal émis. La co-polarisation est donc souhaitable dans de nombreuses applications, car elle permet d'optimiser les performances des antennes patchs.

Il est essentiel de comprendre ces phénomènes pour pouvoir optimiser les performances des antennes patchs dans différentes applications. En fonction de l'application spécifique, il peut être nécessaire de privilégier la polarisation croisée ou la co-polarisation [20].

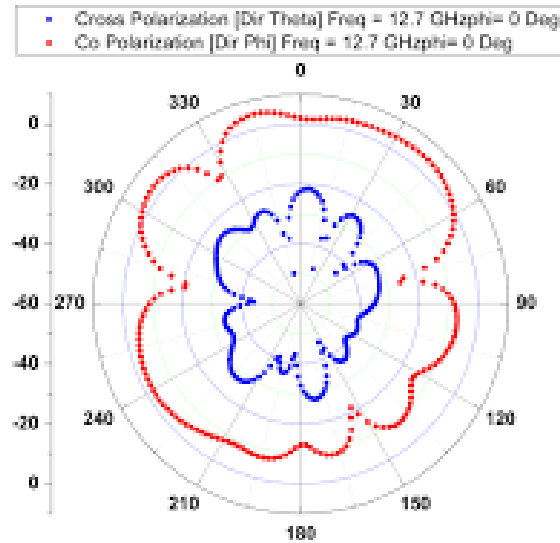


Figure I. 5 : Co et Cross polarisations.

Par exemple, dans certains cas, la polarisation croisée peut être utilisée pour réduire les interférences entre différentes antennes, tandis que dans d'autres cas, la Co-polarisation peut être préférée pour maximiser la qualité et la puissance du signal émis [20].

La conception et l'analyse des antennes patch doivent prendre en compte ces phénomènes de polarisation pour garantir des performances optimales. Des techniques sophistiquées sont utilisées pour mesurer et analyser la polarisation des antennes, telles que la réalisation de mesures de diagramme de rayonnement ou l'utilisation de logiciels de simulation électromagnétique avancés.

I.10 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons exploré les bases des antennes patches, en mettant en avant leurs caractéristiques essentielles pour leur bon fonctionnement. Les antennes patches, également connues sous le nom d'antennes Microstrip, représentent une solution polyvalente et efficace pour de nombreuses applications et communications sans fil en raison de leur conception compacte, leur facilité de fabrication et leur faible coût, ces derniers en font un choix privilégié pour les dispositifs portables et les systèmes embarqués. Nous avons notamment discuté des techniques d'alimentations des antennes imprimés, les principaux avantages et inconvénients des antennes MSA ainsi que des paramètres qui permettent d'évaluer et optimiser les performances. Pour cela, une attention particulière doit être portée aux paramètres tels que l'impédance d'entrée, la bande passante, la polarisation, la directivité, le gain, le taux d'onde stationnaire et le diagramme de rayonnement.

En général, la compréhension des généralités sur les antennes patches, leurs caractéristiques et les méthodes d'alimentation est fondamentale pour leur conception et leur optimisation dans les systèmes de communication modernes.

Cependant, face à l'évolution des besoins en termes de transmission de données à haute vitesse et la demande croissante pour des dispositifs compacts et polyvalents, l'antenne patch traditionnelle montre certaines limitations, notamment en termes de bande passante. Ces contraintes ont conduit à l'émergence de nouveaux concepts d'antennes, dont les antennes patch large bande.

Le prochain chapitre abordera donc en détail les antennes patch large bande, en examinant les différentes techniques utilisées pour étendre leur bande passante tout en conservant les avantages inhérents aux antennes patch. Nous y analyserons les modifications de conception qui permettent d'améliorer les performances de ces antennes pour répondre aux exigences des applications modernes.

Chapitre 2 :
Antennes patches large bande

II.1 Introduction

Les MSAs, dans leur forme conventionnelle, sont des structures à bande étroite. Leur largeur de bande d'impédance est généralement de 1 à 2 %. Cela peut être attribué à deux facteurs : le style de résonance de l'antenne (qui fait rayonner l'antenne efficacement seulement sur une bande étroite de fréquences) et l'épaisseur mince de l'antenne, généralement inférieure à $0,05\lambda_0$. Cette caractéristique des antennes patch Microstrip conventionnelles les rend inadaptées à de nombreuses applications nécessitant une large bande passante. Ainsi, de nombreuses recherches ont été menées au cours des dernières décennies pour surmonter cette limitation et plusieurs procédures ont été proposées. Dans ce chapitre, une variété de procédures proposées pour augmenter la largeur de bande d'impédance des antennes patch Microstrip sont présentées et discutées. Nous allons fournir une compréhension approfondie des techniques disponibles pour l'élargissement de la bande passante des antennes patches, en explorant diverses méthodes innovantes et éprouvées pour améliorer les performances. De plus, une étude de l'influence du plan de masse sur la performance des antennes patch sera examinée en détail. Le plan de masse, souvent sous-estimé, joue un rôle crucial dans le comportement électromagnétique de l'antenne. Différentes formes et structures de plan de masse peuvent avoir un impact significatif sur la bande passante, la directivité, et l'efficacité de rayonnement de l'antenne patch.

II.2 Problématique de la bande passante étroite

Les antennes patch conventionnelles présentent des limitations en termes de bande passante, ce qui restreint grandement leur capacité à couvrir une large gamme de fréquences. Cela peut être considéré comme un inconvénient majeur dans les applications nécessitant une large bande passante, telles que les réseaux sans fil à haut débit ou les communications par satellite. Par conséquent, il est crucial de trouver des solutions pour élargir la bande passante des antennes patches conventionnelles.

Plusieurs approches sont actuellement étudiées pour résoudre ce problème. Parmi ces approches, on trouve l'utilisation de structures d'antennes patch modifiées, telles que les antennes patch à fente, l'utilisation des substrats épais et à faible permittivité, les antennes patch résonantes etc. Ces structures présentent des propriétés électromagnétiques spécifiques qui permettent d'augmenter la bande passante des antennes patches.

II.3 L'importance d'élargir la bande passante de l'antenne patch

- **Support des communications à large bande**

Les systèmes de communication modernes nécessitent souvent une large bande passante pour transmettre des données à des débits élevés. Une antenne patch avec une bande passante élargie peut supporter une plus grande variété de fréquences, permettant ainsi des communications à large bande plus efficaces.

- **Polyvalence et flexibilité**

Une antenne avec une large bande passante peut être utilisée dans plusieurs applications et environnements, réduisant le besoin de multiples antennes pour différentes fréquences. Cela simplifie la conception et la mise en œuvre des systèmes de communication.

- **Réduction des interférences et des pertes de signal**

Une bande passante élargie permet à l'antenne de mieux gérer les variations de fréquence et les interférences, ce qui améliore la qualité et la fiabilité des communications.

- **Compatibilité avec les technologies avancées**

Les technologies sans fil évoluent rapidement, et les antennes avec une bande passante élargie sont mieux préparées pour s'adapter aux nouvelles normes et technologies, telles que la 5G, le Wi-Fi 6, et d'autres systèmes de communication avancés.

Pour ces raisons, l'élargissement de la bande passante des antennes patch est une priorité dans la conception de systèmes de communication modernes et avancés.

II.4 Techniques d'élargissement de la bande passante

Traditionnellement, une antenne micro ruban a une bande passante étroite de l'ordre de 2% et cela s'agit d'un inconvénient grave qui l'empêche d'être utilisée dans de nombreuses applications hyperfréquences. Pour régler ce problème, Diverses techniques ont été mises en œuvre pour augmenter la bande passante des antennes à micro-ruban, laquelle est considérée comme relativement limitée jusqu'à présent. Nous allons donner, dans ce qui suit, un aperçu sur les techniques qui peuvent servir à l'amélioration de la bande passante d'une antenne patch.

II.4.1 Impact du choix du substrat

Les caractéristiques du substrat jouent un rôle essentiel dans la réalisation de l'objectif d'élargissement de la bande passante. Parmi les paramètres à prendre en compte figurent la permittivité diélectrique et l'épaisseur du substrat. Ces paramètres déterminent la capacité du

substrat à soutenir une plus grande largeur de bande pour les antennes. Nous avons deux techniques en utilisant le substrat, l'une consiste à augmenter l'épaisseur du substrat et l'autre à diminuer la constante diélectrique du substrat de l'antenne. Cela peut également être observé dans la figure II.1 [1].

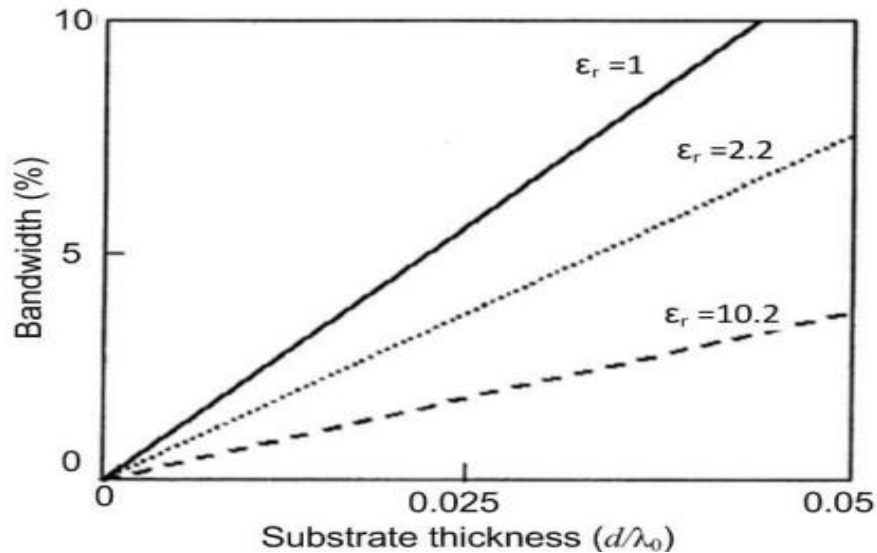


Figure II. 1 : Effet de l'épaisseur du substrat et de sa permittivité sur la bande passante de l'antenne patch [1].

En fait, en augmentant l'épaisseur du substrat du patch rayonnant, la taille de l'ouverture par laquelle les champs sont rayonnés dans l'espace peut être augmentée, ce qui simplifie l'adaptation d'impédance de l'ouverture de l'antenne, et donne une amélioration de la bande passante de l'antenne. D'autre part, en diminuant la permittivité du substrat (en la rapprochant de la permittivité de l'espace extérieur), le coefficient de réflexion à l'ouverture de l'antenne est réduit, ce qui facilite l'adaptation d'impédance et offre une bande passante plus large pour l'antenne [2].

Il est important de souligner que plus l'épaisseur du substrat est élevée et plus la constante diélectrique est faible, plus la taille du patch est petite, autrement dit : Lorsque l'épaisseur du substrat augmente, la distance entre le patch et le plan de masse devient plus grande. Cela modifie la résonance de l'antenne et peut entraîner une réduction de la taille du patch nécessaire pour atteindre la même fréquence de résonance. Par conséquent, cela entraîne un gain plus faible. En outre, l'énergie émise par le réseau d'alimentation augmente, ce qui provoque une augmentation des radiations parasites et un niveau de polarisation croisée accru. De plus, on excite d'avantage les ondes de surface, ce qui diminue l'efficacité de rayonnement de l'antenne [2].

En prenant en considération les facteurs limitants mentionnés ci-dessus, en plus du fait qu'il existe des valeurs limitées pour les épaisseurs et les constantes diélectriques fournies par les substrats commerciaux standard, l'augmentation de la bande passante par les techniques citées ci-dessus ne peut pas dépasser 10% [3], ce qui reste insuffisant pour de nombreuses applications telles que les radars ou la télévision par satellite.

II.4.2 Impact de l'alimentation

Dans toutes les techniques d'alimentation proposées présentées dans le chapitre 1, la technique de couplage à proximité est la technique qui permet d'obtenir une large bande. En fait, en introduisant un mécanisme de couplage entre le réseau d'alimentation et le patch, une résonance est créée à proximité de la résonance du patch, ce qui peut entraîner une amélioration de la bande passante de l'antenne si le réseau d'alimentation et le patch sont bien couplés. [4] [11] [12] [21] [22].

- **Alimentation par couplage à proximité**

La compensation de la sonde peut être réalisée en réduisant l'inductance. L'inductance de la sonde peut être réduite en abaissant la hauteur de la sonde, en augmentant son diamètre ou en ajoutant une capacité en série. Cette capacité en série peut être réalisée soit en ajoutant physiquement un condensateur discret, soit de plusieurs autres façons comme illustré à la Figure II.2 [4]. Dans la Figure 2(a), la capacité en série est réalisée en gravant un petit trou dans le patch autour de la sonde [5]. Dans la Figure 2(b), la sonde est prolongée au-delà du patch et une petite bande conductrice est soudée à son extrémité ; alternativement, la sonde peut être juste en dessous du patch avec la bande métallique comme montré dans la Figure 2(c) [6]. La technique de l'alimentation par couplage à proximité donne une excitation symétrique avec une bande passante légèrement améliorée [7], [22], [24], [27].

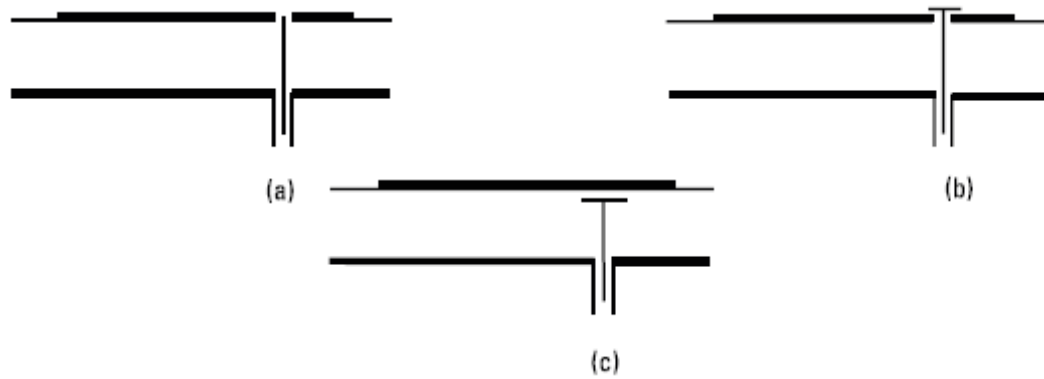


Figure II. 2 : RMSA avec différents types de compensation de la sonde : (a) petit trou autour de la sonde, (b) bande de cuivre à l'extrémité de la sonde, (c) bande métallique connectée à la sonde sous le patch.

- **Alimentation par couplage d'ouverture**

La topologie de l'alimentation par couplage d'ouverture est représentée dans la **figure II.3**. Ce système d'alimentation consiste à exciter le patch rayonnant situé sur la couche supérieure (la couche rayonnante) à l'aide d'une ligne d'alimentation en microruban imprimée sur la couche inférieure (la couche d'alimentation) via une ouverture (fente) gravée au niveau du plan de masse.

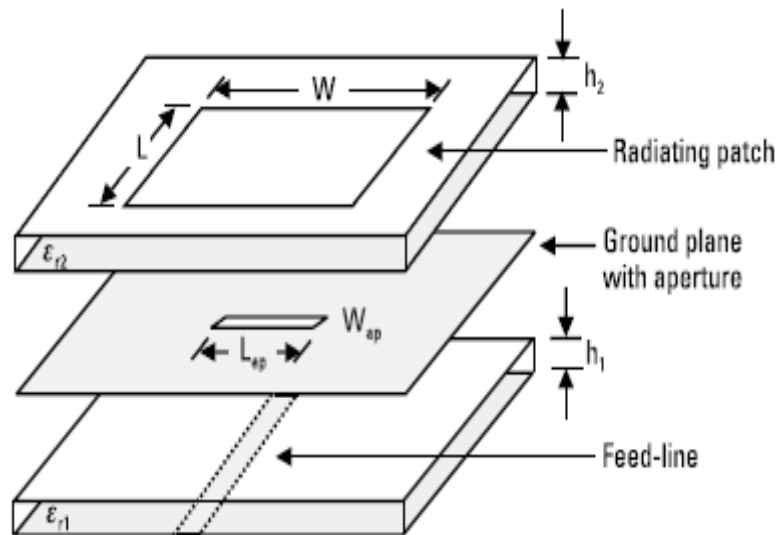


Figure II. 3 : Alimentation par couplage avec fente [23].

Dans cette structure, deux résonances sont fournies, l'une par le patch et l'autre par la fente. Lorsque ces deux radiateurs sont bien couplés, leurs résonances respectives se rapprochent, ce qui améliore la bande passante de l'antenne. Le bon couplage entre la fente et le patch peut être atteint en ajustant les dimensions de la fente. Cela permet d'obtenir une bande passante d'environ 20 à 30 % [1].

Pour augmenter davantage la bande passante, une couche diélectrique épaisse peut être utilisée pour la couche rayonnante. Dans ce cas, la taille de la fente doit être augmentée pour s'assurer que la puissance est toujours correctement couplée au patch. Une largeur de bande de 40 % a été obtenue en utilisant cette technique simple [9]. Dans cette technique, la forme et la taille de la fente de couplage peuvent considérablement affecter la puissance couplée et donc la bande passante et l'efficacité de l'antenne. En général, à mesure que la puissance de couplage augmente en modifiant la forme de la fente, un substrat plus épais pour la couche rayonnante peut être utilisé, ce qui conduit à une largeur de bande d'impédance plus large. D'autre part, à mesure que la taille de la fente diminue, le rayonnement arrière, principalement causé par la fente, diminue, ce qui améliore l'efficacité de l'antenne. En fait, en choisissant la forme appropriée pour la fente, nous cherchons à obtenir un couplage maximal avec la plus petite taille de fente. De cette manière, nous pouvons améliorer d'avantage la bande passante en augmentant l'épaisseur de la couche rayonnante ou en réduisant sa constante diélectrique, tout en garantissant une efficacité maximale.

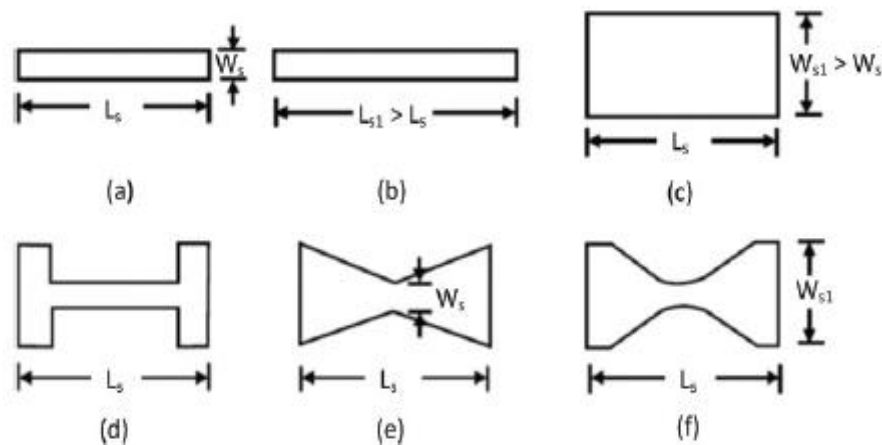


Figure II. 4 : Différentes formes utilisées pour la fente de couplage : (a) rectangulaire mince, (b) rectangulaire plus longue, (c) rectangulaire plus large, (d) en forme de 'H', (e) en forme de papillon (bowtie), et (f) en forme de sablier [3][10].

Une des formes les plus utilisées pour la fente de couplage est un rectangle mince (Figure II.4(a)), grâce auquel un couplage fort peut être obtenu avec une conception simple. Cependant, un couplage plus fort peut être réalisé en l'allongeant ou en l'élargissant (comme illustré dans les Figures II.4(b et c)). Les fentes en forme de "H" et en forme de papillon (Figures II.4(d et e)) peuvent offrir un couplage plus fort que la fente rectangulaire, car l'amplitude des champs dans une fente rectangulaire varie sinusoidalement. Cependant, dans les fentes en forme de "H" et en forme de papillon, cette amplitude est assez uniforme. En combinant les fentes en forme

de "H" et en forme de papillon, c'est-à-dire en créant une fente en forme de sablier comme illustré dans la Figure II.4(f), une distribution de champ encore plus uniforme à travers la fente et donc un couplage plus fort peuvent être obtenus [3] [7].

- **Éléments parasites sur la couche unique**

En ajoutant quelques éléments parasites correctement couplés à l'élément excité sur la même couche rayonnante, notamment des patches parasites couplés horizontalement au patch, il est possible d'améliorer la largeur de bande globale de l'antenne si les fréquences de résonance des éléments parasites sont légèrement différentes de celle du patch. Comme indiqué dans la Figure II.5, la réponse en fréquence globale est la somme des réponses en fréquence des patches individuels. Dans cette technique, à la fois l'élément rayonnant et les éléments parasites sont disposés sur la même couche, simplifiant ainsi le processus de fabrication de l'antenne. Cependant, un inconvénient majeur de cette méthode est que la taille totale de l'antenne est importante, ce qui peut entraîner des lobes de diffraction lorsqu'elle est utilisée en réseau. De plus, l'asymétrie de la structure de l'antenne par rapport au centre du patch actif peut altérer le diagramme de rayonnement [25] [28].

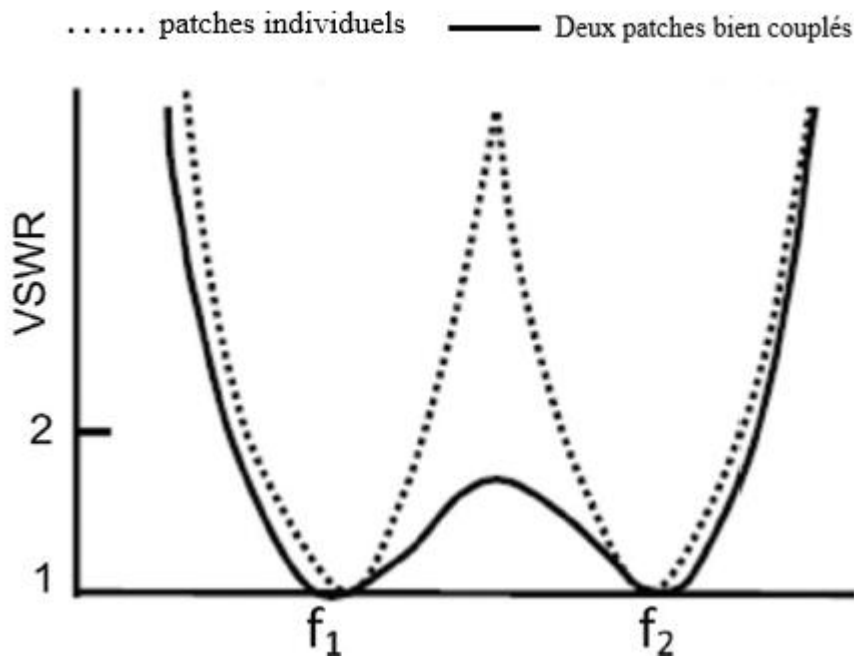


Figure II. 5 : Amélioration de la largeur de bande en introduisant un patch factice couplé au patch excité, (les fréquences de résonance des deux résonateurs sont assez différentes). [2]

- Patches empilés

Le concept d'empilement est employé dans les antennes micro-ruban lorsque le patch excité est couplé verticalement à un autre patch. Cette solution permet de résoudre le problème de la grande taille planaire de l'antenne (qui était un problème pour les solutions présentées dans la technique précédente où le couplage entre les patches parasites et le patch excité était établi horizontalement), et donc de résoudre le problème des lobes de réseaux lorsque l'antenne est utilisée dans un réseau. Toutefois, dans cette méthode, l'antenne étant à deux couches, le processus de fabrication est bien plus complexe que celui des antennes à simple couche exposées dans la section précédente. En employant cette méthode, on obtient une largeur de bande d'environ 20% [25][26][29].

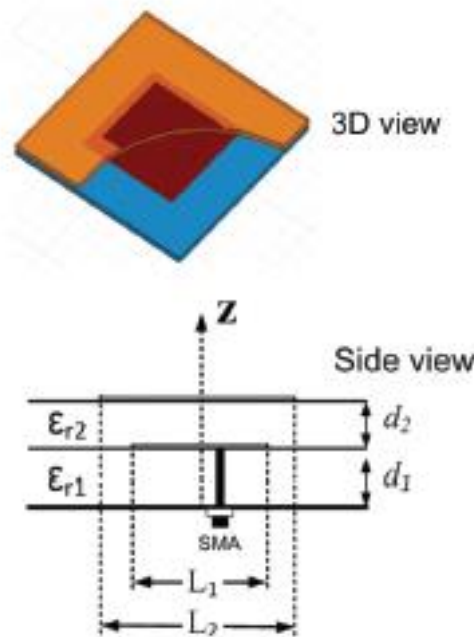


Figure II. 6: Le concept de superposition (Un patch rectangulaire empilé).

Dans la structure présentée dans la Figure II.6, on peut observer deux résonateurs : le patch rayonnant et le patch parasite. Les dimensions des patches sont sélectionnées lors de la conception afin qu'ils résonnent à la même fréquence. Les dimensions des deux patches sont différentes en raison de l'utilisation de deux substrats différents avec des constantes diélectriques différentes (ϵ_1 , ϵ_{r2}). Les deux résonances sont déplacées l'une par rapport à l'autre grâce au couplage mutuel entre les patches, ce qui entraîne une résonance mutuelle qui augmente la bande passante.

Lorsque les épaisseurs et les permittivités des substrats sont correctement choisies, il est possible de réaliser un couplage adéquat entre les deux résonances, ce qui entraîne une amélioration de la bande passante. On peut augmenter la largeur de la bande d'impédance en diminuant le couplage en utilisant une permittivité élevée. Ainsi, on obtient une efficacité élevée des ondes de surface, ce qui améliore les performances de rayonnement de l'antenne.

- **Patches superposés par ouverture**

Les patches empilés par ouverture sont des structures multicouches qui permettent d'atteindre des largeurs de bande de 50 à 70 %. La configuration générale d'une antenne à patch empilé par ouverture est illustrée dans la Figure II.8. Elle est composée de deux patches, de deux couches diélectriques et d'un plan de masse sur lequel est gravée la fente de couplage.

Dans cette configuration, contrairement aux patches empilés ordinaires montrés à la Figure II.7, le patch excité (le plus bas) est alimenté indirectement, introduisant ainsi un mécanisme de couplage supplémentaire (entre la ligne d'alimentation et le patch rayonnant), ce qui se traduit par une largeur de bande d'impédance plus large [25].

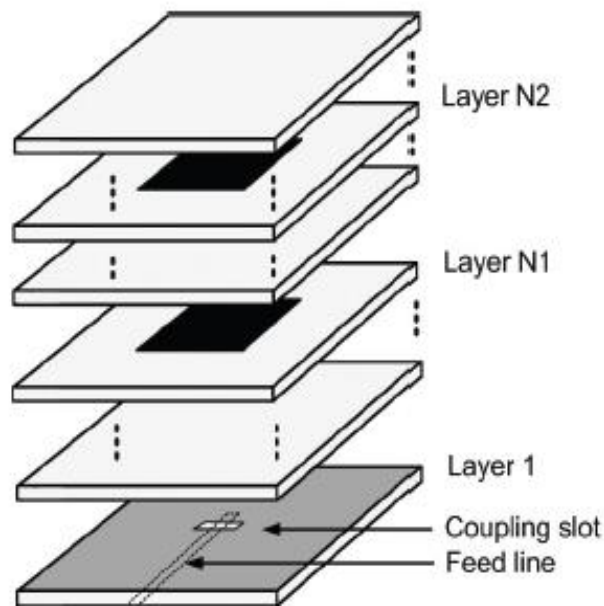


Figure II. 7: La configuration générale d'une antenne à patch empilé par ouverture.

II.5 L'effet du plan de masse sur les MSAs

Le plan de masse est l'une des parties les plus importantes d'une antenne patch micro-ruban, car il influence de nombreuses caractéristiques de l'antenne [3] [10]. Ainsi, il est nécessaire pour un concepteur d'antennes de comprendre les effets du plan de masse sur les caractéristiques de l'antenne afin de pouvoir choisir une taille de plan de masse adaptée à l'application donnée.

La taille du plan de masse affecte les performances de l'antenne telles que le gain, le diagramme de rayonnement et l'efficacité. En règle générale, le plan de masse devrait s'étendre au-delà des bords du patch pour un fonctionnement correct. Un plan de masse trop petit entraînera une réduction du rapport avant/arrière. Augmenter la taille du plan de masse augmente également le gain, mais à mesure que la taille du plan de masse augmente, la diffraction près des bords joue un rôle moins important et l'augmentation de la taille d'un plan de masse déjà grand a très peu d'effet sur le gain.

- **Impédance et adaptation**

Le plan de masse joue un rôle déterminant dans l'adaptation d'impédance de l'antenne. Il influence la distribution des champs électromagnétiques et peut affecter l'impédance d'entrée de l'antenne. Un plan de masse bien conçu permet de mieux adapter l'antenne au circuit d'alimentation, minimisant ainsi les pertes de retour et optimisant le transfert d'énergie.

- **La bande passante**

Le choix de la forme et des dimensions du plan de masse peut élargir ou réduire la bande passante de l'antenne patch. Un plan de masse modifié, par exemple, peut introduire des modes de résonance supplémentaires qui augmentent la largeur de bande. À l'inverse, un plan de masse trop petit ou mal conçu peut limiter les performances en termes de bande passante.

- **Le gain et la directivité**

La forme et la taille du plan de masse influencent le gain et la directivité de l'antenne. Un plan de masse plus grand ou une conception innovante (comme un plan de masse en forme de papillon) peut améliorer la directivité en concentrant le rayonnement dans une direction particulière. Cependant, une conception qui favorise la bande passante peut parfois entraîner une diminution du gain en raison de la dispersion des champs.

- **La polarisation croisée**

Le plan de masse peut également jouer un rôle dans la réduction de la polarisation croisée. En utilisant des configurations de plans de masse modifiés, on peut minimiser la polarisation croisée, ce qui est particulièrement important dans les applications de communication où la qualité du signal est primordiale.

En résumé, le plan de masse est un élément clé dans la conception des antennes patch, influençant des paramètres tels que l'impédance, la bande passante, le gain, la directivité et la polarisation. Une conception réfléchie du plan de masse permet d'optimiser les performances de l'antenne pour des applications spécifiques.

II.6 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a mis en lumière l'importance d'élargir la bande passante des antennes patches micro-ruban pour répondre aux exigences croissantes des applications modernes en communication sans fil. Nous avons exploré diverses techniques d'élargissement de la bande passante, telles que l'utilisation de substrats à faible permittivité, la découpe de fentes dans le patch, l'emploi de structures empilées etc. Chacune de ces méthodes offre des avantages spécifiques et peut être adaptée en fonction des besoins particuliers de l'application.

En parallèle, l'effet du plan de masse sur les performances de l'antenne patch a été analysé. La géométrie du plan de masse a un impact significatif sur les paramètres clés tels que le gain, l'impédance d'entrée, et le diagramme de rayonnement (c'est ce que nous allons démontrer dans le chapitre 3). Comprendre et maîtriser ces influences permet de concevoir des antennes plus efficaces et mieux adaptées à leurs environnements d'utilisation.

En somme, la combinaison d'une bande passante élargie et d'un plan de masse optimisé est essentielle pour maximiser les performances des antennes patches micro-ruban. Les techniques et analyses présentées dans ce chapitre fournissent une base solide pour le développement de solutions antennaires avancées, capables de répondre aux défis techniques actuels et futurs.

Après cette étude théorique des antennes patch large bande et des méthodes pour optimiser leurs performances et élargir la bande passante, il est désormais essentiel de vérifier et de valider ces concepts par des simulations numériques. Ces simulations permettront d'évaluer leurs performances en termes de bande passante, de gain, de directivité, d'efficacité et de polarisation (co et cross polarizations).

Le prochain chapitre sera consacré à la simulation et à l'analyse des résultats obtenus. À travers le logiciel CST Microwave Studio, nous examinerons les performances des antennes patch large bande modélisées dans des environnements réalistes, afin de confirmer les améliorations théoriques présentées et d'étudier l'impact des paramètres de conception sur les résultats obtenus.

Chapitre 3 :
Simulations et discussion

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons détailler les simulations effectuées à l'aide du logiciel CST Microwave Studio et les résultats obtenus en simulant une antenne patch alimentée par couplage à proximité. Nous commencerons par une présentation des configurations de base utilisées pour nos simulations, puis nous allons montrer les résultats obtenus des différentes caractéristiques (Le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, etc.). De plus, nous examinerons les effets de divers paramètres de conception sur les performances de l'antenne. Ces paramètres incluent la taille du patch, l'épaisseur du substrat, ainsi que la méthode d'alimentation utilisée. Nous explorerons comment ces variables influencent sur l'antenne en termes de bande passante, gain, impédance d'entrée, et diagramme de rayonnement de l'antenne.

III.2 Objectif

- Elargir la bande passante de l'antenne patch.
- Etudier l'effet du changement dans le plan de masse.

III.3 Conception de l'antenne patch

III.3.1 Plan de masse forme rectangulaire

Soit la structure présentée sur la figure III.1, suspendue à trois couches où deux couches de substrat FR4 de permittivité $\epsilon_r = 4.3$ et d'épaisseur $h = 1.6 \text{ mm}$ sont séparées par un entrefer de 'ha'. Sur L'épaisseur totale : $ht = ha + 2h = 18.2 \text{ mm}$, se trouve le patch de forme circulaire CMSA de rayon $R = 65 \text{ mm}$. Afin de maintenir un profil plus réduit de l'antenne, on choisit un plan de masse carré avec une longueur $Lg = 150 \text{ mm}$.

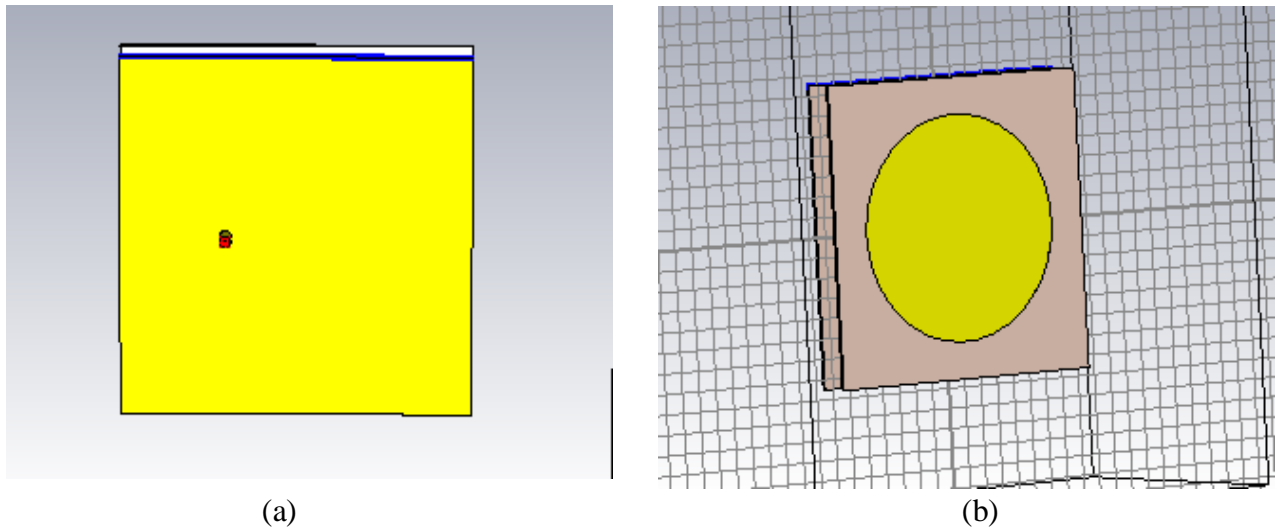


Figure III.1 : Réalisation de CMSA plan de masse rectangulaire. (a) : la structure vue du bas où le plan de masse apparaît. (b) : la structure vue de haut où l'élément rayonnant (le patch) apparaît

Les paramètres implémentés se trouvent dans le tableau suivant :

Plan de masse (Copper annealed)	$Xplan = Yplan (mm)$	150
	$hp (mm)$	0.017
Substrat 1 (FR-4)	$Xsub = Ysub (mm)$	150
	$h (mm)$	1.6
Air	$ha (mm)$	15
Alimentation par couplage à proximité (Ligne coaxiale)	$xf (mm)$	30
	$Lf (mm)$	12
	$hs (mm)$	14.6
	$din (mm)$	1.296
	$dout (mm)$	4.333
	$e (mm)$	0.3
Substrat 2 (FR-4)	$Xsub = Ysub (mm)$	150
	$h (mm)$	1.6
Patch (Copper annealed)	$R (mm)$	65
	$hp (mm)$	0.017

Tableau III.1 : Propriétés de l'antenne patch conçue.

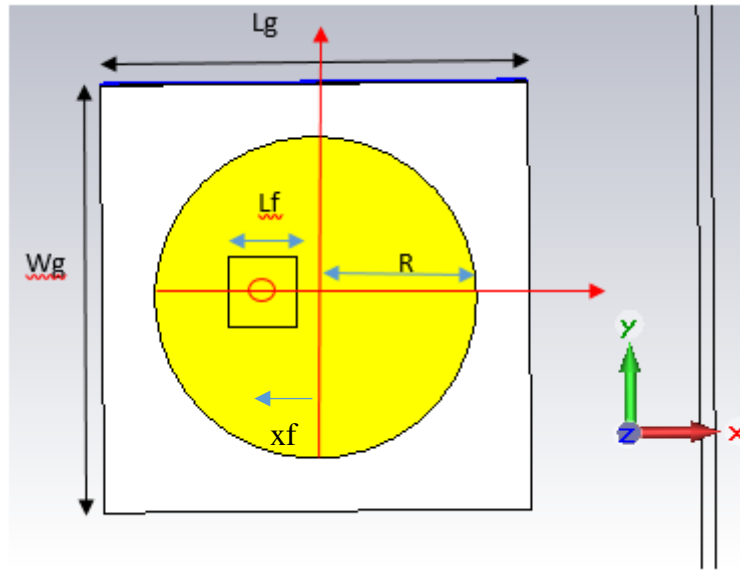


Figure III.2 : antenne patch conçu

Après avoir simulé l’antenne conçu en attribuant les valeurs présentées dans le tableau ci-dessus pour chaque paramètre, nous avons obtenu les résultats suivants :

- Coefficient de réflexion S11

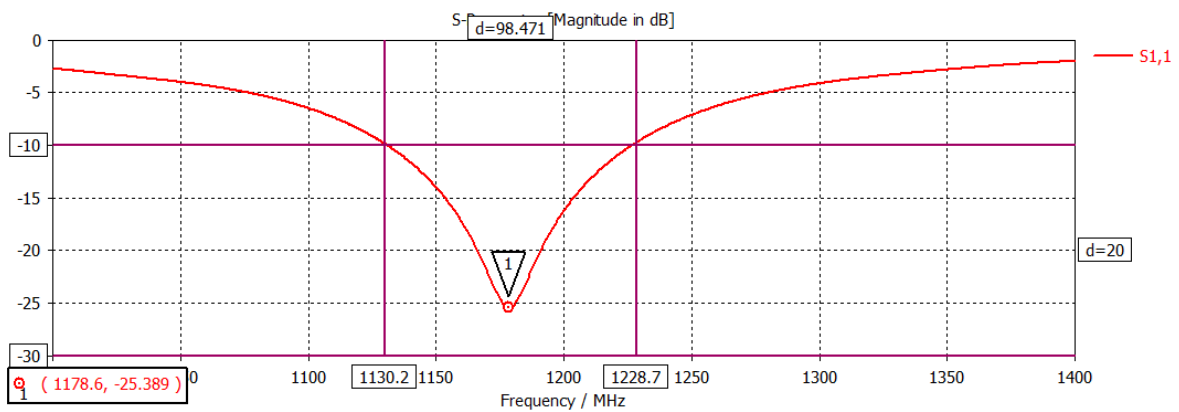


Figure III.3 : le coefficient de réflexion S11 de l’antenne patch conçu avec plan de masse rectangulaire.

La bande passante simulée du CMSA alimenté par proximité avec un plan de masse de forme rectangulaire est de 98.471 MHz (8 %).

- Le diagramme de rayonnement

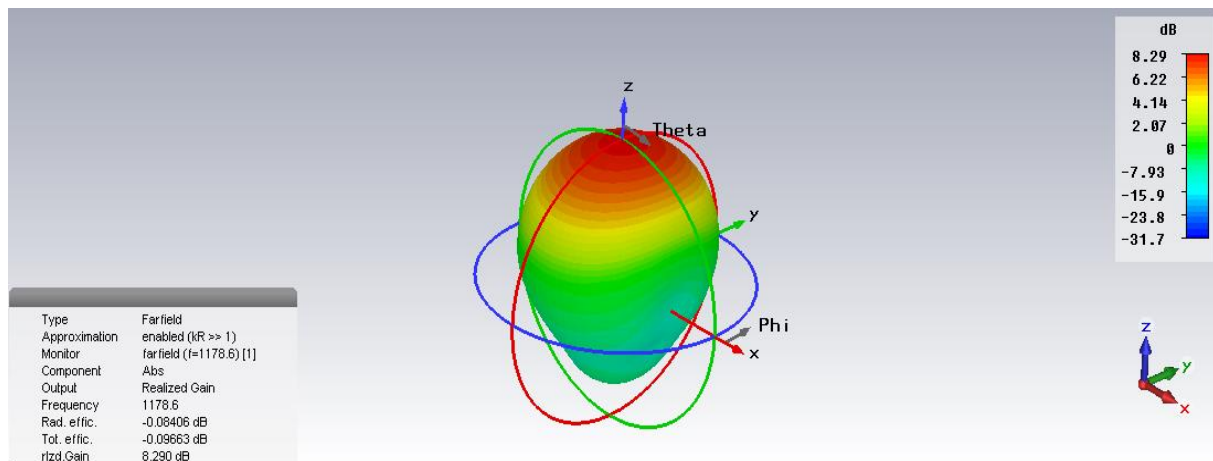


Figure III.4 : le diagramme de rayonnement de l'antenne.

Sur l'ensemble de la bande passante, le CMSA présente un gain maximal de 8.290 *dBi* et une directivité de 8.386 *dBi*.

III.3.2 Plan de masse forme papillon

Soit la structure présentée sur la figure III.2, suspendue à trois couches où deux couches de substrat FR4 de permittivité $\epsilon_r = 4.3$ et d'épaisseur $h = 0.14 \text{ mm}$ sont séparées par un entrefer de 'ha'. Sur L'épaisseur totale : $ht = ha + 2h = 17.8 \text{ mm}$, se trouve le patch de forme circulaire CMSA de rayon $R = 65 \text{ mm}$. Afin de maintenir un profil plus réduit de l'antenne, on choisit un plan de masse carré avec une longueur $L_g = 150 \text{ mm}$ et on perfore une encoche triangulaire de profondeur « d » (figure III.1(a)). La fente permet de diminuer les polarités croisées le long et en dessous des bords du patch. En revanche, on observe une encoche triangulaire en forme de nœud papillon en dessous du patch (Figure III.1(a)). La répartition de l'onde de frange sera modifiée, ce qui entraînera une modification du facteur de qualité de la cavité à patch au mode fondamental. Une analyse paramétrique est effectuée afin d'étudier les conséquences de « d » [30].

Ci-dessous la structure réalisée sur CST :

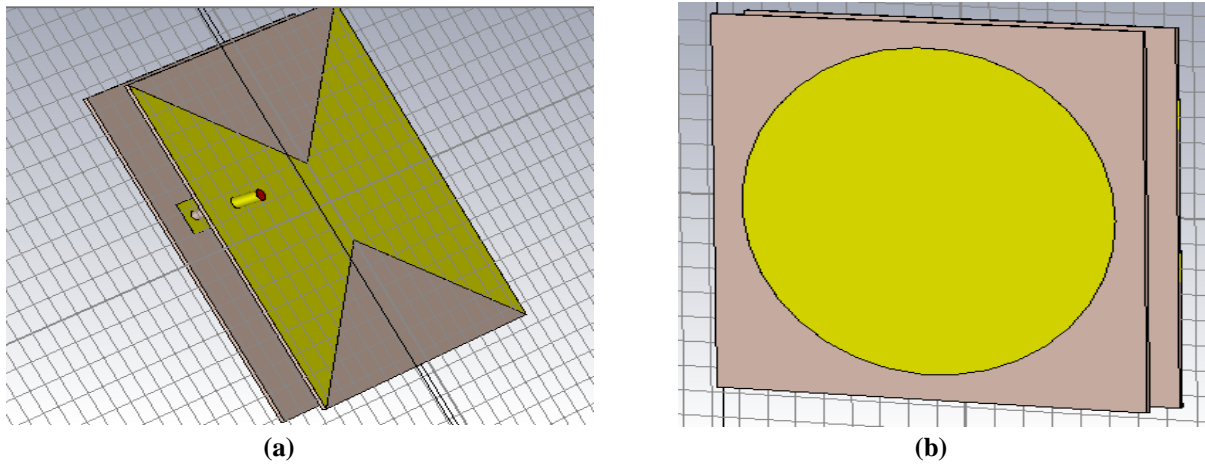


Figure III.5 : Réalisation de CMSA plan de masse papillon. (a) : la structure vue du bas où le plan de masse apparaît. (b) : la structure vue de haut où l'élément rayonnant (le patch) apparaît.

Les paramètres implémentés se trouvent dans le tableau suivant :

Plan de masse (Copper annealed)	$Xplan = Yplan (mm)$	150
	$d (mm)$	61.5
	$hp (mm)$	0.017
Substrat 1 (FR-4)	$Xsub = Ysub (mm)$	150
	$h (mm)$	1.6
Air	$ha (mm)$	15
Alimentation par couplage à proximité (Ligne coaxiale)	$xf (mm)$	55
	$Lf (mm)$	12
	$hs (mm)$	14.7
	$din (mm)$	1.296
	$dout (mm)$	4.333
	$e (mm)$	0.3
Substrat 2 (FR-4)	$Xsub = Ysub (mm)$	150
	$h (mm)$	1.4
Patch (Copper annealed)	$R (mm)$	65
	$hp (mm)$	0.017

Tableau III. 2 : Propriétés de l'antenne patch conçue

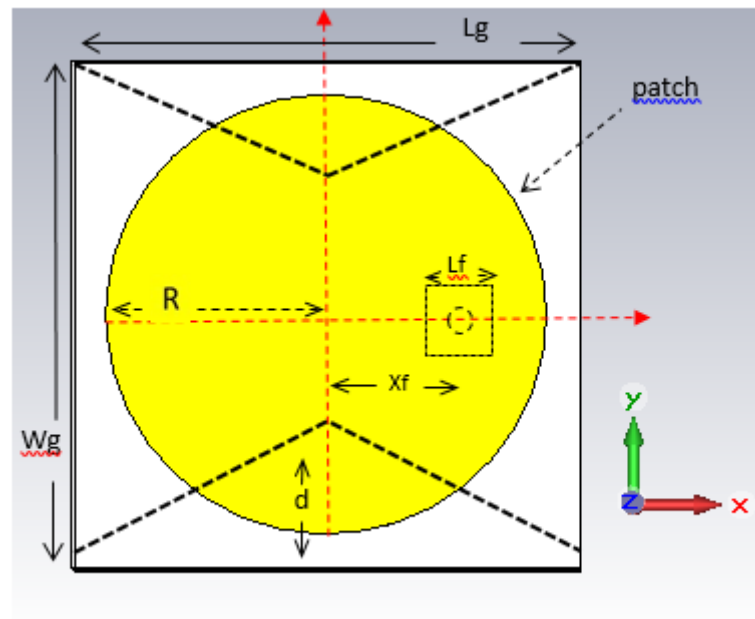


Figure III.6 : Antenne patch conçu.

III.3.2.1 Les effets des paramètres

L'étude des différents paramètres est une étape indispensable pour le design et l'optimisation de l'antenne, car ils permettent d'ajuster finement les performances de l'antenne étudiée en fonction des besoins exigés.

- **Effet de « d »**

Nous avons simulé pour les valeurs suivantes :

Marqueur	1	2	3	4	5
d	40	45	50	55	60

Tableau III.3 : Valeurs de « d ».

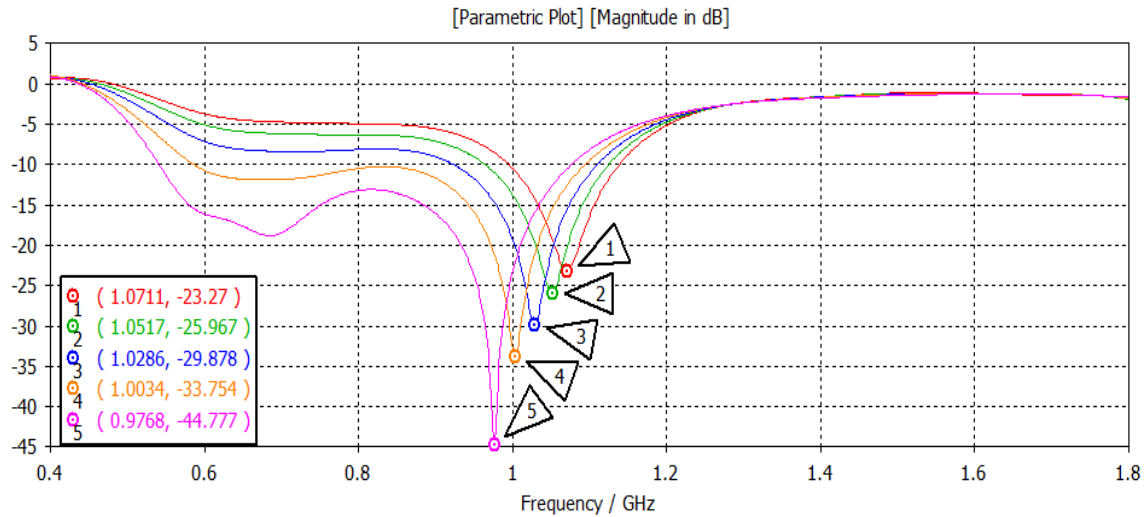


Figure III. 7 : Effet de « d ».

En observant la variation du paramètre « d », on remarque son effet sur plusieurs caractéristiques de CMSA. Tout d'abord, à mesure que d augmente, la fréquence diminue. Cela signifie que plus « d » augmente, l'antenne travaille avec des fréquences plus basses. De plus, l'augmentation de « d » entraîne une extension de la bande passante. En d'autres termes, l'antenne devient capable de fonctionner sur une gamme de fréquences plus large. Enfin, on observe que le pic du coefficient de réflexion devient plus profond avec l'augmentation de « d ». Cela indique une amélioration de l'adaptation d'impédance.

- Effet de « xf »

Nous avons simulé pour les valeurs suivantes :

Marqueur	1	2	3	4
xf	30	35	40	45

Tableau III.4 : Valeurs de « xf »

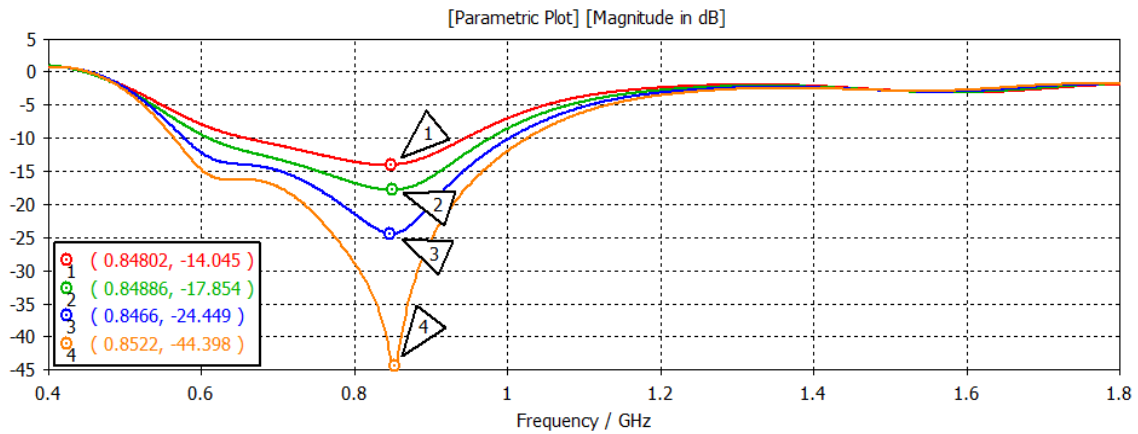


Figure III. 8 : Effet de « xf ».

En observant les variations du paramètre d'alimentation « xf », il est remarquable que lorsque « xf » augmente, cela entraîne une augmentation de la bande passante. En parallèle, on constate également que le pic du coefficient de réflexion devient plus profond. Cela indique que « xf » est un paramètre qui peut servir et améliorer la performance de l'antenne en élargissant la bande de fréquences sur laquelle l'antenne peut travailler efficacement. Par conséquent, une augmentation de « xf » se traduit par une amélioration globale de l'efficacité et de la qualité de la transmission. En revanche, le paramètre « xf » n'a pas une grande influence sur la fréquence.

- **Effet de « h »**

Nous avons simulé pour les valeurs suivantes :

Marqueur	1	2	3	4
H	1	1.5	2	2.5

Tableau III.5 : valeurs de « h ».

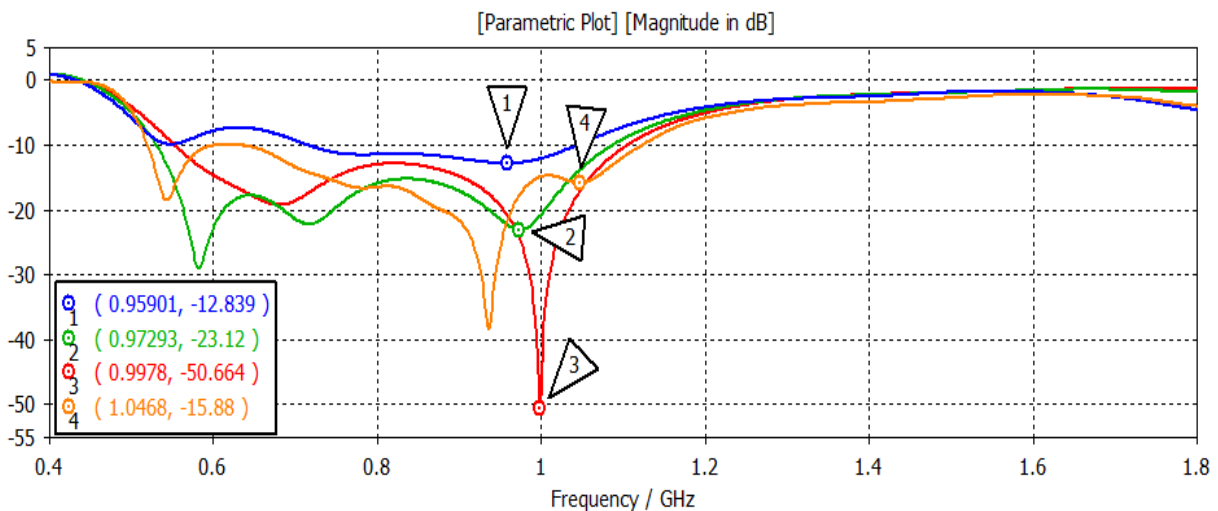


Figure III. 9 : Effet de « h ».

On constate que l'augmentation de l'épaisseur du substrat, notée h , entraîne une augmentation de la fréquence. De plus, il apparaît clairement que l'augmentation de h entraîne une augmentation de la bande passante. Cela signifie que l'antenne devient plus capable de fonctionner sur une large gamme de fréquences en augmentant l'épaisseur du substrat. Cependant, en ce qui concerne le pic du coefficient de réflexion, l'influence de l'épaisseur du substrat n'est pas régulière.

- **Effet de « R »**

Nous avons simulé pour les valeurs suivantes :

Marqueur	1	2	3	4
R	50	60	65	70

Tableau III.6 : Valeurs de « R ».

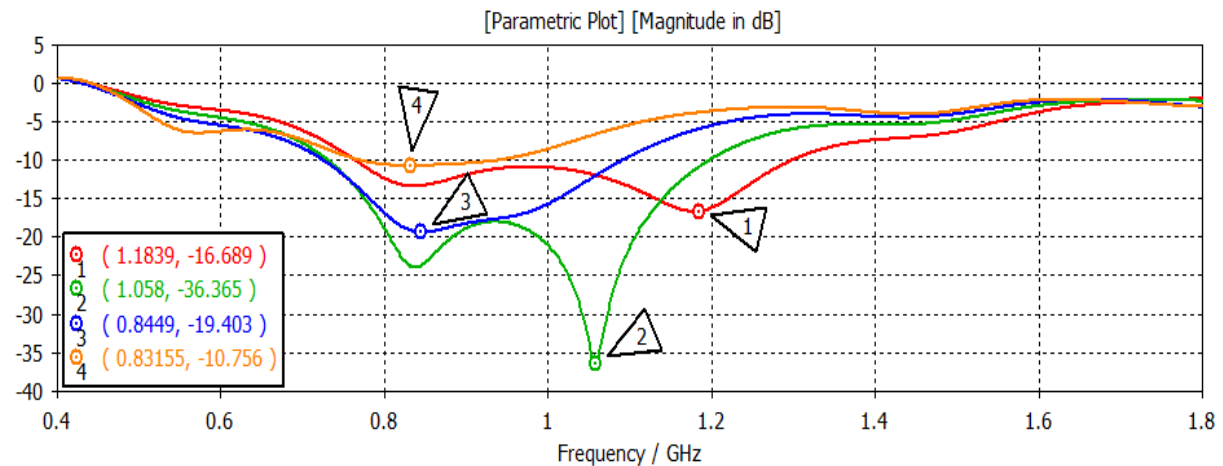


Figure III. 10 : Effet de « R ».

En observant les variations du rayon du patch « R », on peut noter que l'augmentation du rayon « R » entraîne une diminution significative de la bande passante. Cela signifie que, lorsque le patch devient plus large, la capacité de l'antenne à couvrir une large gamme de fréquences se réduit. En ce qui concerne la fréquence, on observe une baisse de fréquence avec l'augmentation du rayon « R ». Cela peut s'expliquer par le fait qu'un patch plus grand résonne à des fréquences plus basses. Quant au coefficient de réflexion, noté S_{11} , la variation de son pic n'est pas régulière en fonction de « R ».

- **Effet de « Lf »**

Nous avons simulé pour les valeurs suivantes :

Marqueur	1	2	3	4	5
Lf	14	16	18	20	25

Tableau III.7 : Valeurs de « Lf ».

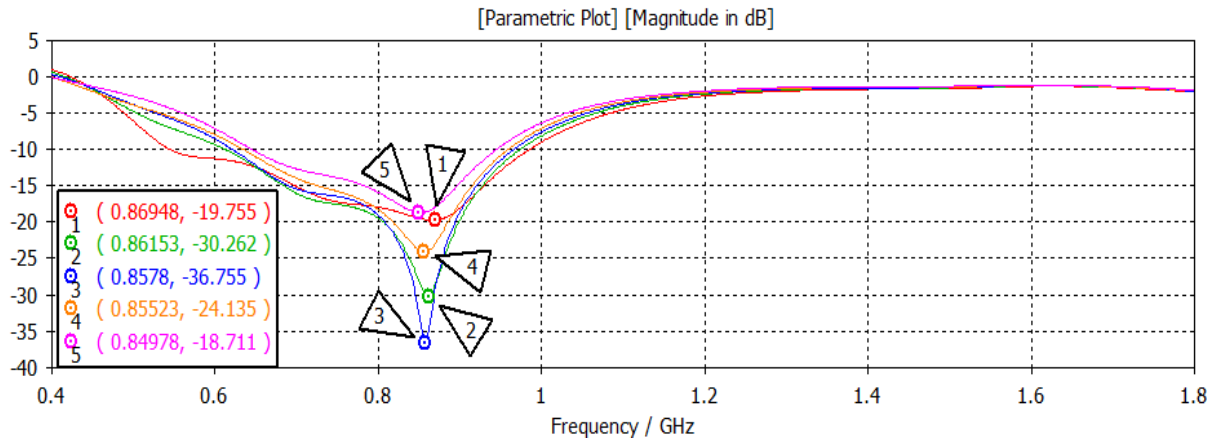


Figure III. 11 : Effet de « Lf ».

En étudiant les variations du paramètre « Lf », on peut constater qu'à mesure que « Lf » augmente, il y a une diminution de la bande passante. Concernant la fréquence, l'augmentation de « Lf » entraîne également une baisse de la fréquence. Quant au coefficient de réflexion, on note une variation qui n'est pas régulière avec les changements de « Lf ». Cette irrégularité indique que le comportement de réflexion de l'antenne ou du circuit ne suit pas une tendance linéaire simple, d'autres facteurs peuvent influencer ces variations.

- **Effet de « ha »**

Nous avons simulé pour les valeurs suivantes :

Marqueur	1	2	3
ha	5	10	15

Tableau III.8 : Valeurs de « ha ».

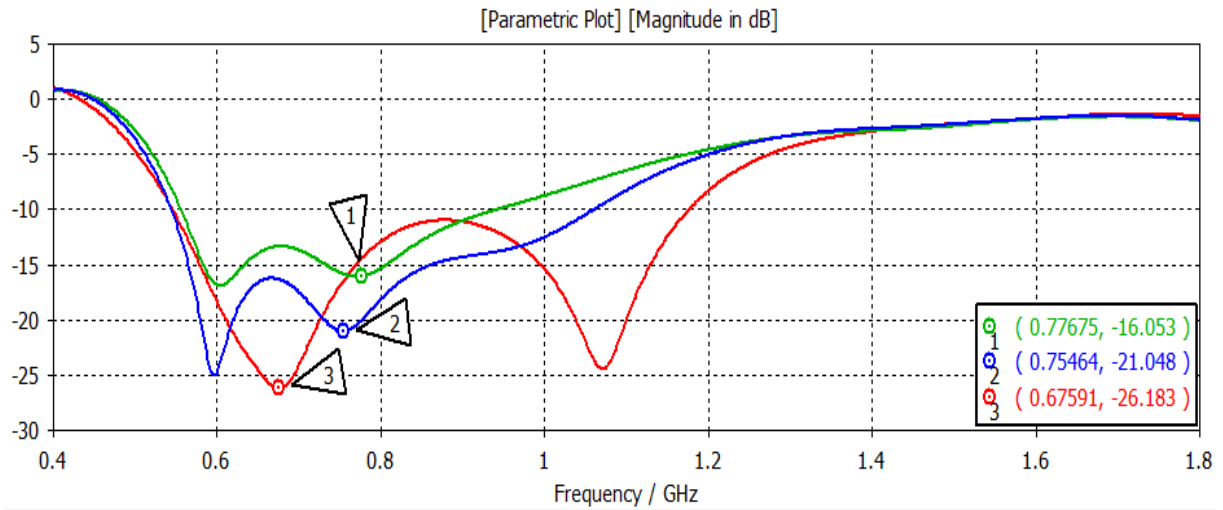


Figure III. 12 : Effet de « ha ».

Lorsque la distance « ha » qui sépare les deux substrats augmente, une réduction de la fréquence est observée. En ce qui concerne la bande passante, l'augmentation de « ha » fait que la bande passante augmente. Donc l'antenne est capable de fonctionner sur une large bande de fréquences et peut être idéale pour les applications nécessitant une large bande. Enfin, pour le coefficient de réflexion, on observe que plus « ha » augmente, plus le pic du S_{11} devient profond.

III.3.2.2 Résultats

Après avoir fait l'étude des différents paramètres clés de notre antenne, nous avons optimisé et obtenu les résultats suivants :

- Coefficient de réflexion S_{11}

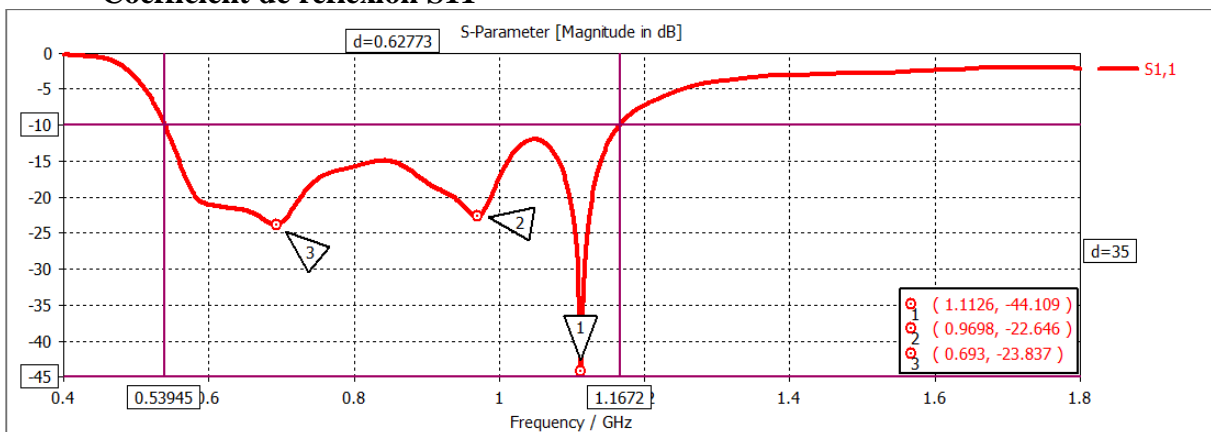
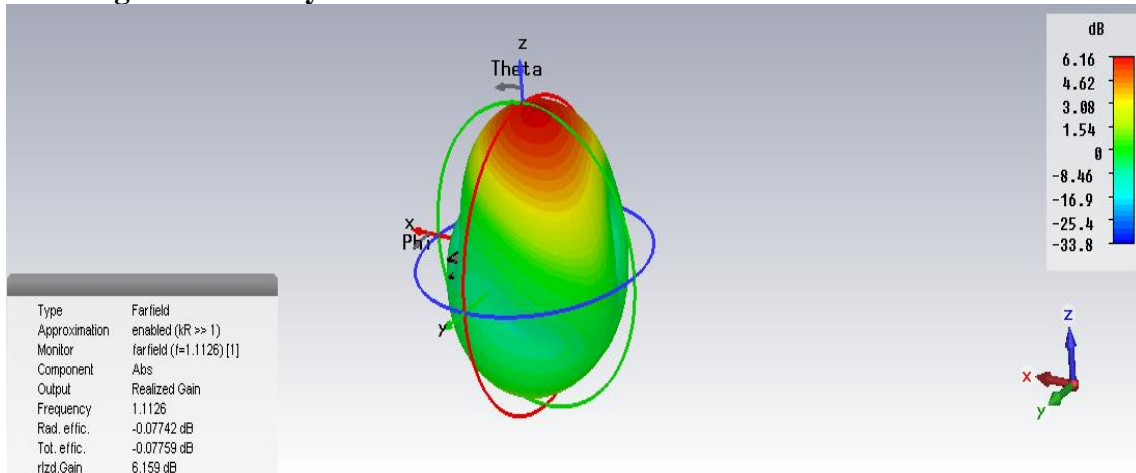


Figure III. 13 : Le coefficient de réflexion S_{11} .

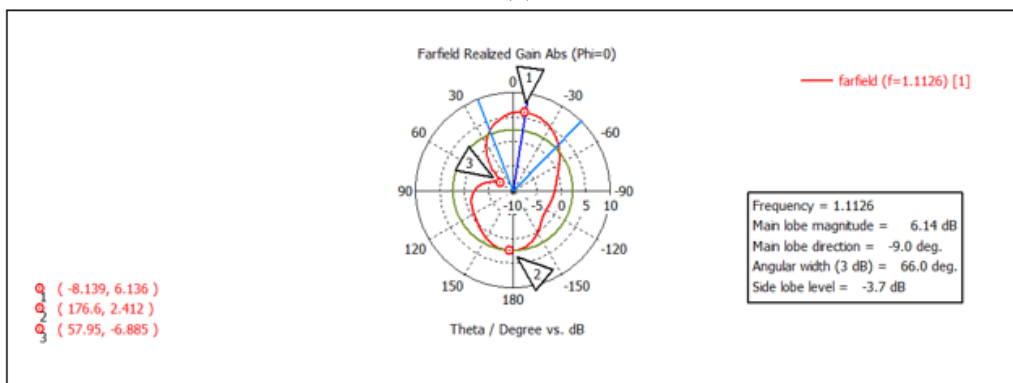
La bande passante simulée du CMSA alimenté par proximité avec un plan de masse de forme papillon est de 627 MHz (73 %).

Avec un plan de masse en forme de nœud papillon, la cavité devient déficiente car il y a plus de détachement des champs frangeants. Autrement dit, ces champs ne restent pas confinés à l'antenne ou à la cavité mais se dispersent dans l'espace environnant. Cela réduit le facteur de qualité de l'antenne ce qui augmente la largeur de la BW.

• Diagramme de rayonnement



(a)



(b)

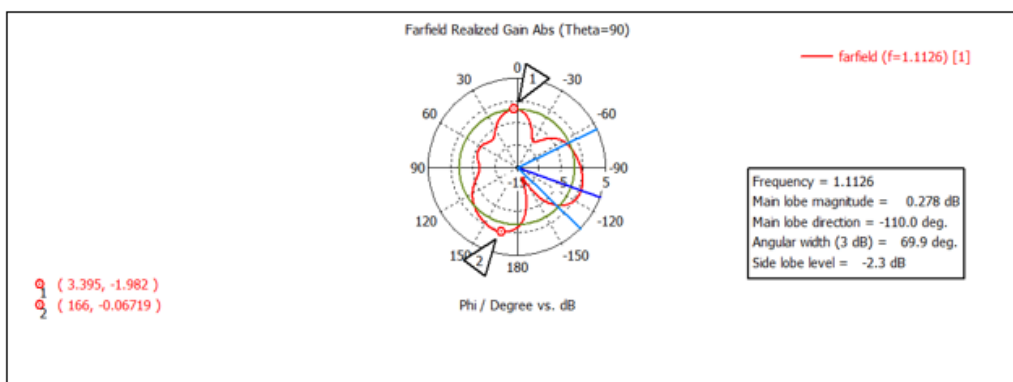


Figure III. 14: (a) Diagramme de rayonnement 3D. (b) Gain en coordonnées polaires (Phi=0°). (c) Gain en coordonnées polaires (Thêta=90°) à f=1.16 GHz.

Sur l'ensemble de la bande passante, le CMSA présente un gain maximal de 6.159 dBi et une directivité de 6.23 dBi. (a)

Dans la figure III.9(b), le marqueur « 1 » indique le gain maximal de l'antenne, ce qui signifie que c'est le point où l'antenne émet le plus efficacement. Le marqueur « 2 » illustre le rayonnement arrière de l'antenne, avec une valeur de 2.412 dBi (Cette valeur est non négligeable) contrairement à l'antenne ordinaire qui a un rayonnement arrière négligeable.

Enfin, le marqueur « 3 » indique le gain minimal de l'antenne. Connaître le gain minimal peut aider à comprendre les zones où la couverture de l'antenne est la plus faible, et donc où l'amélioration est nécessaire si une couverture uniforme est souhaitée.

Dans la figure III.9(c), le gain minimale et maximale sont négligeables.

- **La variation du gain en fonction de la fréquence $G(f)$**

À mesure que la fréquence augmente, on observe une augmentation progressive du gain de l'antenne. Cette tendance se poursuit jusqu'à atteindre un maximum à la fréquence de $f = 1.1126 \text{ MHz}$ [$G(f = 1.1126) = 6.159 \text{ dBi}$]. Ce pic de gain est le point où l'antenne fonctionne de manière optimale. Cependant, au-delà de cette fréquence, le gain commence à diminuer.

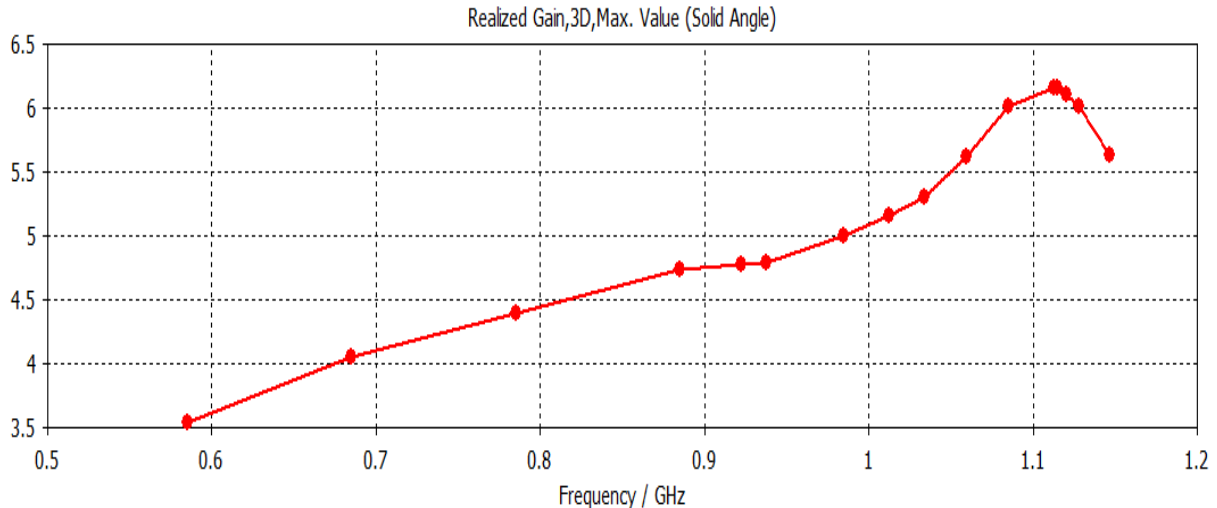


Figure III. 15 : Variation du gain en fonction de la fréquence.

- **CO and CROSS polarisations**

Pour le CMSA soutenu par un plan de masse en forme de nœud papillon, le plan H et le plan E sont alignés de $\varphi = 0^\circ$ et $\varphi = 90^\circ$ respectivement pour obtenir une cross et co polarisations, et sont alignés de $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$ respectivement pour obtenir une co et cross polarisations. Figure III.12.

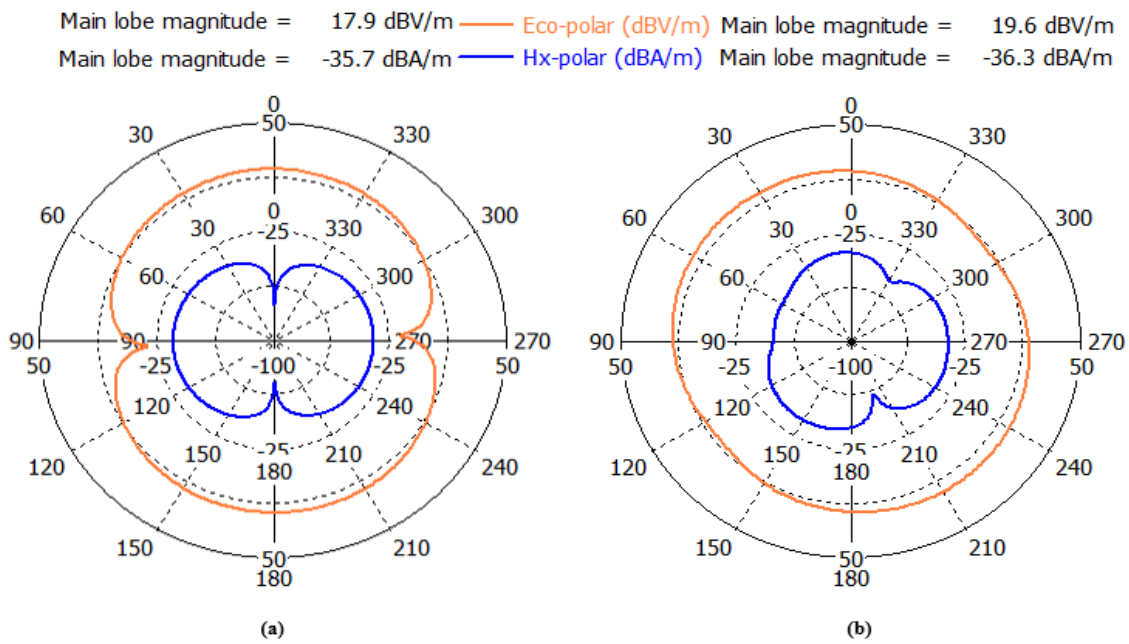


Figure III.16 : (a) Co et Cross polarisations ($f = 550 \text{ MHz}$). (b) Co et Cross polarisations ($f = 1150 \text{ MHz}$)

III.3.3 Plan de masse de forme H

La conception de CMSA alimentée par couplage à la proximité et soutenue par un plan de masse en forme de H à l'aide d'une configuration suspendue à trois couches sont illustrées dans la figure III.13. Dans ce plan de masse, la longueur de la fente « lg » et la largeur « d » sont présentes sous le patch, ce qui modifie la distribution de l'onde de frange dans la cavité du patch. Par conséquent, les effets de la variation de ces paramètres sont étudiés pour l'amélioration de BW [30].

Ci-dessous la structure réalisée sur CST :

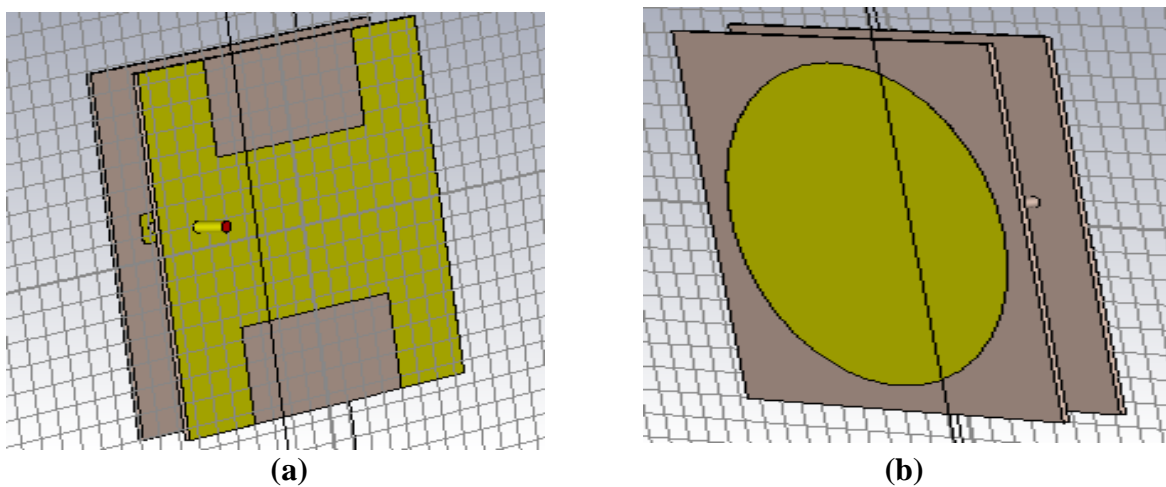


Figure III. 17 : structure plane de masse H. (a) : la structure vue d'en bas où le plan de masse apparaît. (b) : la structure vue d'en haut où le patch rayonnant apparaît.

Les paramètres implémentés sont dans le tableau suivant :

Plan de masse (Copper annealed)	$Xplan = Yplan$ (mm)	150
	d (mm)	40
	hp (mm)	0.017
Substrat 1 (FR-4)	$Xsub = Ysub$ (mm)	150
	h (mm)	1.6
Air	ha (mm)	15
Alimentation par couplage à proximité (Ligne coaxiale)	xf (mm)	55
	Lf (mm)	12
	hs (mm)	14.6
	din (mm)	1.296
	$dout$ (mm)	4.333
	e (mm)	0.3
Substrat 2 (FR-4)	$Xsub = Ysub$ (mm)	150
	h (mm)	1.6
Patch (Copper annealed)	R (mm)	65
	hp (mm)	0.017

Tableau III. 9 : Propriétés de l'antenne patch conçue.

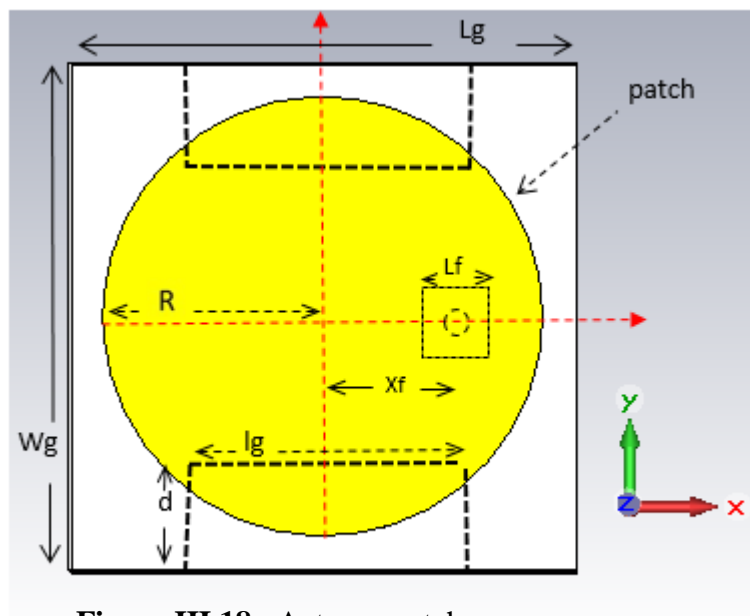


Figure III.18 : Antenne patch conçue.

III.3.3.1 Les effets des paramètres

L'étude des différents paramètres est une étape indispensable pour le design et l'optimisation de l'antenne, car ils permettent d'ajuster et d'optimiser les performances de l'antenne étudiée en fonction des besoins exigés.

- **Effet de « d »**

Nous avons simulé pour les valeurs suivantes :

Marqueur	1	2	3	4	5	6	7
d	5	10	15	20	25	30	35

Tableau III.10 : Valeurs de « d ».

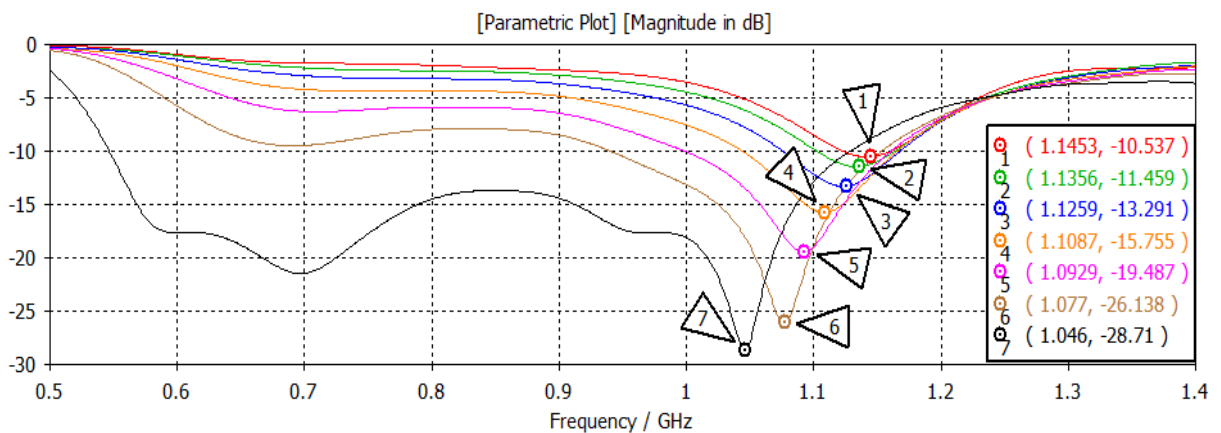


Figure III. 19 : Effet de « d ».

En observant l'impact de la variation du paramètre de la profondeur de l'encoche, noté « d », sur les performances de notre antenne, plusieurs tendances significatives émergent. Tout d'abord, il est notable que l'augmentation de la valeur de « d » entraîne une expansion significative de la bande passante. Cette augmentation de la bande passante est importante car elle permet à l'antenne de supporter une gamme de fréquences plus large, améliorant ainsi son intégration dans de applications qui nécessitent une large bande.

Par ailleurs, l'augmentation de « d » a un effet direct sur la fréquence, qui tend à diminuer à mesure que « d » augmente. Cette relation inverse entre « d » et la fréquence peut être exploitée pour ajuster précisément les caractéristiques de fréquence de l'antenne en fonction des besoins spécifiques de l'application.

Enfin, une augmentation de « d » a une influence directe sur le pic du coefficient de réflexion qui devient plus profond. Un coefficient de réflexion plus profond indique une meilleure adaptation d'impédance, ce qui signifie que l'antenne est plus efficace dans sa performance avec moins de pertes dues aux réflexions. Ce comportement est particulièrement souhaitable dans des applications où l'efficacité est importante.

- **Effet de « xf »**

Nous avons simulé pour les valeurs suivantes :

Marqueur	1	2	3	4
xf	30	36	42	48

Tableau III.11 : Valeurs de « xf ».

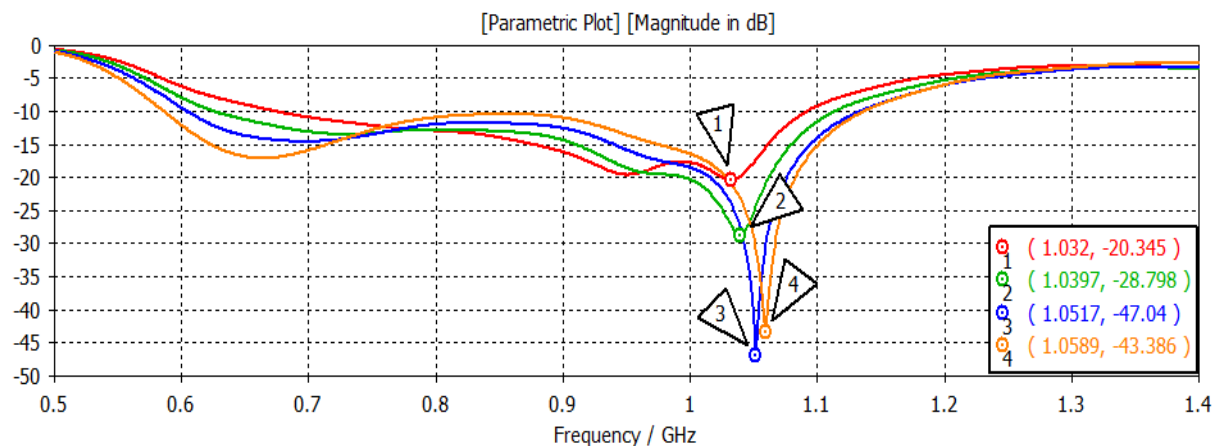


Figure III. 203: Effet de « xf ».

En analysant l'influence du paramètre d'alimentation « xf », nous remarquons que l'augmentation de « xf » entraîne une diminution de la fréquence. Par ailleurs, on observe une bonne augmentation de la bande passante avec l'augmentation « xf ». Cette relation inverse entre la fréquence et la bande passante est significative et mérite une attention particulière dans la conception de l'antenne nécessitant des ajustements précis de la bande passante et une optimisation. En revanche, l'effet de « xf » sur le coefficient de réflexion est moins prévisible.

- Effet de « h »

Nous avons simulé pour les valeurs suivantes :

Marqueur	1	2	3	4
h	0.7	1	2	1.5

Tableau III.12 : Valeurs de « h ».

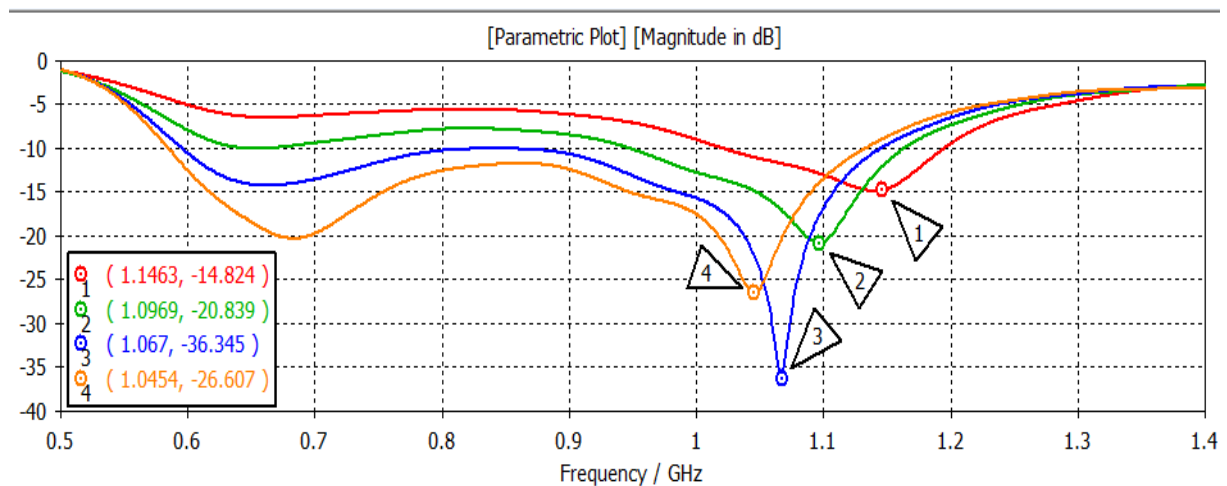


Figure III. 21 : Effet de « h ».

En observant les variations de l'épaisseur « h » du substrat, on constate que l'augmentation de « h » entraîne une diminution de la fréquence. Cela signifie qu'un substrat plus épais déplace la fréquence de notre antenne vers des valeurs plus basses. Par ailleurs, cette augmentation de « h » influence remarquablement sur la bande passante, on note une belle extension de la bande passante, ce qui indique une meilleure performance en termes de largeur de bande. En ce qui concerne le coefficient de réflexion S_{11} , une augmentation de « h » rend le S_{11} plus profond, améliorant ainsi l'adaptation de l'antenne. Toutefois, il est intéressant de noter qu'à une épaisseur de $h = 2 \text{ mm}$, le pic du S_{11} remonte de -36.345 dB (pour $h = 1.5 \text{ mm}$) à -26.607 dB . Cela suggère qu'il existe une épaisseur optimale au-delà de laquelle l'augmentation supplémentaire de « h » peut entraîner une dégradation de la performance de l'antenne en termes de coefficient de réflexion.

- Effet de « ha »

Nous avons simulé pour les valeurs suivantes :

Marqueur	1	2	3	4
ha	8	12	16	20

Tableau III.13 : Valeurs de « ha ».

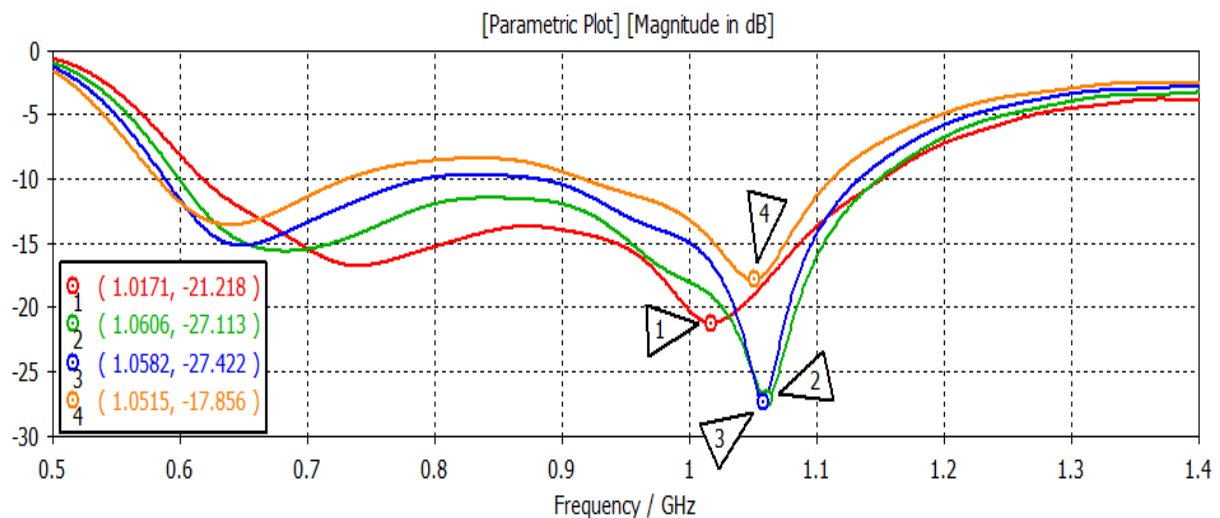


Figure III. 224 : Effet de « ha ».

En modifiant la distance « ha » entre les deux substrats, on constate que son augmentation entraîne une diminution de la bande passante. Cela signifie que, à mesure que les substrats s'éloignent les uns des autres, la plage de fréquences sur laquelle le dispositif fonctionne efficacement se réduit. En ce qui concerne le coefficient de réflexion, la variation de « ha » provoque des changements irréguliers. Autrement dit, il n'y a pas de tendance claire ou de comportement systématique dans la façon dont le coefficient de réflexion réagit à l'augmentation de « ha ». Pour ce qui est de la fréquence, une augmentation de « ha » tend généralement à augmenter la fréquence, cependant, il est important de noter que cette augmentation n'est pas toujours linéaire ou prévisible. À certaines valeurs spécifiques de « ha », la fréquence peut varier de manière non systématique, ce qui pourrait être attribué à des phénomènes de résonance complexe ou à des effets de couplage entre les substrats. Ces variations inattendues peuvent poser des défis supplémentaires dans la conception et l'optimisation du dispositif pour des applications spécifiques.

• Effet de « R »

Nous avons simulé pour les valeurs suivantes :

Marqueur	1	2	3	4
R	75	70	65	60

Tableau III.14 : Valeurs de « R ».

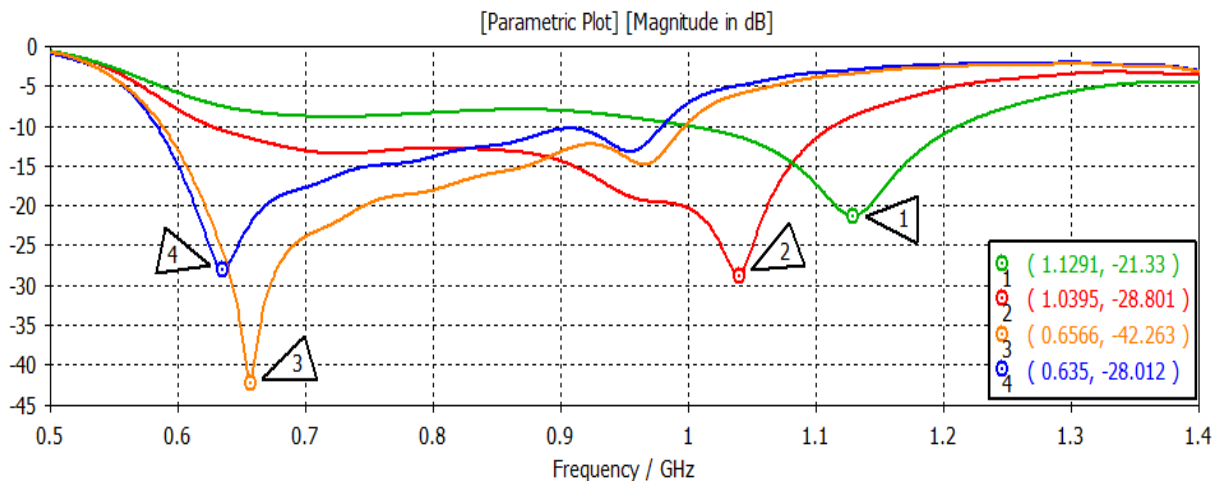


Figure III. 23 : Effet de « R ».

En étudiant la variation du rayon du patch « R », on constate tout d'abord qu'à mesure que le rayon « R » diminue, la fréquence diminue. Cela signifie que l'antenne devient capable de résonner à des fréquences plus basses lorsque le rayon du patch est plus grand. Par ailleurs, la bande passante de l'antenne suit une tendance croissante avec l'augmentation de « R ». Cependant, cette tendance se renverse à un certain point. Lorsque « R » atteint 75 mm, la bande passante commence à diminuer. Cela indique qu'il existe une valeur optimale du rayon au-delà de laquelle l'augmentation du rayon n'améliore plus la bande passante et peut même la réduire. En ce qui concerne le coefficient de réflexion « S_{11} », son comportement montre également une dépendance intéressante par rapport à « R ». plus « R » augmente, le pic du coefficient de réflexion « S_{11} » devient plus profond. Cependant, lorsque le rayon atteint 75 mm, cette tendance s'inverse. Le coefficient de réflexion « S_{11} » perd de sa profondeur, indiquant une dégradation des performances de l'antenne.

- Effet de « Lf »

Nous avons simulé pour les valeurs suivantes :

Marqueur	1	2	3	4
Lf	5	8	11	14

Tableau III.15 : Valeurs de « Lf ».

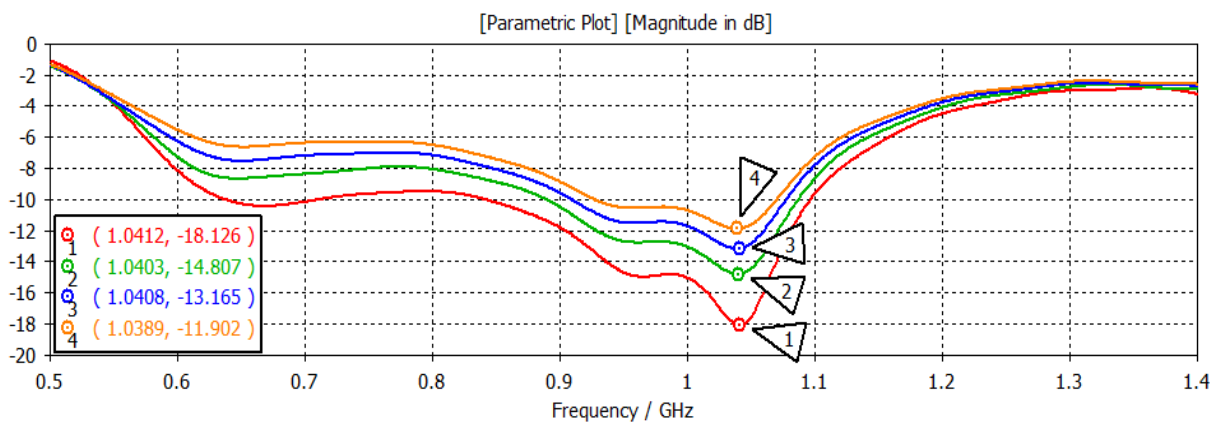


Figure III. 24: Effet de « Lf ».

En observant la variation de « Lf », on constate que l'augmentation de « Lf » entraîne une réduction significative de la bande passante. Cela signifie que le dispositif devient moins capable de transmettre ou de recevoir un large éventail de fréquences, limitant ainsi sa fonction dans différentes applications. Quant au coefficient de réflexion, on remarque que l'augmentation de « Lf » a pour conséquence de rendre le pic du paramètre S_{11} moins profond. En d'autres termes, une augmentation de « Lf » réduit l'efficacité de la résonance du dispositif, ce qui se traduit par une moins bonne correspondance d'impédance et, par conséquent, une moindre efficacité dans la transmission des ondes ELM à une fréquence spécifique. Cependant, en ce qui concerne la fréquence, l'influence de « Lf » sur le paramètre S_{11} est relativement négligeable. La fréquence à laquelle se produit le pic ne semble pas être significativement affectée par les variations de « Lf ». Cela suggère que, bien que « Lf » puisse modifier l'étendue de la bande passante et la profondeur du coefficient de réflexion, la fréquence reste presque stable.

III.3.3.2 Résultats

Après avoir fait l'étude des différents paramètres clés de notre antenne, nous avons optimisé et obtenu les résultats suivants :

- Le Coefficient de réflexion S_{11}

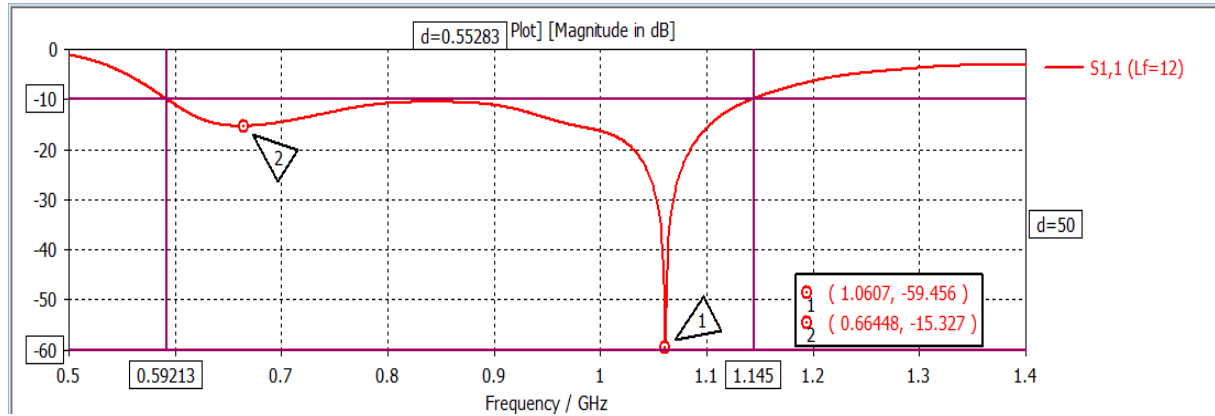
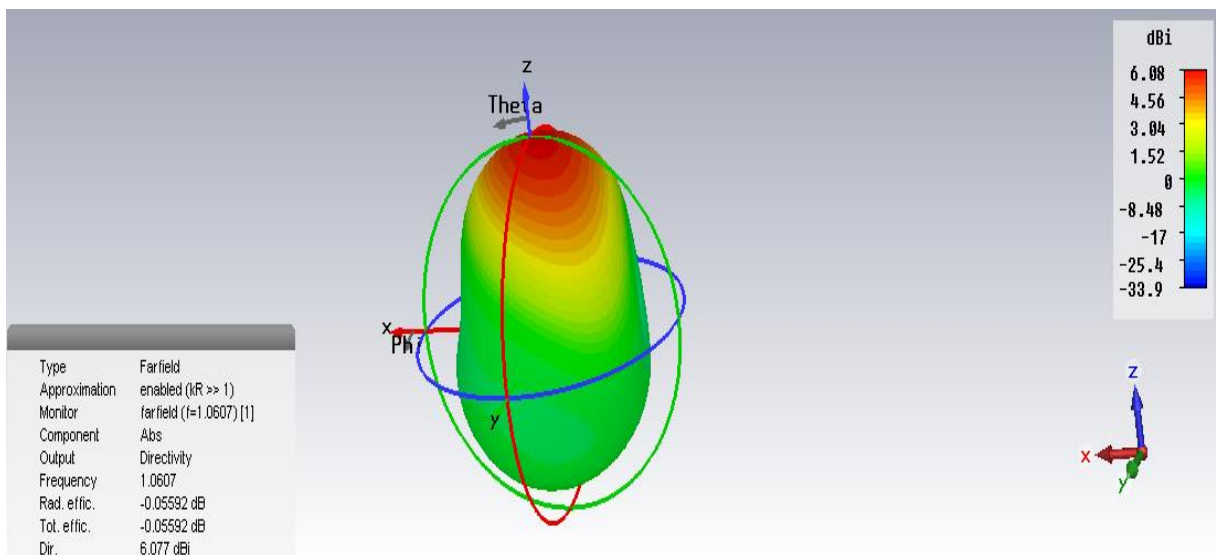


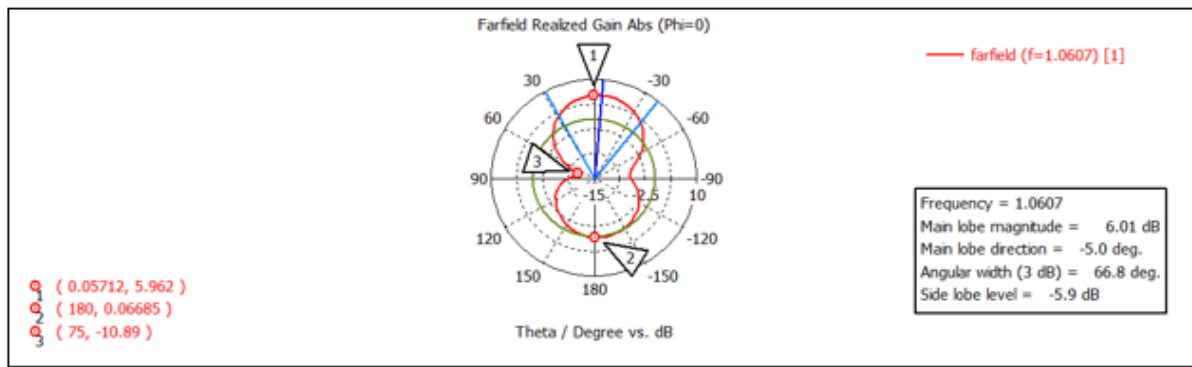
Figure III. 25 : Le coefficient de réflexion.

Dans chaque conception, l'optimisation BW est réalisée en faisant varier « Lf », « R », « ha », « R » et « xf ». L'optimisation est obtenue pour « $d = 40\text{ mm}$ », « $xf = 55\text{ mm}$ », « $R = 65\text{ mm}$ », « $ha = 15\text{ mm}$ » et « $Lf = 12\text{ mm}$ ». la bande passante obtenue est de 552 MHz (63%).

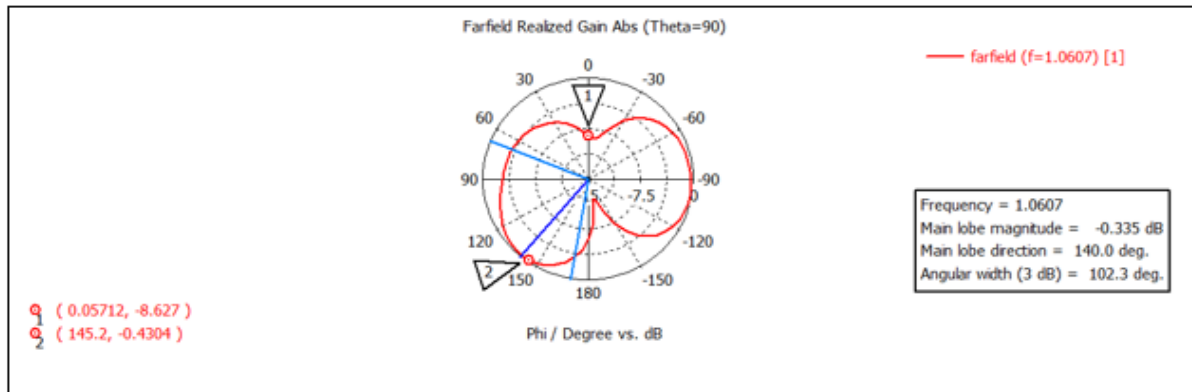
- Diagramme de rayonnement



(a)



(b)



(c)

Figure III. 26: Diagramme de rayonnement. (a) Le diagramme de rayonnement en 3D. (b) Le gain en polaire (Phi=0°). (c) Le gain en polaire (Theta=90°) à f=1.06 GHz.

Sur l'ensemble de la bande passante, le CMSA présente un gain maximal de 6.077 dBi et une directivité de 6.021 dBi, soit une efficacité totale de 98,72% à f=1.06 GHz.

Dans la figure III.4(b) et (c), le marqueur « 1 » indique le gain maximal de l'antenne. Le marqueur « 2 » illustre le rayonnement arrière de l'antenne, avec une valeur de 0.06685 dBi (Cette valeur est non négligeable) contrairement à l'antenne ordinaire qui a un rayonnement arrière négligeable. Le marqueur « 3 » montre le gain minimal.

- **La variation du gain en fonction de la fréquence G(f)**

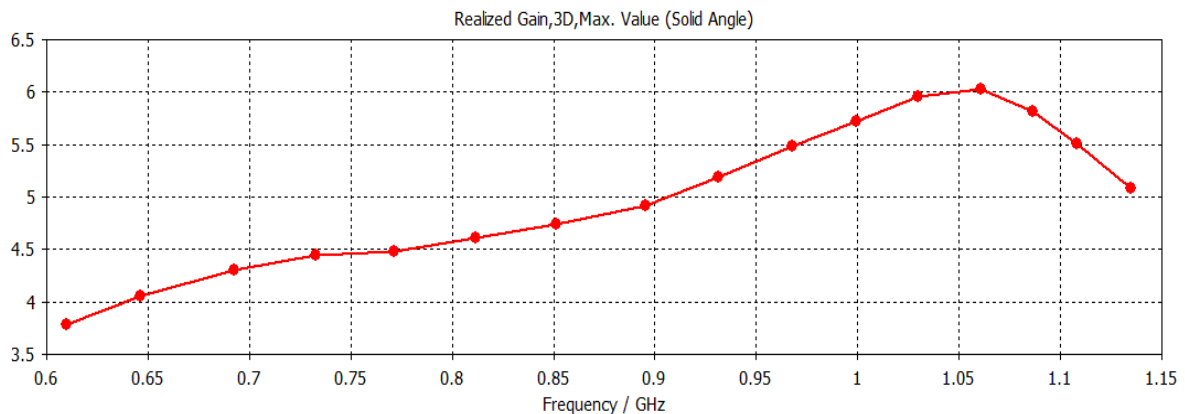


Figure III. 27: Variation du gain en fonction de la fréquence.

À mesure que la fréquence augmente, on observe une augmentation progressive du gain de l'antenne. Cette tendance se poursuit jusqu'à atteindre un maximum à la fréquence de $f = 1.0607 \text{ MHz}$ ($G(f = 1.0607) = 6.021 \text{ dBi}$). A $f=1.0607 \text{ MHz}$ l'antenne fonctionne de manière optimale. Cependant, au-delà de cette fréquence, le gain commence à diminuer.

• **CO ans CROSS polarisations**

Pour le CMSA soutenu par un plan de masse en forme de H, nous avons considéré des fréquences proches des limites (inferieur et supérieur) de la bande passante, comme illustré à la Figure III.8. Les plans H et E sont alignés respectivement à $\varphi = 0^\circ$ et $\varphi = 90^\circ$ pour obtenir la polarisation croisée et la co-polarisation. En outre, ils sont alignés à $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$ respectivement pour obtenir la co-polarisation et la polarisation croisée, comme montré aux Figure III.23.

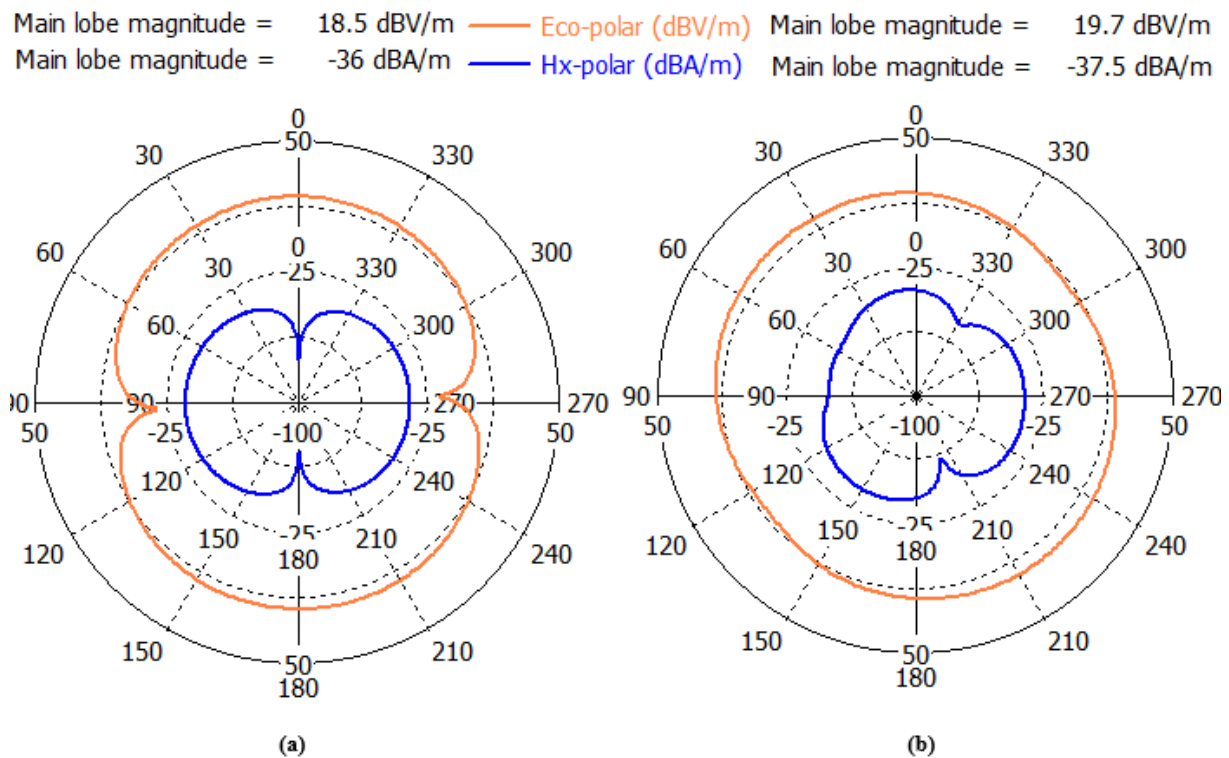


Figure III. 28 : (a) Co et cross polarisations ($f = 610 \text{ MHz}$). (b) Co et cross polarisation ($f = 1135 \text{ MHz}$).

Les champs se déplacent dans une certaine direction, on cherche à ce qu'ils gardent toujours la même orientation (Co-polarisation). Cependant, il se peut qu'il y ait un autre champ qui vient opposer les champs de l'antenne (cross-polarisation), et cela va affecter la polarisation de l'antenne. Par conséquent on cherche toujours à avoir une faible cross-polarisation. Dans nos résultats nous avons obtenu une cross-polarisation assez faible ce qui veut dire que notre antenne n'est pas vraiment affectée par la cross-polarisation.

III.4 Etude comparative entre les deux plans modifiés

Nous avons analysé cette structure en modifiant le plan de masse de deux manières distinctes. Le premier plan de masse adopté a une forme de papillon avec une encoche de taille d , tandis que le second présente une forme de "H", également avec une encoche d . Après comparaison, nous avons observé que la structure avec un plan de masse en forme de papillon offrait une bande passante plus large avec un gain et une directivité supérieurs.

La forme de papillon du plan de masse modifié influence les caractéristiques de rayonnement de l'antenne. Ce type de plan de masse permet une meilleure distribution du champ électromagnétique, ce qui favorise un meilleur couplage entre le patch et le substrat. La répartition du courant de surface dans une structure papillon crée également des modes de résonance multiples, augmentant ainsi la largeur de bande. En comparaison, le plan de masse en forme de "H", bien qu'efficace, limite légèrement l'interaction entre les couches du substrat et le patch, ce qui réduit la bande passante et le gain global de l'antenne.

En résumé, la forme papillon optimise la répartition des champs et la résonance, conduisant à de meilleures performances en termes de bande passante et de gain.

Bien que nous ayons réussi à élargir la bande passante de l'antenne patch, l'analyse des résultats de simulation avec un plan de masse en forme rectangulaire révèle que cette amélioration s'est faite au détriment du gain et de la directivité de l'antenne.

Cette observation met en lumière un compromis classique en conception d'antennes, l'amélioration de la bande passante peut parfois s'accompagner de dégradations dans d'autres paramètres tels que le gain (comme dans notre cas). Un équilibre doit donc être trouvé en fonction des besoins spécifiques de l'application.

III.5 Conclusion

À travers une série de simulations et d'analyses, nous avons examiné les différents effets de chaque paramètre sur les performances de l'antenne. Nous avons exploré des aspects tels que la taille du patch et la forme du plan de masse, les caractéristiques du substrat, et les techniques d'alimentation, en mettant en lumière leur influence respective sur des paramètres clés comme le gain, la directivité, l'impédance et la bande passante. Un point central de notre étude a été l'élargissement de la bande passante de l'antenne patch. Nous avons démontré que l'alimentation par couplage à proximité, une technique consistant à placer la ligne d'alimentation très proche du patch sans contact direct, permet de réduire les pertes et d'améliorer la réponse en fréquence de l'antenne. Cette approche a montré des résultats prometteurs, en augmentant significativement la bande passante. Par ailleurs, nous avons étudié les modifications apportées aux plans de masse pour optimiser les performances de l'antenne. En ajustant la taille, la forme du plan de masse ainsi que la position de l'alimentation, nous avons pu observer des améliorations notables dans le comportement de l'antenne, notamment une réduction des pertes de retour et une amélioration de du gain et de la directivité. Ces ajustements permettent de mieux contrôler les courants de surface et les modes de rayonnement, contribuant ainsi à une performance accrue de l'antenne.

Dans le cadre des perspectives de ce travail, nous envisageons d'étendre l'étude en explorant d'autres formes de plan de masse afin de mieux comprendre et quantifier l'impact de la géométrie du plan de masse sur les performances d'une antenne patch. Cette exploration inclura l'analyse de nouvelles configurations géométriques complexes, qui pourraient potentiellement améliorer encore la bande passante, le gain et d'autres paramètres clés tels que l'efficacité de rayonnement ou l'impédance d'adaptation.

L'objectif sera d'identifier des plans de masse innovants qui pourraient optimiser davantage la réponse électromagnétique. Ce travail futur permettra non seulement d'approfondir la compréhension des interactions entre le plan de masse et l'antenne patch, mais aussi de proposer des solutions applicables à des antennes à plus hautes performances pour des applications avancées.

Conclusion Générale

Au terme de ce mémoire, nous avons exploré les avantages et les inconvénients de l'antenne patch, un composant essentiel dans diverses applications de communication sans fil. Bien que cette technologie présente de nombreux atouts, notamment son faible coût, sa facilité de fabrication, et sa compacité, elle est souvent limitée par une bande passante étroite, ce qui peut restreindre ses performances dans certaines applications à large bande.

Afin de surmonter cet obstacle majeur, diverses techniques ont été développées et étudiées. Dans notre travail, nous avons porté notre attention sur la technique d'alimentation par couplage à proximité. Cette méthode permet d'améliorer la bande passante de manière significative.

À travers des études minutieuses des paramètres de l'antenne, nous avons démontré que l'application de cette technique peut considérablement élargir la bande passante de notre antenne patch. Nous avons également mis en évidence l'importance de la forme et de la taille du plan de masse, éléments cruciaux influençant les performances globales de l'antenne. En optimisant ces paramètres, nous avons pu obtenir des résultats prometteurs, ouvrant la voie à des antennes patch plus performantes et adaptées à un plus grand nombre d'applications.

Notre travail contribue ainsi à la compréhension et à l'amélioration des antennes patch, offrant des perspectives intéressantes pour les futurs développements dans le domaine des communications sans fil. Les techniques et les observations présentées dans ce mémoire peuvent servir de base pour des recherches ultérieures, visant à optimiser encore davantage les performances de ces antennes en explorant d'autres configurations et matériaux.

En conclusion, bien que l'antenne patch présente des défis, notamment en termes de bande passante, des solutions ont été mises en place pour contourner ces limitations et de tirer pleinement parti des nombreux avantages offerts par cette technologie.

- [1] : D. M. Pozar, "Microstrip Antennas," *Proc. IEEE*, Vol. 80, No. 1, pp. 79–81, January 1992.
- [2] : A. Balanis Constantine "Antenna theory Analysis and design", New York, John Willey and Sons, 2005.
- [3] : N. K. Uzunoglu, N. G. Alexopoulos, and J. G. Fikioris, "Radiation Properties of Microstrip Dipoles," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-27, No. 6, pp. 853–858, November 1979.
- [4]: I. E. Rana and N. G. Alexopoulos, "Current Distribution and Input Impedance of Printed Dipoles," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-29, No. 1, pp. 99–105, January 1981.
- [5] : P. B. Katehi and N. G. Alexopoulos, "On the Modeling of Electromagnetically Coupled Microstrip Antennas-The Printed Strip Dipole," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-32, No. 11, pp. 1179–1186, November 1984.
- [6] : D. M. Pozar, "Analysis of Finite Phased Arrays of Printed Dipoles," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-33, No. 10, pp. 1045–1053, October 1985.
- [7] : K.P.Ray, Girish Kumar "broadband Microstrip antennas", pp 3-4. Artech House, 2003
- [8] : NELSON JORGE , Gonçalves Fonseca. Etude de Systèmes Micro-ondes d'Alimentation d'Antennes Réseau pour Application Multifaisceaux. Université de Toulouse : s.n., 15/10/2010.
- [9] : I. J. Bahl and P. Bhartia, "Microstrip Antennas", Artech House, Dedham, MA, 1980.
- [10] : J. R. James and P. S. Hall, *Handbook of Microstrip Antennas*, Vols. 1 and 2, Peter Peregrinus, London, UK, 1989.
- [11] : G. Gronau and I. Wolff, "Aperture-Coupling of a Rectangular Microstrip Resonator," *Electronic Letters*, Vol. 22, pp. 554–556, May 1986.
- [12] : K. R. Carver and J. W. Mink, "Microstrip Antenna Technology," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-29, No. 1, pp. 2–24, January 1981.
- [13] : Balanis C.A 'Handbook of Microstrip Antennas'. John Wiley and Sons New York 1982.
- [14] : P. A. Beeckman, "Prediction of the Fresnel Region Field of a Compact Antenna Test Range with Serrated Edges," *IEE Proc.*, Vol. 133, Pt. H, No. 2, pp. 108–114, April 1986.
- [15] : P. Ioannides and C. A. Balanis, "Mutual Coupling in Adaptive Circular Arrays," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Monterey, CA, June 20–25, 2004, Vol. 1, pp. 403–406.
- [16] : R. Muhamed and T. S. Rappaport, "Comparison of Conventional Subspace Based DOA Estimation Algorithms with those Employing Property-Restoral Techniques: Simulation and

Measurements,” *5th IEEE International Conference on Universal Personal Communications*, Vol. 2, pp. 1004–1008, 1996.

[17] : B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.

[18] : P. A. Beeckman, “Prediction of the Fresnel Region Field of a Compact Antenna Test Range with Serrated Edges,” *IEE Proc.*, Vol. 133, Pt. H, No. 2, pp. 108–114, April 1986.

[19] : Kumar G, Ray KP. *Broadband Microstrip Antennas*. Artech House; Boston; 2003.

[20] : Griffins, J. M., and J. R. Forrest, “Broadband Circular Disc Microstrip Antennas,” *Electronics Letters*, Vol. 18, No. 6, 1982, pp. 267–269.

[21] : H. G. Oltman and D. A. Huebner, “Electromagnetically Coupled Microstrip Dipoles,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-29, No. 1, pp. 151–157, January 1981.

[22] : F. Karami *et al.* “A compact high-performance patch array with suppressed cross polarization using image feed configuration”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 7076-7084, décembre 2018.

[23] : NELSON JORGE , Gonçálve Fonseca, *Etude de Systèmes Micro-ondes d’Alimentation d’Antennes Réseau pour Application Multifaisceaux*. Université de Toulouse : s.n., 15/10/2010.

[24] : Waterhouse RB. *Microstrip Patch Antennas: A Designer's Guide*. Springer Science & Business Media; New York; 2003

[25] : Parizi, S. A. R. (2017). *Bandwidth Enhancement Techniques. Trends in Research on Microstrip Antennas*.

[26] : Griffins, J. M., and J. R. Forrest, “Broadband Circular Disc Microstrip Antennas,” *Electronics Letters*, Vol. 18, No. 6, 1982, pp. 267–269.

[27] : Mak, C. L., K. F. Lee, and K. M. Luk, “A Novel Broadband Patch Antenna with a T-Shaped Probe,” *IEE Proc. Microwaves, Antennas Propagation*, Pt. H, Vol. 147, pp. 73–76, 2000.

[28] : Zurcher JF. *The SSFIP: A global concept for high performance broadband planar antennas*. *Electronics Letters*. 1988.

[29] : Venkata A. P. Chavali and Amit A. Deshmukh, “Wideband Designs of Regular Shape Microstrip Antennas Using Modified Ground Plane”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 7, pp. 3705-3710, juillet 2018.

[30] : Venkata A. P. Chavali* and Amit A. Deshmukh ‘ Wideband Designs of Regular Shape Microstrip Antennas Using Modi_ed Ground Plane ’.

Résumé

Ce mémoire explore les avantages et les limites de l'antenne patch, un composant crucial dans les applications de communication sans fil. Malgré son faible coût, sa facilité de fabrication et sa compacité, cette technologie est souvent entravée par une bande passante étroite, restreignant ses performances dans les applications à large bande. Pour surmonter cette limitation, nous avons étudié la technique d'alimentation par couplage à proximité, démontrant qu'elle peut significativement élargir la bande passante de l'antenne patch et réduire la polarisation croisée. Nos analyses approfondies des paramètres, tels que la forme et la taille du plan de masse, ont révélé leur impact crucial sur les performances globales de l'antenne. En optimisant ces éléments, notre recherche a ouvert la voie à des antennes patch plus performantes, adaptées à une gamme plus étendue d'applications. Ce travail enrichit la compréhension et l'amélioration des antennes patch, offrant des perspectives pour des développements futurs dans le domaine des communications sans fil, avec des implications potentielles pour des recherches ultérieures sur l'optimisation des performances et l'exploration de nouvelles configurations et matériaux.

Mots clés : antenne, patch, large bande, plan de masse modifié, polarisation croisée, CST.

Abstract

This thesis thoroughly explores the advantages and limitations of the patch antenna, a crucial component in wireless communication applications. Despite its low cost, ease of manufacturing, and compactness, this technology is often hindered by narrow bandwidth, limiting its performance in wideband applications. To overcome this limitation, we investigated the proximity coupling feeding technique, demonstrating its ability to significantly broaden the patch antenna's bandwidth and reduce the cross-polarization. Our in-depth analyses of parameters such as shape and size of the ground plane revealed their critical impact on overall antenna performance. By optimizing these factors, our research has paved the way for more efficient patch antennas suitable for a broader range of applications. This work advances understanding and enhancement of patch antennas, offering prospects for future developments in wireless communications, with potential implications for further research into performance optimization and exploration of new configurations and materials.

Keywords: antenna, patch, broadband, modified ground plane, cross polarization, CST.