

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie
قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique

Mémoire de Master

En Télécommunication

Spécialité : Réseaux & Télécommunications

Présenté par

AGGOUN Naoufel

&

ROUABHA Hanane

Conception et simulation d'une antenne directive à large bande en Utilisant des matériaux artificiels

Proposé et dirigé par :

Dr. ZAITER Sabrina

Maitre de conférences/B

Univ. Blida1

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions DIEU le tout-puissant « ALLAH » de nous avoir guidé et donné le courage pour réaliser ce travail.

Nous adressons également nos remerciements à notre Encadrante Mme. Sabrina ZAITER, pour sa patience exceptionnelle, sa compréhension, ses compétences scientifiques et son soutien dans la réalisation de ce travail. Nous voudrions adresser nos remerciements à tous les membres de jury pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance envers tous les professeurs et enseignants qui ont contribué à notre formation, du premier cycle d'études jusqu'à la fin de notre parcours universitaire.

Enfin, nous remercions nos parents, nos frères et sœurs, ainsi que nos amis pour leurs paroles et leurs actions d'encouragement, qui nous ont permis de suivre cette formation de Master dans les meilleures conditions.

Dédicace

Avec l'aide de dieu, le tout puissant, ce travail est achevé

Je le dédie à toutes les personnes qui me sont chères :

Mon père, le meilleur père au monde, qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui, que dieu le garde et le protège.

Mes adorables sœurs, les meilleurs des sœurs : Samia, Nassira, Sakina et Hamida, pour leur tendresse, leur complicité et leur présence, aucun dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers elles.

Mon binôme préférée Naoufel, pour tout ce qu'il a fait pour la réussite de ce mémoire.

Mes collègues de travail pour leur soutien et pour les moments inoubliables que nous avons pu partager ensemble.

À tous mes enseignants et à tous ceux qui m'ont aidé.

En témoignant de mon amour et de ma reconnaissance.

Dédicace

C'est avec une profonde gratitude et sincères mots que je dédie ce travail à toutes les personnes qui me sont chères :

À mes chers parents, à qui aucun cadeau ne pourra jamais exprimer pleinement ce que je souhaite leur dire ou offrir.

A Madame Zaiter Sabrina, ma promotrice respectée, j'adresse ma profonde gratitude pour ses conseils avisés, son soutien et sa patience infinie. Sa bienveillance et sa rigueur m'ont permis de progresser et d'accomplir ce projet avec excellence. Je lui suis reconnaissant pour la confiance qu'elle m'a accordée et pour m'avoir transmis sa passion pour le sujet.

A mes sœurs adorées, confidentes et amies, je dédie ce mémoire en signe de reconnaissance pour votre tendresse et soutien

A toute ma famille, ma grande maman, mes oncles et tantes maternelles et paternelles, cousins et cousines.

A mes meilleurs amis Akram, Kader, Mahmoud, Abdou, Rahim, Bedro qui m'ont toujours encouragé.

A tous mes collègues et tous les étudiants de la promo RT 2024.

Et spécialement à mon binôme Hanane, merci pour tes conseils et tes encouragements, mais aussi pour les bons moments qui ont contribué à rendre ces années inoubliables.

Naoufel

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تصميم هوائي اتجاهي عريض النطاق باستخدام المواد الاصطناعية (مواد فوقية). لتنفيذ هذا التصميم، استخدمنا برنامج المحاكاة الكهرومغناطيسية CST Microwave Studio Suite. تُظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن هيكل الهوائي المقترح يحقق اتجاهية تبلغ حوالي 20 dBi حول تردد 12 جيجا هرتز.

كلمات المفاتيح : هوائي الفتحة، المواد الاصطناعية، المواد فوقية.

Résumé

L'objectif de ce travail est de concevoir une antenne directive à large bande en utilisant des matériaux artificiels (méta atomes). Pour réaliser cette conception, nous avons utilisé le logiciel de simulation électromagnétique CST Microwave Studio Suite. Les résultats obtenus montrent que l'antenne finale proposée est très large bande et atteint une directivité maximale de 20 dBi autour de la fréquence de 12 GHz.

Mots clés : Antenne fente, matériaux artificiels, méta-matériaux.

Abstract

The objective of this work is to design a wideband directive antenna using artificial materials (meta-atoms). To achieve this design, we utilized the electromagnetic simulation software CST Microwave Studio Suite. The obtained results show that the proposed final antenna is highly wideband and achieves a maximum directivity of 20 dBi around the frequency of 12 GHz.

Keywords: Slot antennas, meta-materials, artificial material.

Table des matières

Remerciements	2
Table des matières	6
Liste des figures	8
Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur les antennes	4
I.1 Introduction.....	5
I.2 Définition d'une antenne	5
I.3 Les caractéristiques générales d'une antenne	6
I.3.1 Les caractéristiques électriques	6
I.3.2 Les caractéristiques de rayonnement	9
I.4 Les différents types d'antennes	14
I.4.1 Antenne filaires	14
I.4.2 Antenne à réflecteur parabolique.....	14
I.4.3 Antenne à ouverture (cornet)	15
I.4.4 Les antennes à fentes rayonnantes.....	16
I.5 Comparaison des performances en rayonnement des différents types d'antennes	17
I.6 Techniques d'amélioration des performances en rayonnement des antennes	18
I.6.1 Technologie de plan de masse (Ground Plan Technology)	19
I.7 Conclusion	20
Chapitre II : Les Matériaux artificiels	21
II.1 Introduction	23
II.2 Les grandes familles des matériaux artificiels.....	23
II.2.1 Les méta-matériaux.....	23
II.2.2 Les cristaux photoniques.....	27
II.2.3 Les métas surfaces.....	29
II.3 Applications des matériaux artificiels en microondes.....	31
II.4 Avantages et limites des matériaux artificielles.....	34
II.5 Conclusion.....	35

Chapitre III : Conception et simulation d'antennes directives à large bande.....	36
III.1 Introduction	37
III.2 Conception d'une antenne directive large bande à méta matériaux	37
III.3 Comparaison des performances de l'antenne finale avec celles des antennes de la littérature	49
III .4 Conclusion.....	51
Conclusion Général	52
Références bibliographiques	53

Liste des figures

Figure 1: Une émission et réception avec deux antennes.	5
Figure 2: Représentation de l'impédance d'antenne.	6
Figure 3: Coefficient de réflexion (S11) d'une antenne patch fonctionnant à la fréquence $f=5\text{GHz}$	7
Figure 4: Illustration de la bande passante à -10 dB d'une antenne.	8
Figure 5 : Illustration des puissances à l'entrée-sortie d'une antenne.	8
Figure 6: Diagramme de rayonnement isotrope.	9
Figure 7 : Diagramme de rayonnement d'une antenne omnidirectionnel (dipôle).	10
Figure 8 : Diagramme de rayonnement directionnel [6].	10
Figure 9 : Angle d'ouverture à -3dB [8].	12
Figure 10 : Bande passante en rayonnement à -3dB.	12
Figure 11 : Différents types de polarisation de champ a) linéaire b) circulaire c) Elliptique [8].	13
Figure 12 : Exemples d'antennes filaires. a) Antenne Monopole. b) Antenne Dipôle. c) Antenne Hélice. Antenne à réflecteur parabolique	14
Figure 13: Antenne à réflecteur a)Principe de fonctionnement b) Antenne parabole c) Son diagramme de rayonnement en 3D.	14
Figure 14 : Exemples d'antenne cornet a) antenne cornet cylindrique b) antennes cornet rectangulaire c) son diagramme de rayonnement. Les antennes imprimées.	15
Figure 15 : Exemple d'Antenne imprimée.[8]	16
Figure 16 : Différentes forme d'éléments rayonnants. [14].	16
Figure 17 : Exemple d'antenne à fente rayonnante [8].	17
Figure 18 : Antenne à fente .a) antennes à fente linéaire b) Antenne à fente avec réflecteur.	17
Figure 19 : Antenne à réseau de fente pour radar à ondes millimétriques. a) Structure de l'antenne b) diagramme de rayonnement de l'antenne. [16].	19
Figure 20 : Principe de fonctionnement d'un matériau main gauche	23
Figure 21: Trièdre des vecteurs (, ,) pour une onde électromagnétique. a). Milieu à Matériaux conventionnel, b). Milieu à Méta-matériaux (main-gauche).[20].	23
Figure 22 : Vitesse de phase et vitesse de groupe a). Dans un milieu à matériau conventionnel b) dans un milieu à méta matériau (main-gauche) [21].	24
Figure 23 : Structure fils métalliques fins présentant ϵ négative et μ positive pour \parallel .[22].	24
Figure 24 : Structure résonateur en anneau fendu présentant positive/ négative quand H	25
Figure 25 : Représentation schématique de cristaux photonique : a).omnidirectionnels (1D), b). Bidimensionnels (2D), c). Tridimensionnels (3D) [30].	26
Figure 26 : Image au microscope électronique d'une opale naturelle constituée d'un réseau Quasi-périodique de billes de silice.	26
Figure 27 : Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies à l'intérieur d'un réseau de	

Bragg 1D [30].	27
Figure 28 : Diagramme de bande d'un cristal photonique 2D à maille carrée (Polarisation TE).	27
Figure 29 : Les Différents modèles FSS. a) FSS coupe-bande b) FSS passe-bande c) FSS passe-haut d) FSS passe-bas [36].	28
Figure 30 : a). Surface à haute impédance type champignon, b). Surface corruguée.	29
Figure 31 : a). Antenne patch avec un substrat HIS, b). Diagramme de rayonnement de l'antenne résultante [34].	30
Figure 32 : a) Un réseau de cellules RAF carrés. b) Diagrammes de rayonnement de l'antenne [41].	31
Figure 33 : (a) antenne patch à large bande et son S11, [28].	32
Figure 34 : (a) antenne patch à large bande et son (S11) [35].	33
Figure 35 : Antennes à dépointage de faisceau. a). Structure de l'antenne à gradient de phase, b) Diagramme de rayonnement de l'antenne [37].	33
Figure 36 : Antenne fente source conçue sur CST, a). Vue de haut b). Vue de profil	33
Figure 37 : Résultats de simulation de l'antenne source a) Niveau d'adaptation S11, b). Diagramme de rayonnement 3D à f=12GHz.	38
Figure 38 : Diagramme de rayonnement de l'antenne source à f=12GHz a) Plan phi=0°, b). Plan phi=90°	39
Figure 39 : Antenne fente avec PRS simulée sur CST	39
Figure 40 : Résultats de simulation de l'antenne fente avec PRS a) S11, b). Diagramme de rayonnement en 3D à f=12 GHz.	40
Figure 41 : Diagramme de rayonnement de l'antenne fente et l'antenne fente+PRS à f=12 GHz ; a) plan phi=0° ; b) plan phi=90°.	40
Figure 42 : Directivité de l'antenne fente+PRS en fonction de la fréquence	41
Figure 43 : PCM a correction de phase . Champ électrique E de l'ouverture rayonnante de l'antenne tracé a f=12GHz. a) Amplitude du champ, b). Phase du champ.	41
Figure 44 : Grille 2D tracé à la sortie de l'antenne référence. a) plan de coupe de l'antenne, b). Vue de haut de la grille.	42
Figure 45 : Trois types de cellules unitaires proposées .a) type1, b). type2, c) type3.	43
Figure 46 : S21 de la cellule type 1. a). Amplitude, b). Phase.	44
Figure 47 : Coefficient de transmission S21 de la cellule type 2. a) Amplitude, b) Phase	44
Figure 48 : Coefficient de transmission S21 de la cellule type 3. a) Amplitude, b) Phase.	45
Figure 49 : a) Schéma bloc du PCM, b) Structure finale de l'antenne avec PCM	45
Figure 50 : la distribution de phase en 2D a) à l'entrée de PCM. b) à la sortie de PCM.	46
Figure 51 : Niveau d'adaptation S11 des antennes	46
Figure 52 : Bandes passante en rayonnement a -3dB des deux antennes	47
Figure 53 : Diagramme de rayonnement en directivité des deux antennes avec et sans PCM à f=12Ghz a) phi=90° b) phi=0°.	47

Figure 54 : Vue de haut du PCM a) notre Proposition b) celui de la littérature [41]	48
Figure 55 : Niveau d'adaptation S11 de l'antenne finale proposée comparé a celui de l'antenne de littérature	49
Figure 56 :Bande passante a -3dB de l'antenne finale proposée comparé a celui de l'antenne de littérature	49
Figure 57 : Diagramme de rayonnement de notre antenne à f=12GHz .a) pour plan $\varphi=0^\circ$, b) plan $\varphi=90^\circ$.	50
Figure 58 : Diagramme de rayonnement de l'antenne de la littérature à f=12.45GHz .a) pour plan $\varphi=0^\circ$, b) plan $\varphi=90^\circ$	50

Liste des Tableaux

Tableau 1: Avantages et limites des différents d'antennes [15].....	18
Tableau 2: les avantages et limites des matériaux artificielles.	34
Tableau 3 : Cahier des charges.	37
Tableau 4: Résultats de simulation de l'antenne fente à $f=12\text{Gz}$	39
Tableau 5: Résultats de simulation de l'antenne de référence à $f=12\text{Ghz}$	41
Tableau 6 : phase requise, phase a l'entrée et phase a la sortie du PCM.	43
Tableau 7: Comparaison des résultats de simulation des deux antennes (avec et sans PCM) à $f=12\text{Ghz}$	48
Tableau 8 : Comparaison des performances de l'antenne finale proposée avec celles de l'antenne de la littérature	51

Liste des abréviations

FSS:	frequency sélectives surfaces.
HIS :	High impédance surfaces.
PRS :	Surface Plasmon Résonance.
PCM :	Phase correcting méta structure.
AM :	Amplitude modulation.
FM :	Frequency modulation.
MMT :	Matériaux méta magnétiques.
MMG :	Matériaux à main gauche.
BIE :	bande interdite électromagnétique.
SRR :	Split Ring Resonator.
TE :	Transverse Electric.

Introduction Générale

L'évolution constante du domaine des télécommunications est étroitement liée à une demande croissante du grand public pour des applications multimédias à haut débit, englobant le transfert de données, de voix, d'images et de vidéos. Les antennes jouent un rôle crucial dans ces systèmes en émettant ou recevant des ondes électromagnétiques. Au fil des dernières décennies, plusieurs études ont été réalisées sur les antennes, conduisant à une grande diversité de types d'antennes dont chaque une d'entre elles est adaptées à des applications spécifiques, telles que les antennes imprimées [1], les antennes filaires [1], les antennes à ouverture rayonnantes [1], etc.

Pour répondre aux exigences croissantes des systèmes de communication modernes et des applications de détection, les antennes directives à large bande suscitent un intérêt particulier. Ces antennes offrent une combinaison unique de directivité élevée, qui concentre les ondes électromagnétiques dans une direction spécifique, et de large bande passante, couvrant ainsi une gamme étendue de fréquences. Leur utilité est incontestable dans divers domaines d'application. En aérospatiale et en aéronautique, elles assurent des communications stables et fiables sur de longues distances et sur une large gamme de fréquences [2]. Dans les liaisons point à point, pour assurer des communications à longue distance entre les tours de télécommunication [2]. Dans le domaine militaire, elles garantissent des communications sécurisées, résistantes aux interférences [11]. Elles sont également cruciales pour la sécurité et la surveillance à grande échelle, comme la surveillance des frontières et la sécurité publique [2]. Aussi, elles sont essentielles pour les systèmes d'imagerie médicale, tels que l'imagerie par résonance magnétique (IRM) [2].

Les systèmes actuels peinent à conserver de bonnes performances tout en restant compacts en raison de la complexité des antennes, qui combinent des composants électroniques et mécaniques, les rendant ainsi relativement encombrantes . Par contre, l'avènement des métamatériaux [3] représente une solution prometteuse en permettant la conception d'antennes à profil bas [4], remettant ainsi en question les limites technologiques actuelles.

Ce mémoire explore les récents développements des métamatériaux pour concevoir de nouvelles antennes directives et larges bandes adaptés aux applications spatiales et aéronautiques. Il est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente une vue d'ensemble des différentes antennes, détaillant leurs propriétés et leurs caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre, nous examinons les récentes avancées dans le domaine des matériaux artificiels. Nous explorons le fonctionnement des différentes grandes familles des matériaux artificiels telles que les méta-matériaux [5.], les Surfaces à Haute Impédance (HIS) [4.], les Surfaces Sélectives en Fréquence (FSS) [6] et les cristaux photoniques [7]. De plus, nous étudions les diverses applications de ces matériaux dans le domaine des micro-ondes.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous exploitons les propriétés des matériaux artificiels pour proposer des antennes directives à large bande. Nous concluons avec une synthèse générale, exposant les perspectives de cette étude.

Chapitre I :
Généralités sur les antennes

I.1 Introduction

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour transmettre ou recevoir des ondes électromagnétiques, comme les ondes radio, les ondes de télévision et les signaux de téléphonie mobile. Elles sont essentielles pour la communication moderne et existent sous différentes formes et tailles selon l'application. On les utilise souvent dans la navigation, la surveillance, la météorologie, et bien d'autres domaines. Dans ce chapitre, nous allons explorer les principes fondamentaux des antennes, ainsi que leurs diverses formes et caractéristiques, aussi on va présenter les différentes techniques utilisées à ce jour pour améliorer leurs performances en rayonnement.

I.2 Définition d'une antenne

Une antenne est un dispositif utilisé pour émettre ou recevoir des ondes électromagnétiques. Elle est constituée généralement d'un ou de plusieurs conducteurs métalliques agencés de manière à rayonner ou piéger des ondes électromagnétiques. Il existe différents types d'antennes tels que : les antennes filaires [1], les antennes paraboliques [1], les antennes cornet [1], les antennes imprimées [1], ...etc. choisir une antenne pour une application donnée repose sur divers éléments liés au domaine d'application, tels que la fréquence de fonctionnement, la directivité et le gain, ainsi que plusieurs d'autres paramètres [1].

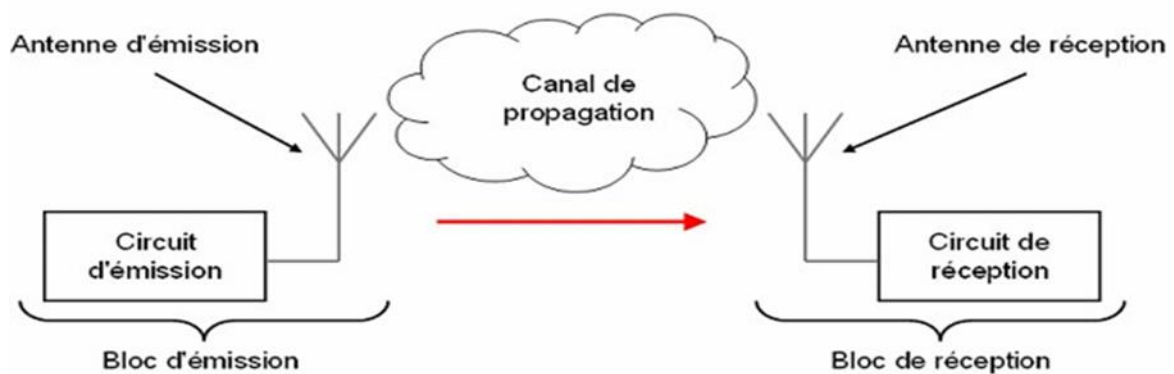


Figure 1: Une émission et réception avec deux antennes.

I.3 Les caractéristiques générales d'une antenne

Pour choisir une antenne a une application donnée, il est crucial d'analyser ces caractéristiques électriques et de rayonnement. Ces caractéristiques influencent non seulement les performances de l'antenne, mais aussi sa compatibilité avec des utilisations particulières.

I.3.1 Les caractéristiques électriques

Les caractéristiques électriques des antennes incluent plusieurs paramètres clés qui influencent leur efficacité et leur fonctionnement global. Parmi ces paramètres, on retrouve :

a) L'impédance d'entrée

D'un point de vue circuit, une antenne est caractérisée par son impédance d'entrée. L'expression de l'impédance d'entrée d'une antenne Z_{Ant} se décompose en une partie réelle R_{in} et une partie imaginaire X_A et s'écrit comme suit : [8]

$$Z_{Ant} = R_A + j \cdot X_A \quad (I .1)$$

Avec :

Z_{Ant} : Impédance d'entrée (ohms).

R_A : Résistance d'antenne (ohms).

X_A : Réactance de l'antenne (ohms).

La partie réelle de l'impédance R_{in} regroupe la résistance de pertes et la résistance de rayonnement de l'antenne. Elle s'écrit comme suit :

$$R_{in} = R_{pertes} + R_{ray} \quad (I .2)$$

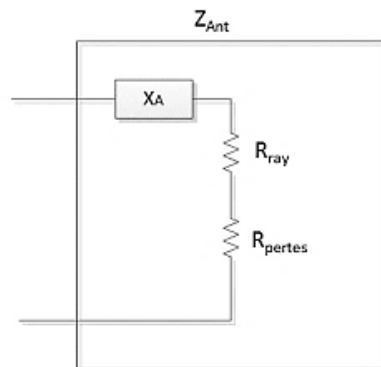


Figure 2: Représentation de l'impédance d'antenne.

b) Le coefficient de réflexion S_{11}

Lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation ou rencontre une nouvelle interface, une partie de cette onde incidente est réfléchiée et l'autre partie est transmise dans le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne se définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchiées. Pour une antenne d'impédance Z_{Ant} , reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique Z_c , le coefficient de réflexion peut être défini comme suit : [9]

$$S_{11} = \frac{Z_{Ant} - Z_c}{Z_{Ant} + Z_c} \quad (I.3)$$

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibel (dB), il permet de connaître la qualité d'adaptation d'une antenne. En effet, plus son module tend vers l'infini, plus l'antenne est adaptée. Souvent, la fréquence de résonance d'une antenne est celle où le coefficient de réflexion est minimal.

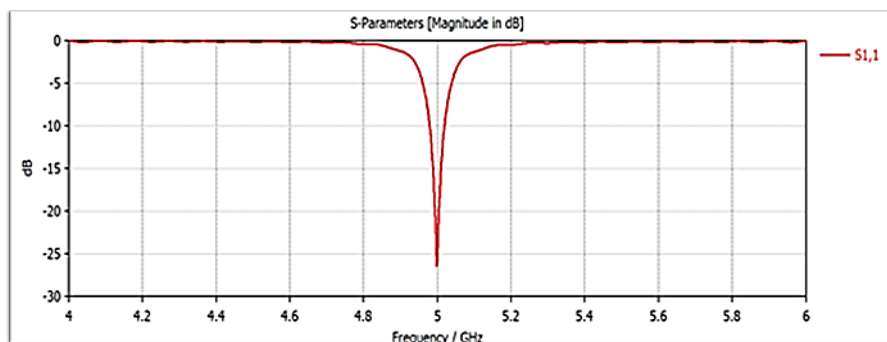


Figure 3: Coefficient de réflexion (S_{11}) d'une antenne patch fonctionnant à la fréquence $f=5\text{GHz}$.

c) La bande passante en adaptation

La bande passante en adaptation d'une antenne peut être définie comme la bande de fréquences pour laquelle le coefficient de réflexion S_{11} est inférieur à un seuil donné. Elle est souvent considérée comme une gamme de fréquences positionnée de part et d'autre de la fréquence centrale F_0 (Figure 4). Sur cette plage de fréquence, le transfert de l'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est optimal.

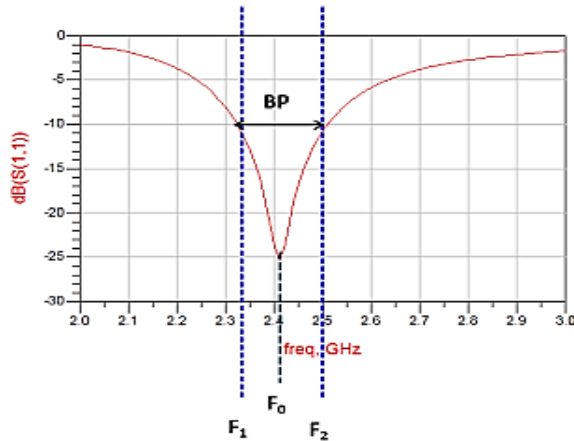


Figure 4: illustration de la bande passante à -10 dB d’une antenne.

Elle est calculée suivant l’équation (I.1) : [10]

$$Bp(\%) = 100 \times \frac{F_2 - F_1}{F_0} \tag{I.4}$$

Avec :

F_0 : Fréquence de Résonance de l’antenne.

F_1 : la fréquence inférieure à laquelle le signal est transmis efficacement.

F_2 : la fréquence supérieure à laquelle le signal est transmis efficacement

d) Efficacité

Le rendement ou efficacité d’une antenne est définie comme étant le rapport de la puissance rayonnée par l’antenne (P_{ray}) sur la puissance reçue par l’antenne ($P_{reçue}$) [10].

$$\eta = \frac{P_{ray}}{P_{reçue}} \tag{I.5}$$

Cette grandeur dépend de la forme géométrique de l’antenne et des matériaux utilisés pour sa fabrication (pertes diélectriques et métalliques) ce qui fait d’elle un paramètre propre à l’antenne.

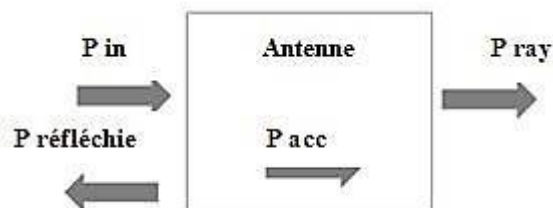


Figure 5 : Illustration des puissances à l’entrée-sortie d’une antenne.

Or que l'efficacité totale est le rapport de la puissance rayonnée sur la puissance injectée à l'antenne. Elle prend en compte les pertes par désadaptation de l'antenne et elle s'écrit comme :

$$\eta = \frac{P_{ray}}{P_{in}} = \frac{P_{ray}}{P_{reçue}} (1 - |S_{11}|^2) \quad (I.6)$$

I.3.2 Les caractéristiques de rayonnement

Les caractéristiques en rayonnement illustrent la manière dont une antenne émet ou reçoit les ondes électromagnétiques. Ces caractéristiques incluent : [11]

a) Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est défini comme étant la représentation graphique de la distribution de l'énergie rayonnée dans l'espace libre. Il existe différents types de diagramme de rayonnement parmi lesquels on peut citer :

a.1) Diagramme de rayonnement isotrope

Pour ce type de diagramme de rayonnement, la puissance est rayonnée uniformément dans toutes les directions, de manière égale. Ce diagramme de rayonnement n'est pas physique mais plutôt théorique il est utilisé pour les calculs de référence [11].

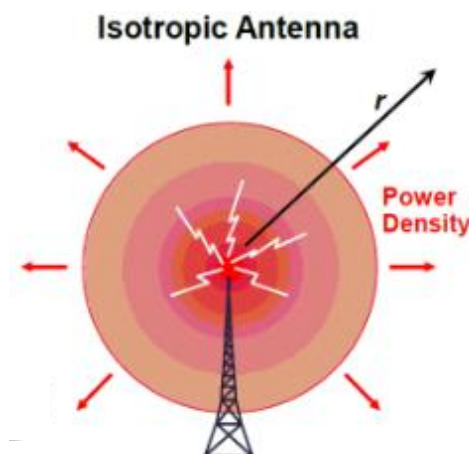


Figure 6: Diagramme de rayonnement isotrope.

a.2) Diagramme de rayonnement omnidirectionnel

Comme montré sur la figure 7, un diagramme de rayonnement omnidirectionnel possède une répartition uniforme du rayonnement dans toutes les directions dans le plan horizontal et directive sur le deuxième plan vertical. Les antennes avec un tel diagramme de rayonnement sont généralement utilisées dans les applications nécessitant une couverture à 360 degrés [11].

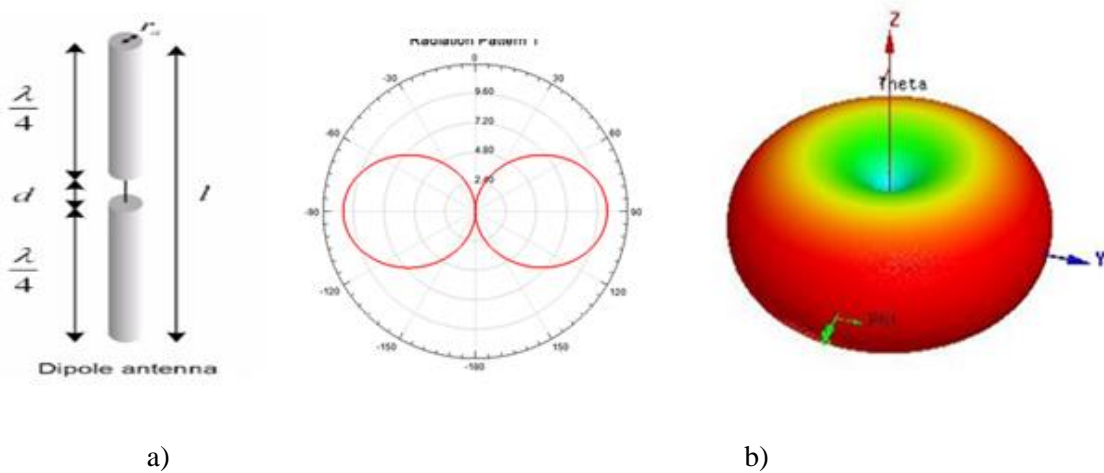


Figure 7 : Diagramme de rayonnement d'une antenne omnidirectionnelle (dipôle).

a.3) Diagramme de rayonnement directionnel

Contrairement aux deux types de rayonnement vu jusqu'ici, une antenne a un rayonnement directionnel à la propriété de focaliser l'énergie rayonnée dans certaines directions que dans d'autres. Les figures (8) représentent le diagramme de rayonnement d'une antenne parabole qui est plus directionnelle dans le plan horizontal que dans le plan vertical [12].

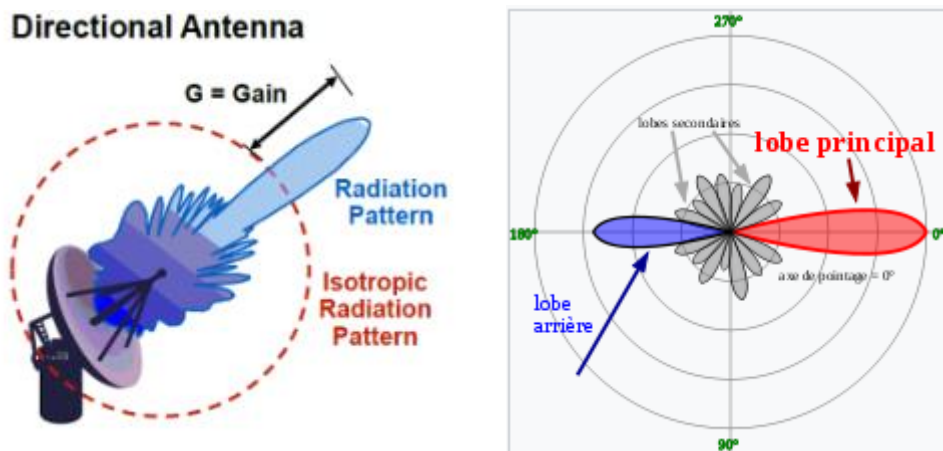


Figure 8 : Diagramme de rayonnement directionnel [12].

Ce diagramme est généralement constitué de trois différents lobes :

- **Lobe principal** : qui représente la direction privilégiée dans la quelle une antenne émet ou reçoit le plus d'énergie.
- **Lobes secondaires** : Ce sont les plus petits lobes qui se trouvent à côté du lobe principal. Ils représentent la direction dans laquelle une partie de l'énergie est rayonnée, mais à une intensité plus faible par rapport au lobe principal. Il est recommandé de les minimiser au maximum lors de la conception de l'antenne.
- **Lobes arrière** : C'est le lobe situé à l'opposé du lobe principal, plus précisément à la direction opposée à laquelle l'énergie est principalement rayonnée.

b) Le gain

Le gain d'une antenne est une mesure qui indique à quel point une antenne peut amplifier le signal émis ou reçu dans une direction donnée par rapport à une antenne de référence (antenne isotrope). Il est calculé comme étant le rapport entre la puissance rayonnée dans le lobe principal et la puissance rayonnée par une antenne de référence, isotrope ou dipolaire.[9].

Il est calculé suivant l'équation (I.7) :[9]

$$G(\theta, \varphi) = 4 * \pi \frac{p(\theta, \varphi)}{p_a} \quad (I.7)$$

Avec :

$G(\theta, \varphi)$: représente le gain de l'antenne dans une direction spécifique.

$p(\theta, \varphi)$: représente la puissance rayonnée par l'antenne dans la direction spécifiée en watts(W).

P_a : représente la puissance isotrope apparente.

c) La directivité

La directivité d'une antenne décrit sa capacité à concentrer le rayonnement dans une direction précise. Elle représente le rapport entre sa densité de puissance rayonnée dans une certaine direction et la densité de puissance rayonnée par l'antenne isotrope. La relation entre le gain G_{\max} et la directivité D est donnée par l'équation (I.8) [9] :

$$G_{\max} = \eta * D$$

Avec :

η : est l'efficacité de rayonnement qui regroupe l'ensemble des pertes dues à la structure de l'antenne.

d) L'angle d'ouverture

L'angle d'ouverture décrit la largeur du lobe principale d'un diagramme de rayonnement, Cet angle est défini par l'intervalle entre les deux directions du lobe principal où la puissance rayonnée diminue de moitié par rapport à la direction de rayonnement maximale comme montré sur la figure 9 [13].

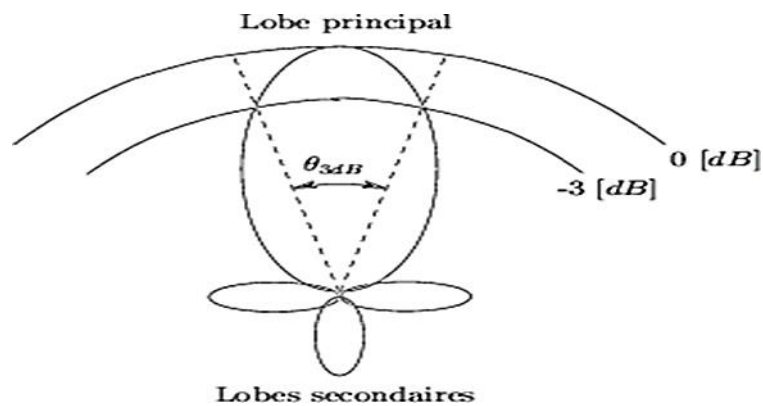


Figure 9 : Angle d'ouverture à -3dB [14].

e) La bande passante en rayonnement

La bande passante en rayonnement correspond à la plage de fréquence où la puissance rayonnée en sortie baisse de -3dB. Une directivité élevée est souvent associée à une faible bande passante au rayonnement [15].

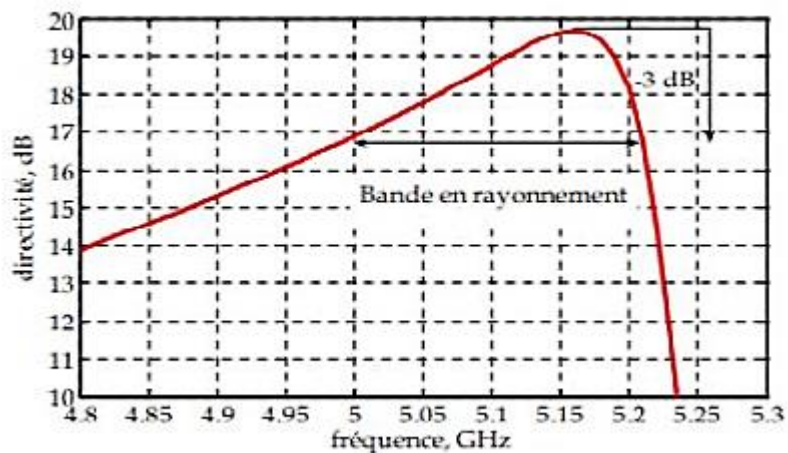


Figure 10 : Bande passante en rayonnement à -3dB

f) Polarisation

La polarisation d'une onde joue un rôle essentiel dans l'analyse des antennes, elle est déterminée en fonction de la direction du champ électrique de l'onde émise ou reçue par l'antenne. Les antennes peuvent adopter une polarisation linéaire, circulaire ou même elliptique.[16].

f.1). Polarisation linéaire

La polarisation est dite linéaire si le champ électrique rayonné par l'antenne oscille dans une direction fixe le long d'une ligne droite. Cette direction peut être verticale, horizontale ou inclinée à un angle spécifique par rapport à l'axe de référence.

f.2). Polarisation circulaire

Le champ électrique en polarisation circulaire décrit une trajectoire circulaire. La polarisation est dite circulaire droite si le champ E tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Par ailleurs, elle est dite circulaire gauche si le champ E tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.

f.3). Polarisation elliptique

En polarisation elliptique, le champ électrique décrit une ellipse. Il existe deux types de polarisation elliptique, droite si le champ électrique tourne dans le sens des aiguilles d'une montre ou gauche si le champ tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

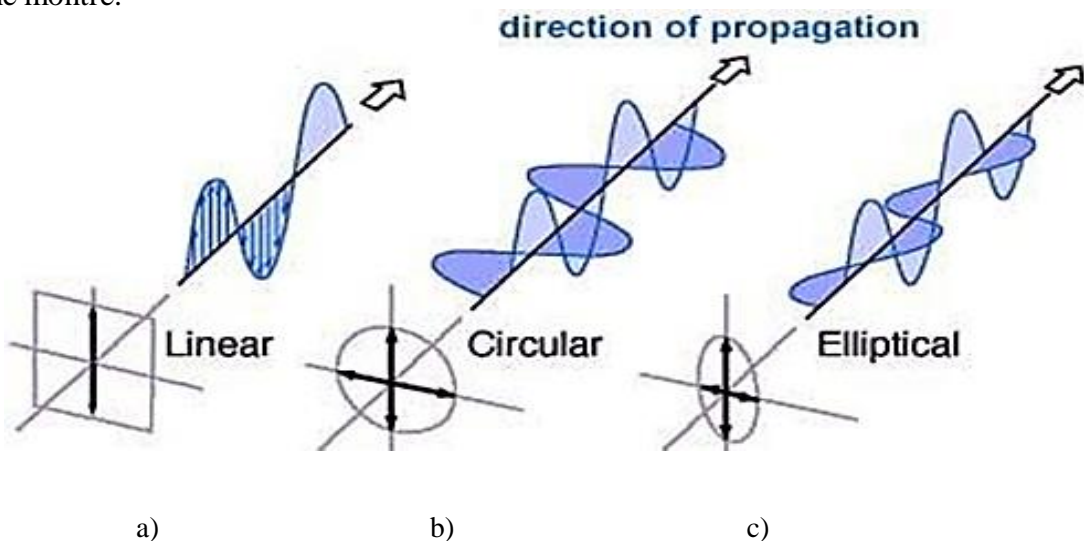


Figure 11 : Différents types de polarisation de champ a) linéaire b) circulaire c) Elliptique [14].

I.4 Les différents types d'antennes

Parmi les principales catégories d'antennes qui constituent la base de toutes les structures rayonnantes, on peut citer :

I.4.1 Antenne filaires

Les antennes filaires sont des dispositifs simples et courants. Elles sont généralement composées d'un fil métallique de longueur adéquate, qui peut être droit, courbé, ou même en forme de boucle. Il existe plusieurs antennes filaires telle que : les dipôles [2], les monopoles [2], les Hélices [2]...etc. Ces antennes sont souvent utilisées dans diverses applications, telles que la radiodiffusion (radio AM/FM, télévision), les communications mobiles, les systèmes de navigation et la radiocommunication [2].

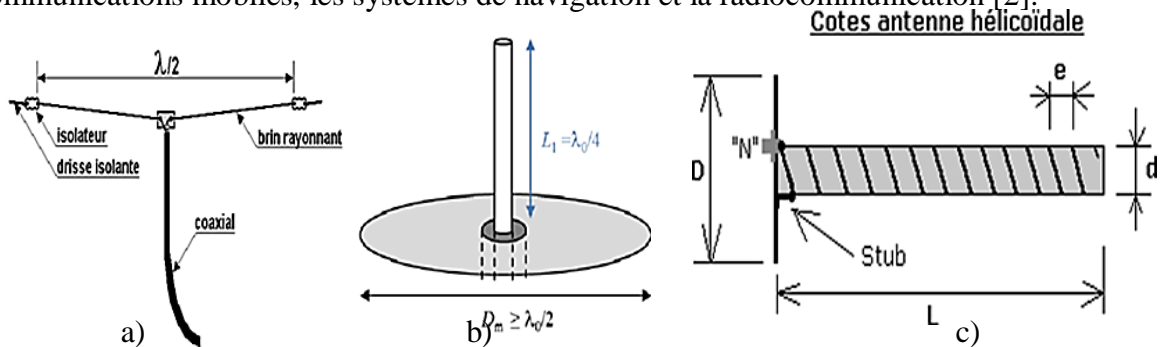


Figure 12 :Exemples d'antennes filaires. a) Antenne Monopole. b) Antenne Dipôle. c) Antenne Hélice.

I.4.2 Antenne à réflecteur parabolique

Les antennes à réflecteur parabolique jouent un rôle crucial dans les systèmes de communication modernes. Elles utilisent un réflecteur en forme de parabole pour concentrer ou émettre les ondes radio. Leur principe de fonctionnement repose sur une source placée au foyer de la parabole, qui envoie les ondes vers le réflecteur, les réfléchissant en un faisceau parallèle comme montré sur la figure 13.

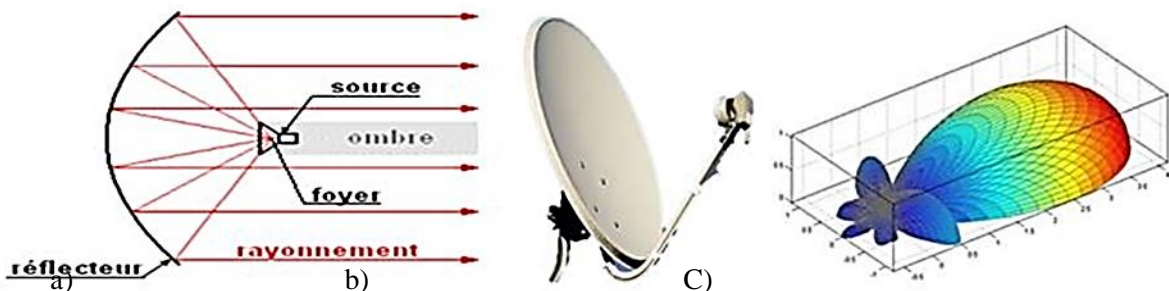


Figure 13: Antenne à réflecteur a)Principe de fonctionnement b) Antenne parabole c) Son diagramme de rayonnement en 3D.

Ces antennes sont utilisées pour la télévision par satellite [2], la communication par satellite [2], la radiodiffusion par satellite [2] et les systèmes radar [2]. Ce type d'antennes se distinguant par leur haute directivité, leur gain élevé et leur capacité à réduire les interférences [2].

I.4.3 Antenne à ouverture (cornet)

Une antenne cornet est un type d'antenne à ouverture qui utilise une forme conique ou pyramidale pour diriger les ondes radio. Elle est utilisée couramment pour les applications à haute fréquence, comme les micro-ondes et les systèmes radar, en raison de sa capacité à produire un faisceau directionnel avec un gain élevé et une faible. Ce type d'antenne peut avoir un gain important avec une directivité élevée [17].

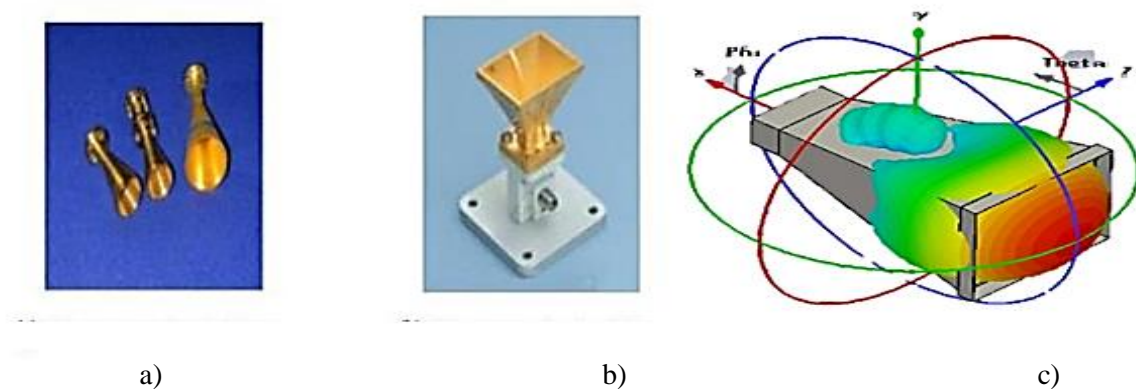


Figure 14 : Exemples d'antenne cornet a) antenne cornet cylindrique b) antennes cornet rectangulaire c) son diagramme de rayonnement. Les antennes imprimées

Les antennes imprimées, également appelées antennes micros trip, sont constituées d'un patch métallique imprimé sur un substrat diélectrique couvert un plan de masse en dessous [8]. Leur principe de fonctionnement repose sur la résonance du patch métallique lorsqu'il est alimenté par un signal radiofréquence, permettant ainsi l'émission ou la réception des ondes électromagnétiques. Ces antennes offrent l'avantage d'être peu coûteuses, légères et faciles à intégrer dans les circuits électroniques.

Elles sont utilisées dans une vaste gamme d'applications telle que les radars embarqués, les systèmes de télécommunications, Imagerie radar... etc. [8].

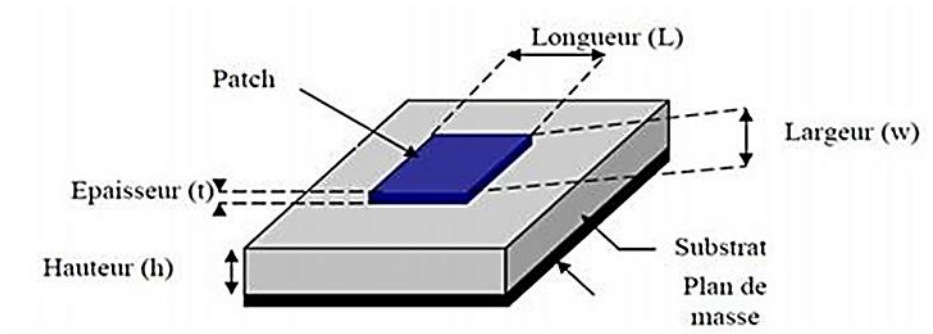


Figure 15 : Exemple d'Antenne imprimée.[14]

Les antennes imprimées peuvent prendre de nombreuses formes géométriques dont chaque forme a ces propres avantages en termes de largeur de bande, de polarisation, de directivité ... etc. Parmi Les formes les plus utilisées, on distingue : la forme circulaire, la forme rectangulaire, la forme triangulaire ainsi d'autres formes [18]. Représentées sur la figure (16)

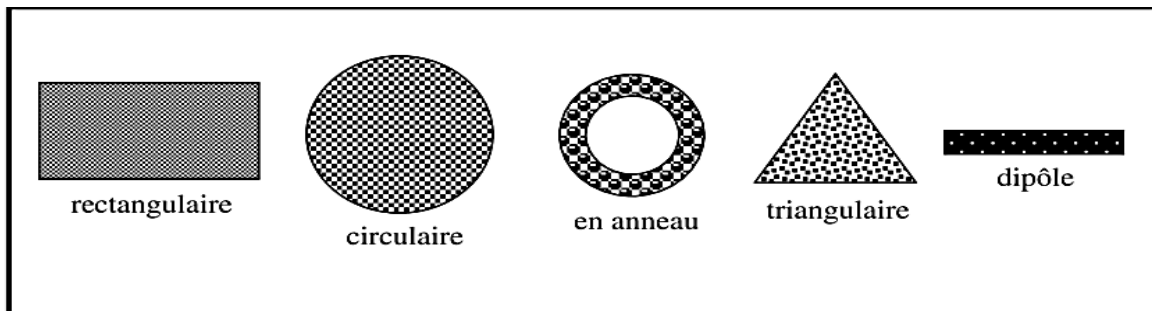


Figure 16 :Différentes forme d'éléments rayonnants. [18].

I.4.4 Les antennes à fentes rayonnantes

Les antennes fentes sont un type d'antenne qui utilise des fentes ou des ouvertures dans une surface conductrice pour rayonner ou recevoir des ondes électromagnétiques. Ces antennes agissent comme des sources de rayonnement lorsque des courants de haute fréquence les traversent. Les antennes fentes sont souvent utilisées dans les applications où une antenne discrète ou conformable est nécessaire, comme dans les avions ou les systèmes de communication radar. Elles peuvent être intégrées dans les surfaces métalliques sans trop perturber l'aérodynamique ou l'apparence de l'objet [2].

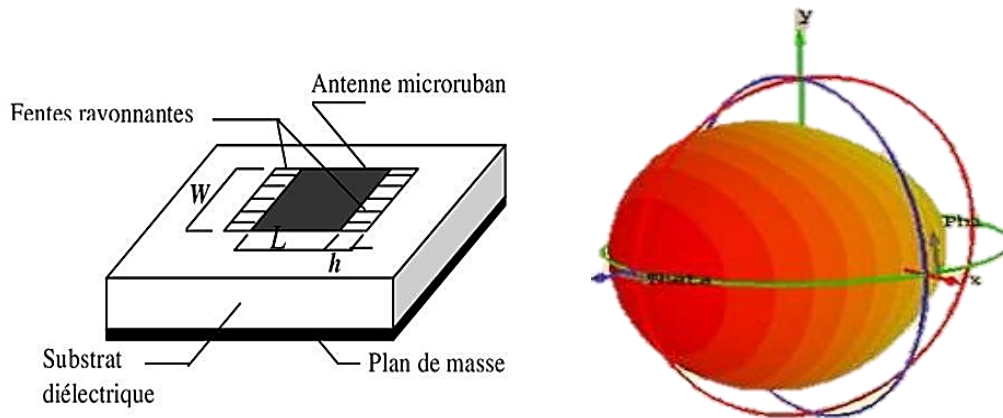


Figure 17 : Exemple d'antenne à fente rayonnante [14].

Les antennes à fente peuvent être configurées de diverses manières, chacune adaptée à des applications particulières. Parmi les configurations les plus courantes, on trouve les antennes à fente linéaire, les antennes en forme d'anneau, les antennes à fente avec réflecteur....etc.

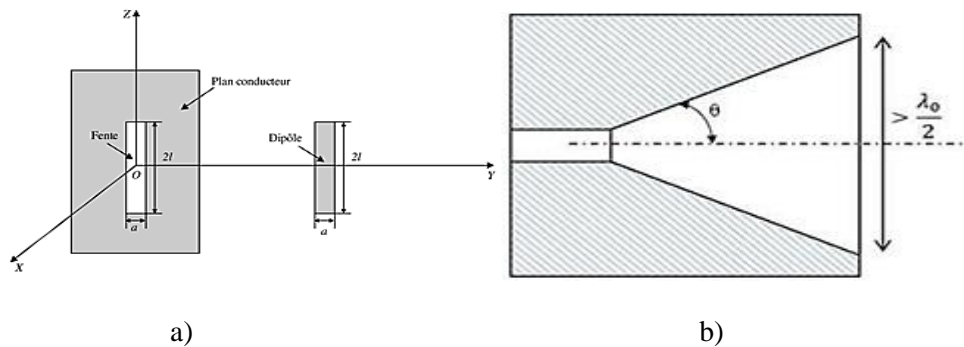


Figure 18 : Antenne à fente .a) antennes à fente linéaire b) Antenne à fente avec réflecteur.

I.5 Comparaison des performances en rayonnement des différents types d'antennes

Les avantages et les limites des différentes familles d'antennes abordées précédemment sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1: Avantages et limites des différents d'antennes [19].

Type d'antenne	Directivité	Polarisation	BP	Taille	Complexité de fabrication
Filaire	Faible à moyenne	Linéaire	Etendue variable	Petite à moyenne	Facile à fabriquer
A réflecteur	Elevée	Linéaire/ Circulaire	Large	Grande	Moyennement complexe
A ouverture Cornet	Elevée	Linéaire/ Circulaire	Large	Grande	Moyennement complexe
Imprimée (patch)	Faible à moyenne	Linéaire/ circulaire	Etendue variable	Très petite à petite	Facile à fabriquer
A fente	Faible à moyenne	Linéaire	Large	Variable	Moyennement complexe

Le tableau montre que chaque type d'antenne présente des avantages et des inconvénients. Les antennes filaires sont simples et économiques mais offrent généralement une directivité faible. En revanche, les antennes à réflecteur et à ouverture (cornet) offrent une directivité élevée et une large bande passante, mais sont plus encombrante et plus complexes et coûteuses à fabriquer.

I.6 Techniques d'amélioration des performances en rayonnement des antennes

Pour améliorer les performances de rayonnement des antennes, en particulier celles à fente rayonnante, plusieurs techniques ont été explorées :

IIII.2. 1 Mise en réseau des fentes rayonnantes (Slot Arrays)

La configuration de plusieurs fentes en réseau permet de créer un faisceau plus étroit et dirigé, similaire à la technique utilisée pour les antennes patch. Ainsi, plusieurs fentes sont alignées de manière précise et alimentées avec des phases ajustées de manière cohérente. Chaque fente contribue donc à former un faisceau combiné qu'on peut diriger électroniquement dans différentes directions sans nécessiter de mouvements mécaniques.

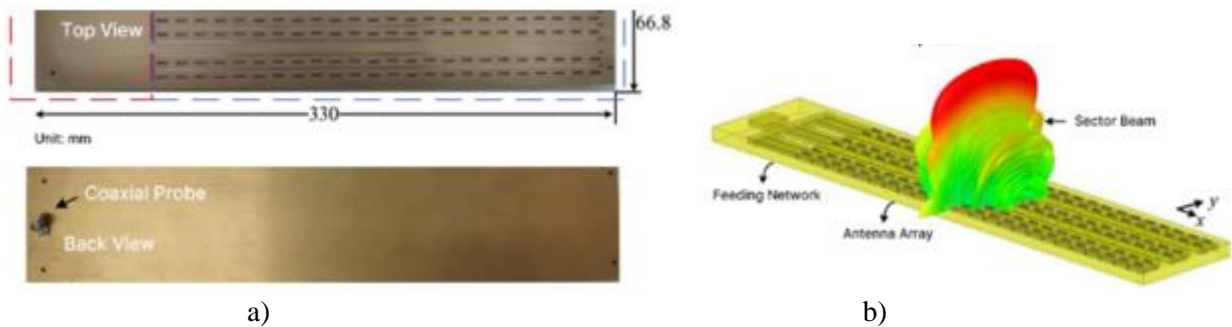


Figure 19 : Antenne à réseau de fente pour radar à ondes millimétriques. a) Structure de l'antenne b) diagramme de rayonnement de l'antenne. [20].

La mise en réseau des fentes dans [20] a permis d'augmenter la directivité de l'antenne jusque 22.3dBi à la fréquence centrale de l'antenne avec un niveau de lobes secondaires très réduit de l'ordre de -19.3dB.

I.6.1 Technologie de plan de masse (Ground Plan Technology)

Un bon plan de masse autour d'une antenne à fente aide à concentrer le signal dans direction voulue en réduisant les interférences et en limitant les pertes de rayonnement latéral. Il agit comme un miroir qui renvoie le signal principal, renforçant ainsi la directivité de l'antenne en diminuant les lobes secondaires non désirés. En résumé, un plan de masse efficace est crucial pour optimiser la direction et les performances globales d'une antenne à fente, assurant que le rayonnement soit bien ciblé et que la qualité du signal soit maximale[21].

I.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre, en premier lieu nous avons présenté les antennes d'une manière générale, leurs différents types et caractéristiques. Nous avons aussi cité les différents avantages et inconvénients de ces antennes. En fin, un bref aperçu sur les différentes techniques utilisées à ce jour pour améliorer les performances en rayonnement des antennes à fente est donné. Dans le chapitre qui suit nous allons nous intéresser aux différentes familles des matériaux artificielles susceptibles d'améliorer les performances de rayonnement des antennes.

Chapitre II :

Les Matériaux artificiels

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons explorer les matériaux artificiels, une classe innovante conçue pour avoir des propriétés électromagnétiques uniques, absentes dans les matériaux naturels. Ces matériaux, tels que les méta-matériaux, les méta-surfaces et les cristaux photoniques, ont révolutionné de nombreux domaines scientifiques et techniques. Nous donnerons un aperçu de leur historique, de leur principe de fonctionnement et de leurs applications.

II.2 Les grandes familles des matériaux artificiels

II.2.1 Les méta-matériaux

Les méta matériaux sont des matériaux artificiels conçus pour avoir des propriétés électromagnétiques spécifiques qui n'existent pas dans les matériaux naturels (avoir une permittivité et perméabilité négative, un indice de réfraction négatif). Ils sont structurés à une échelle plus petite que la longueur d'onde, ce qui leur permet de contrôler les ondes électromagnétiques de manière unique. Les recherches de Victor Veselago [21], ont inspiré la prédiction des propriétés des métamatériaux à indice de réfraction négatif. Il est important de noter qu'aucun matériau naturel ne possède à la fois une permittivité et une perméabilité négatives. Cependant, J. Pendry [3] a expliqué dans ses travaux qu'il est possible de créer un tel matériau en combinant ces deux types de matériaux. Lorsqu'un matériau est excité, sa réponse électromagnétique est déterminée par ses deux paramètres intrinsèques, à savoir, la permittivité et la perméabilité. En fonction de leur permittivité et perméabilité, les matériaux peuvent être classés en quatre familles :

- $(\epsilon +, \mu +)$: correspond aux matériaux naturels
- $(\epsilon +, \mu -)$: correspond aux matériaux ferromagnétique.
- $(\epsilon -, \mu +)$ correspond aux plasmas ainsi qu'aux métaux à des fréquences optiques.
- $(\epsilon -, \mu -)$, appartient à la classe des MMT (MetaMaTeriaux) dits main gauche (MMG).

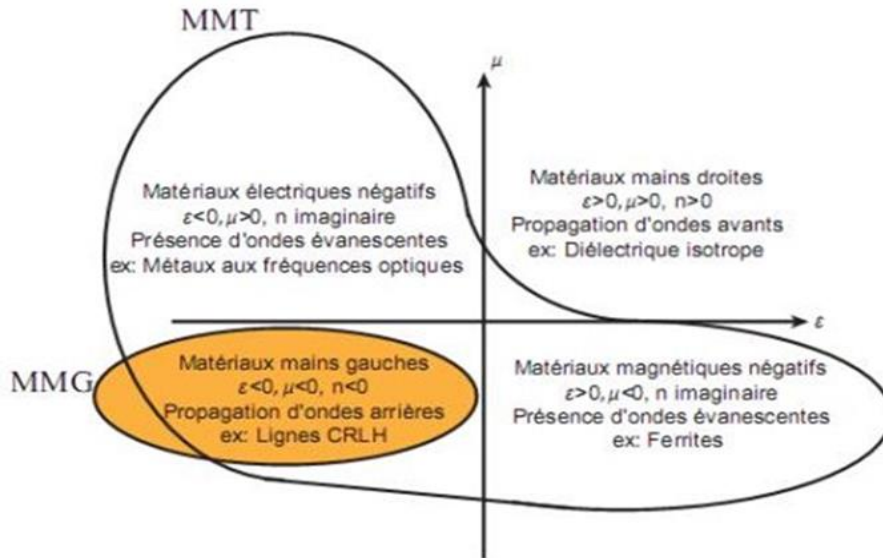


Figure 20 : Principe de fonctionnement d'un matériau main gauche

Lorsque une onde plane se propage dans un méta-matériau le trièdre constitué des trois Vecteurs $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{K})$ est inversé.

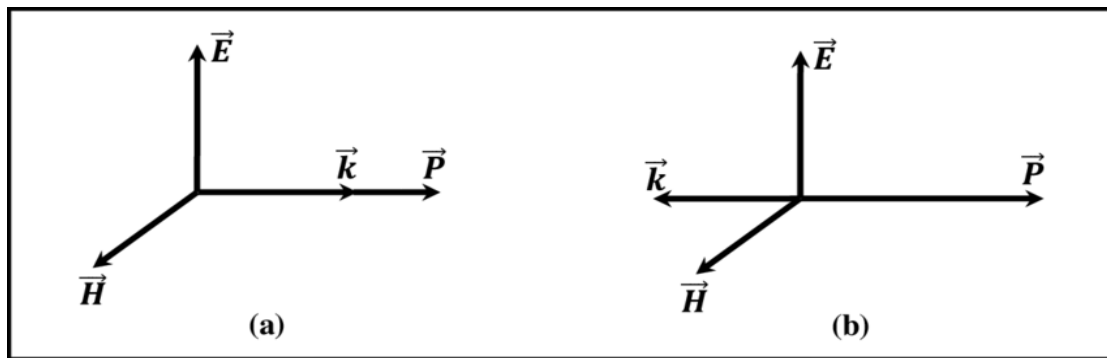


Figure 21: Trièdre des vecteurs $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{K})$ pour une onde électromagnétique. a). Milieu à Matériaux conventionnel, b). Milieu à Méta-matériaux (main-gauche).[22].

Pour ce type de matériaux, les fronts de L'énergie électromagnétique se propage dans une direction opposée à celle du vecteur $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{K})$ selon le (vecteur de Poynting \vec{P}). De plus, il y a une contradiction entre les vitesses de phase et de groupe, contrairement au milieu conventionnel.

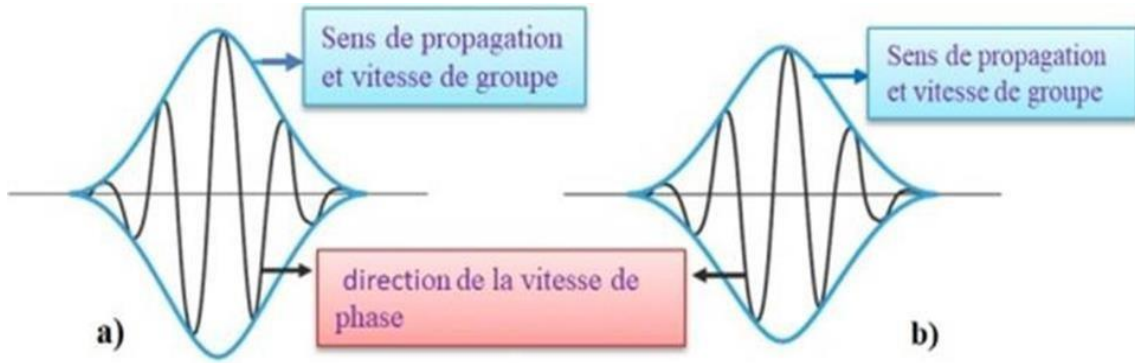


Figure 22 : Vitesse de phase et vitesse de groupe a). Dans un milieu à matériau conventionnel b) dans un milieu à méta matériau (main-gauche) [23].

II.2.1.1 Création de matériaux main gauche (Meta matériaux)

Lors de ses premières recherches, Pendry [3] a proposé une structure pour créer un matériau main gauche. Cette structure est composée de fils métalliques parallèles extrêmement fins ayant une permittivité négative Cette structure est décrite sur la figure (23)

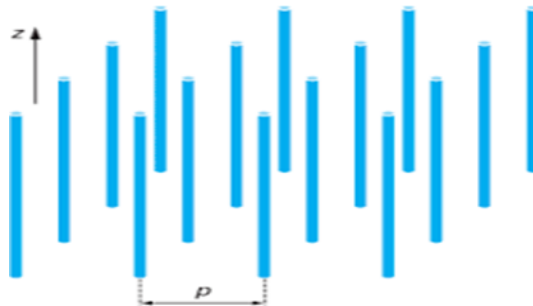


Figure 23 : Structure fils métalliques fins présentant ϵ négative et μ positive pour \parallel .[3]

La permittivité des fils métalliques soumis au champ électrique E parallèle à l'axe des fils (z) est calculée suivant L'équation (II .1) [24]

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \quad (II.1)$$

Avec :

ω_{pe} : la pulsation de plasma électrique des fils métalliques.

ω : la pulsation d'excitation de la source.

Ensuite, Pendry [5] a proposé un ensemble de résonateurs en anneaux fendus (SRR) dont leur disposition particulière permet d'induire une perméabilité négative, comme le montre la Figure II.5.

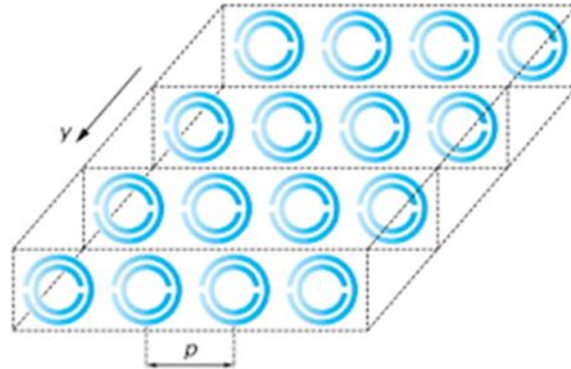


Figure 24 : Structure résonateur en anneau fendu présentant positive/ négative quand H

La perméabilité de cette structure est calculée suivant l'équation (II.2) :

$$\mu(\omega) = \frac{F\omega^2}{\omega^2 + \omega_{om} + j\omega\tau} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

F : Un facteur de remplissage ou de force de résonance, qui indique l'intensité de la résonance magnétique dans le métamatériau.

ω : La fréquence angulaire de l'onde incidente.

ω_{om} : la pulsation de résonance magnétique ajustable dans la gamme des GHz.

τ : le facteur d'atténuation due aux pertes du métal.

À la fin, pour obtenir un matériau à indice de réfraction négatif, les deux structures ont été associées, donnant naissance à la première structure Meta matériaux pouvant être « doublement négative », représentée sur la figure 25 [7]. Cependant, il a fallu attendre les années 2000 pour commencer l'élaboration des matériaux à « main gauche » ainsi structurés. Le premier prototype a été expérimentalement testé avec succès par l'équipe de D.R. Smith [5].



Figure 25 : Première structure de méta matériaux, constituée de fils fins (Thin Wires ‘TWs) et des RAFA [7].

II.2.2 Les cristaux photoniques

II.2.2.1 Historique

Durant de nombreuses années, les chercheurs ont mis l'accent sur la maîtrise de la transmission de la lumière afin de substituer la communication électrique traditionnelle. Rayleigh (1887)[25], Ohtaka (1979)[26], Yablonovitch et John (1987)[27] ont réalisé et caractérisé une nouvelle génération de matériau connue sous le nom de cristaux photoniques. Ces matériaux sont caractérisés par une constante diélectrique modulée de façon périodique. La périodicité peut être unidimensionnelle 1D (miroir de Bragg), bidimensionnelle 2D ou encore tridimensionnelle 3D comme montré sur la figure (26).

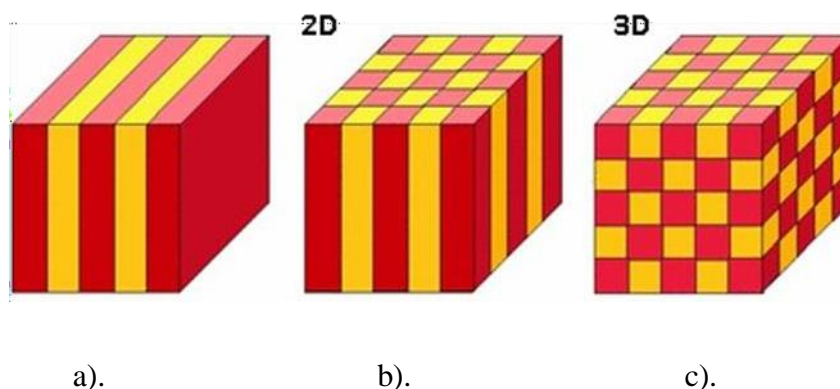


Figure 26 : Représentation schématique de cristaux photonique : a).omnidirectionnels (1D), b). Bidimensionnels (2D), c). Tridimensionnels (3D) [27].

Néanmoins, il existe des cristaux photoniques à l'état naturel. La Figure (II.8) présente une illustration au microscope électronique d'une opale naturelle composée d'un réseau de billes de silice quasi-périodique.

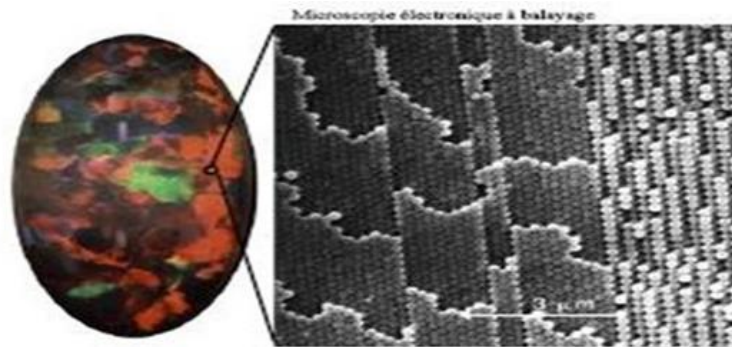


Figure 27 : Image au microscope électronique d'une opale naturelle constituée d'un réseau Quasi-périodique de billes de silice.

II.2.2.2 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des cristaux photoniques repose sur leur agencement périodique qui altère la propagation de la lumière. Ces cristaux sont fabriqués en empilant des couches de matériaux diélectriques ou métalliques ayant des indices de réfraction différents. Lorsque la lumière traverse un cristal photonique, elle interagit avec sa structure périodique, engendrant des phénomènes de diffraction et d'interférences, constructives ou destructives.

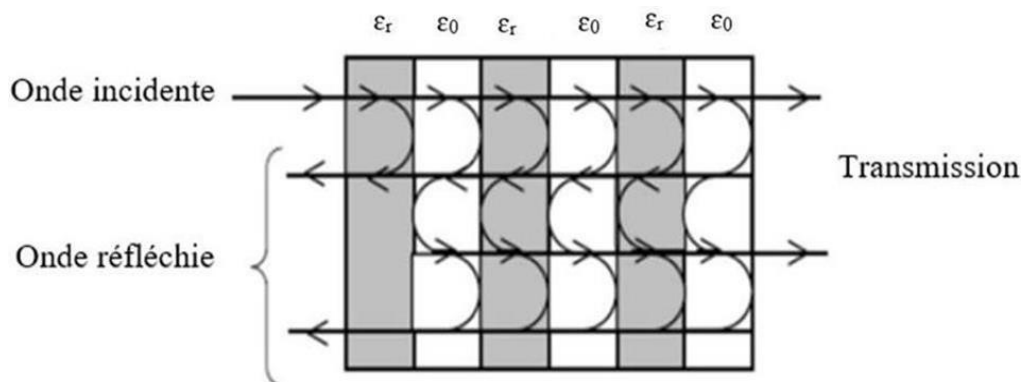


Figure 28 : Représentation schématique de l'interférence des ondes réfléchies à l'intérieur d'un réseau de Bragg 1D [27].

Ces interactions conduisent à la création d'une Bande Interdite Electromagnétique (BIE), bloquant ainsi la propagation de la lumière. Sur la figure (29) est représenté le diagramme de bande d'un cristal photonique 2D à maille carrée.

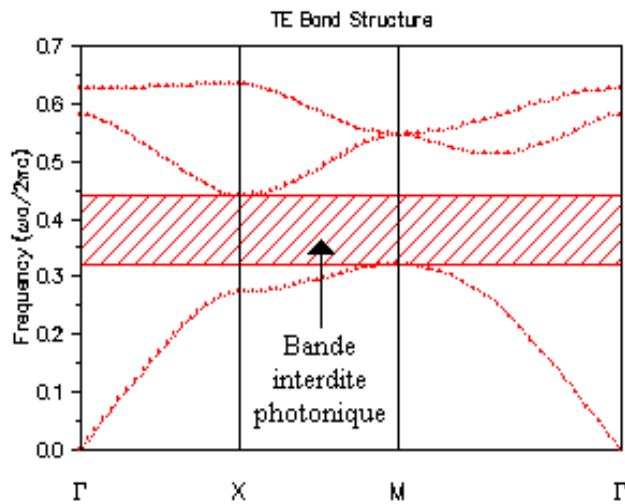


Figure 29 : Diagramme de bande d'un cristal photonique 2D à maille carrée (Polarisation TE).

II.2.3 Les métasurfaces

Les méta-surfaces, telles que les Surfaces Sélectives en Fréquence (FSS) [28], les Surfaces à Haute Impédance (HIS) [29], et les méta-surfaces [30], sont des matériaux métallo-dielectriques qui ont attiré une attention considérable dans le domaine de l'électromagnétisme ces dernières années grâce à leur capacité à manipuler les ondes électromagnétiques. Ces surfaces, constituées de structures périodiques de tailles inférieures à la longueur d'onde, possèdent des propriétés électromagnétiques spécifiques. Les FSS peuvent filtrer les ondes électromagnétiques à des fréquences déterminées, les HIS ont le pouvoir de réduire les réflexions et le bruit électromagnétique, tandis que les méta-surfaces permettent de contrôler la phase, l'amplitude ainsi que la polarisation des ondes électromagnétiques. Par conséquent, comprendre les caractéristiques et le mode de fonctionnement de ces surfaces artificielles nous permet d'exploiter leur potentiel dans divers domaines de l'ingénierie électromagnétique.

II.2.3.1 Les surfaces sélectives en fréquence

a) Historique

Les FSS sont des structures planaires ou quasi-planaires avec une ou deux périodicités longitudinales. Ces structures sont créées par la répétition d'un motif métallique, généralement imprimé sur un substrat diélectrique, comme illustré à la figure 30. Ils peuvent se présenter sous diverses formes et types, dont le choix dépend des caractéristiques requises pour l'application visée. Elles agissent comme un filtre métallique, avec des critères de conception basés sur la fréquence de résonance, la sensibilité à l'angle d'incidence de l'onde électromagnétique et à la bande passante souhaitée.

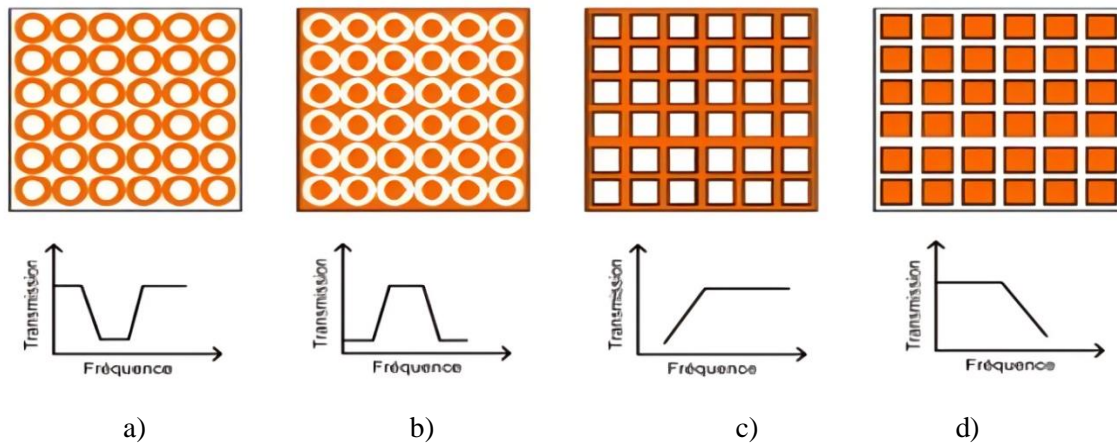


Figure 30 : Les Différents modèles FSS. a) FSS coupe-bande b) FSS passe-bande c) FSS passe-haut d) FSS passe-bas [31].

b) Principe de fonctionnement des FSS

Les FSS exploitent les propriétés de résonance de leur structure périodique pour sélectionner ou rejeter des fréquences spécifiques d'ondes électromagnétiques. Lorsqu'une onde électromagnétique incidente rencontre une FSS, certaines fréquences spécifiques des ondes sont résonnées par les motifs périodiques. Ces fréquences sont soit transmises, soit réfléchies, tandis que les autres fréquences passent sans être affectées. Aussi, peuvent agir comme des filtres passe-bande ou coupe-bande en fonction de la conception des motifs. Par exemple, une FSS peut être conçue pour permettre uniquement le passage des ondes à une certaine gamme de fréquences tout en bloquant les autres. Grâce à cette capacité de filtrage, les FSS sont utilisées dans diverses applications, telles que les radars, les télécommunications, les antennes et les dispositifs de protection contre les interférences électromagnétiques.

II.2.3.2 Les surfaces à hautes impédances

a) Historique

Les surfaces à haute impédance (HIS), conçues par Siesvenpiper [27] en 1999, sont constituées d'une distribution d'éléments localisés à base de circuits en parallèle. Ces structures de type "champignon" sont périodiques et se composent de patches métalliques imprimés sur un substrat diélectrique, reliés au plan de masse par des vias métalliques, comme illustré dans la figure 31.

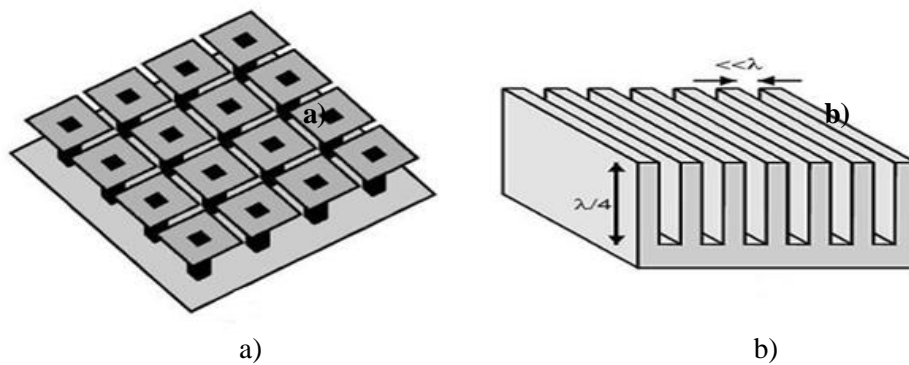


Figure 31 : a). Surface à haute impédance type champignon, b). Surface corruguée.

Ces surfaces ont été utilisées dans divers travaux [31], [32], [33.] pour éliminer les ondes de surface produites par les antennes patch, ce qui a amélioré significativement leur efficacité.

b) Principe de fonctionnement des HIS

Les HIS exploitent leur structure périodique pour créer une impédance de surface élevée à des fréquences spécifiques ce qui permet de réduire ou même supprimer les courants de surface indésirables. À des fréquences spécifiques, la structure de la HIS crée une condition de résonance où l'impédance de surface est très élevée. Cela signifie que la surface présente une forte résistance aux courants induits par les ondes électromagnétiques. Par ailleurs, grâce à leur impédance élevée, les ondes électromagnétiques incidentes sont réfléchies avec un déphasage proche de 180 degrés par rapport aux ondes réfléchies par un conducteur parfait. Cela permet donc de réduire les réflexions de manière significative, minimisant ainsi les interférences et le bruit électromagnétique. En exploitant ces propriétés, les HIS peuvent être utilisés dans diverses applications telles que les antennes à faible profil, les radars furtifs, et les dispositifs de réduction du bruit électromagnétique, où il est crucial de contrôler les réflexions et d'améliorer la performance des systèmes électromagnétiques.

II.3 Applications des matériaux artificiels en microondes

Les matériaux artificiels ont révolutionné le domaine des micro-ondes en offrant un éventail sans précédent de possibilités pour la manipulation et le contrôle des ondes électromagnétiques. Leurs propriétés uniques et leur flexibilité de conception ont ouvert la voie à une nouvelle génération de dispositifs micro-ondes plus performants, compacts et intégrés, avec des applications dans des domaines tels que les communications sans fil, les radars, l'imagerie et l'optique micro-onde. Ils ont été utilisés pour l'amélioration de la directivité [32], la bande passante [25], pour réduire le niveau des lobes secondaires [34], ou

même pour dépointer les faisceaux rayonnée par quelque famille d'antenne[35],

II.3.1 Amélioration de la directivité

Les matériaux artificiels jouent un rôle principal dans l'amélioration des performances des antennes, notamment en ce qui concerne leur directivité, comme illustré dans la figure (II.13). Pour atteindre cet objectif, on utilise des surfaces à haute impédance (HIS).

Dans [32], une antenne patch opérant à 60 GHz a été entourée d'un réseau de cellules périodiques à haute impédance, comme montré sur la figure 32. L'intégration de ces surfaces à haute impédance (HIS) en tant que substrat a permis de réduire la propagation des ondes de surface. Grâce à ces HIS, la directivité de l'antenne est passée de 7 dBi à 9,63 dBi.

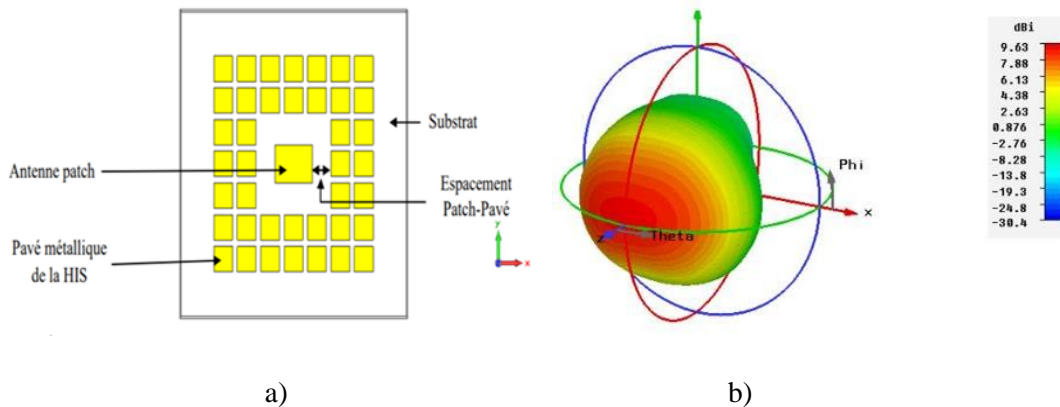


Figure 32 : a).Antenne patch avec un substrat HIS, b). Diagramme de rayonnement de l'antenne résultante [32].

Dans [34], un réseau de 4 cellules de Résonateurs en Anneau Fendu carrés (2x2) (RAF) a été utilisé. Ces cellules unitaires, fabriquées en cuivre, sont placées sur un substrat ayant une permittivité ϵ_r de 2,2 et une tangente de pertes $\tan\delta$ de 0,0009. La directivité de l'antenne sans ce réseau était de 6,57 dBi, et après l'ajout des cellules, elle est passée à 7,44 dBi.

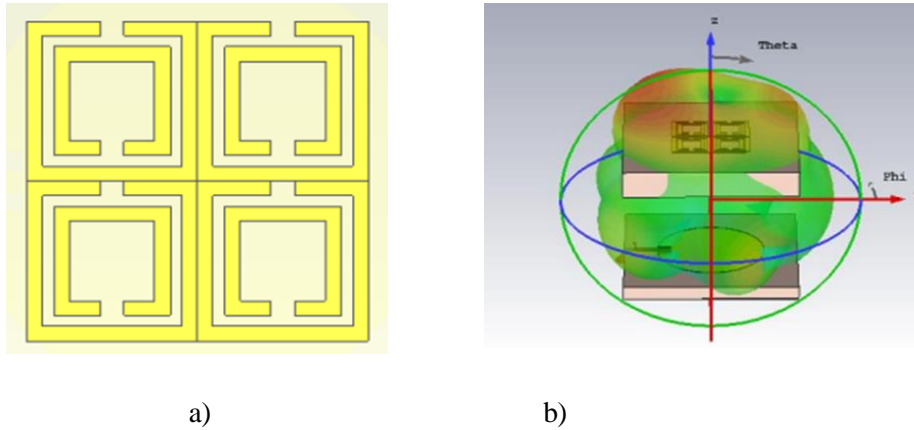


Figure 33 : a) Un réseau de cellules RAF carrés. b) Diagrammes de rayonnement de l'antenne [41].

II.3.2 Amélioration de la bande passante

Dans [25], des méta matériaux ont été utilisés pour bloquer certaines bandes de fréquences avec des propriétés inhabituelles. Lorsque les ondes électromagnétiques se propagent le long de la structure, la polarisation du champ électrique reste alignée avec l'axe, tandis que la polarisation du champ magnétique reste alignée avec un autre axe. Grâce à cette caractéristique, ces structures réfléchissent parfaitement les ondes électromagnétiques. Ainsi, la bande passante de l'antenne est passée de 3.7% à 13.2 %.

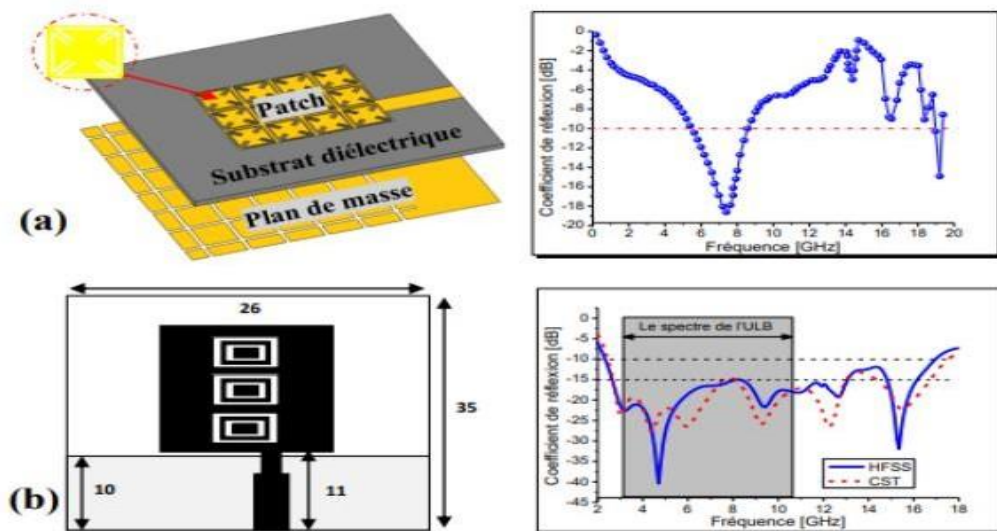


Figure 34 : (a) antenne patch à large bande et son S11, [25].

Par ailleurs, dans [42], des FSS ont été utilisés en ... pour augmenter la bande passante en rayonnement à -3dB de l'antenne. Ainsi, la bande passante a ainsi été étendue, passant de 3.7% à 13.2%.

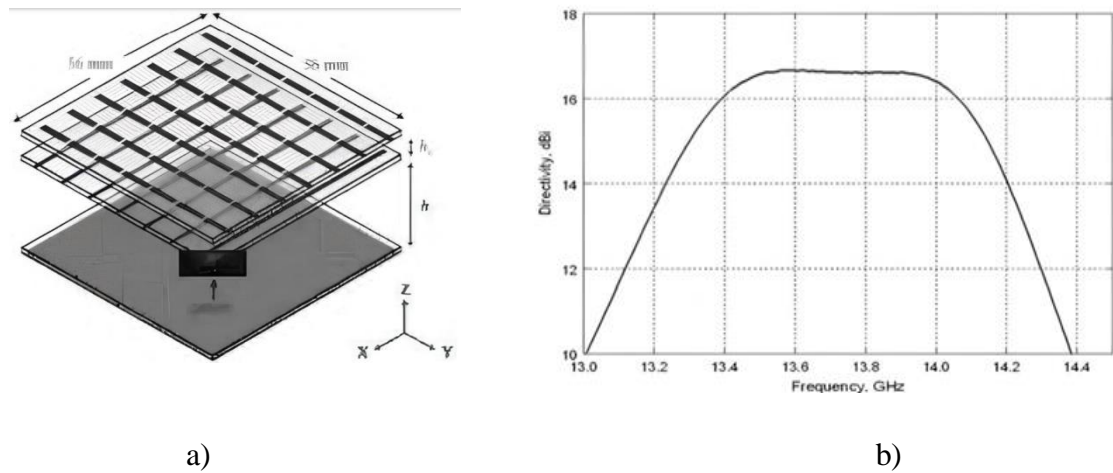


Figure 35 : (a) antenne patch à large bande et son (S11) [35].

II.3.3 Dépointage de faisceau

Les matériaux artificiels jouent également un rôle crucial dans le processus de dépointage des faisceaux. Dans [37], le rayonnement d'une antenne patch opérant à environ 10 GHz a été dépointée grâce à l'utilisation de différents PRS aperiodiques intégrant des méta-surfaces permettant la correction de phase. Ainsi, un angle de dépointage de 57° a été enregistré.

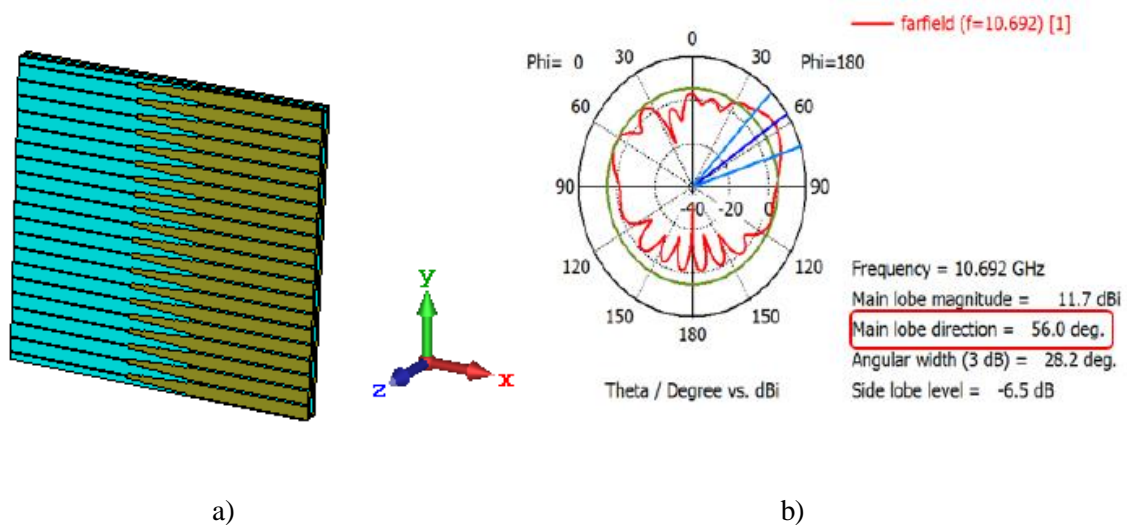


Figure 36 : Antennes à dépointage de faisceau. a). Structure de l'antenne à gradient de phase, b) Diagramme de rayonnement de l'antenne [37].

II.4 Avantages et limites des matériaux artificielles

Les avantages et limites de différentes matériaux artificielles abordées précédemment sont représentés dans le tableau 2 [37][38][39][40].

Tableau 2: les avantages et limites des matériaux artificielles.

Technologie	Avantages	Limites
MétaMaTériaux (MMT)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Propriétés électromagnétiques uniques (indice de réfraction négatif) ✓ Contrôle précis des ondes (phase, amplitude et direction) ✓ Applications innovantes (dispositifs d'invisibilité, super lentilles) ✓ Amélioration des performances des dispositifs micro-ondes. 	<ul style="list-style-type: none"> x. Fabrication complexe et coûteuse. x. Sensibilité aux défauts de fabrication x. Pertes et dispersion limitant les performances (aux fréquences élevées) x. Plage de fréquences limitée.
Cristaux Photoniques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ . Contrôle précis de la propagation de la lumière. ✓ . Applications en microonde et en optique (en optoélectronique et en photonique intégrée) 	<ul style="list-style-type: none"> x. Fabrication complexe et coûteuse. x. Sensibilité aux défauts de fabrication.
Surfaces Sélectives en Fréquence (FSS)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Filtrage sélectif des fréquences. ✓ Flexibilité de conception ✓ Applications diverses. ✓ Amélioration des performances des antennes. ✓ Technologie mure. 	<ul style="list-style-type: none"> x. Performances limitées à certaines bandes de fréquences. x. Sensibilité aux angles d'incidence. x. Fabrication complexe. x. Sensible aux conditions environnementales. x. Pertes et dispersion à certaines fréquences.
Surfaces à Hautes Impédances (HIS)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Réduction des réflexions ✓ Suppression des courants de surface ✓ Amélioration des performances d'antennes. ✓ Large gamme de conception 	<ul style="list-style-type: none"> x. Efficacité limitée a des fréquences spécifiques. x. Complexité de fabrication x. Sensible à l'angle d'incidence. x. Sensible aux conditions environnementales. x. Pertes et dispersion aux hautes fréquences.

II.5 Conclusion

Il a été démontré dans ce chapitre que l'utilisation des matériaux artificiels en micro-ondes offre de nouvelles opportunités pour la conception et l'amélioration des performances de rayonnement des antennes. Grâce aux matériaux artificiels, il est possible de créer des antennes compactes avec des propriétés électromagnétiques uniques. Dans le prochain chapitre, nous exploiterons ces propriétés intéressantes pour concevoir une antenne directive large bande.

Chapitre III :
Conception et simulation
d'antennes directives à large
bande

III.1 Introduction

Dans ce troisième chapitre, une antenne directive large bande opérant sur la bande de fréquence [12-14]GHz est proposée. Cette dernière est obtenue en ajoutant deux couches de superstrat au-dessus de l'antenne source (de référence) : une homogène appelée PRS (Surface Partiellement Réfléchissante) et une seconde inhomogène à Metasurfaces. Les performances de l'antenne finale obtenue sont enfin comparés à ceux de l'antenne référence aux antennes de la littérature.

III.2 Conception d'une antenne directive large bande à méta matériaux

III.2.1 Cahier des charges

Les antennes directive large bande à méta matériaux qu'on va concevoir et simuler sous CST doivent répondre au cahier des charges bien précis préalablement tracé dont les caractéristiques sont données dans le tableau 3 :

Tableau 3 :Cahier des charges.

	Paramètre	Valeur
Performances	Fréquence	Bande X et Bande Ku Au tour de 12 GHz
	Directivité	≥ 20 dBi
	Bande passante en adaptation	Large bande
	Bande passante en rayonnement	$> 15..%$
	Niveau des lobes secondaires	Le plus bas possible
	Structure de l'antenne	Antenne source (référence)
Alimentation		Guide d'onde W75(19x9)
Métallisation		PEC (perfect électrique conducteur)
Diélectrique		$\epsilon_r=4.5$ avec $\text{tang}\delta=0.0042$

III.2.2 Choix de l'outil de la simulation

Le logiciel CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS) est utilisé pour toutes les conceptions et simulations présentées dans ce travail. Il est fréquemment employé dans l'industrie et la recherche pour la conception et l'analyse des composants et des systèmes micro- ondes. Créé par la société Computer Simulation Technologie (CST), ce logiciel propose une solution complète pour la modélisation en 3D et la simulation des appareils et des circuits électroniques. Les ingénieurs et les chercheurs peuvent ainsi anticiper et mesurer avec précision le comportement des structures micro-ondes, des antennes, des filtres, des guides d'ondes et d'autres éléments dans une large plage de

fréquences. CST MWS offre également une optimisation grâce à ses compétences avancées en matière de modélisation, de maillage, de résolution numérique et de post-traitement. Les performances des dispositifs sont rapides et efficaces, ce qui permet de diminuer le temps et les coûts associés à la phase de développement. En bref, CST MWS représente un outil performant pour l'analyse et la conception de systèmes micro-ondes, offrant ainsi une simulation précise et fiable aux experts de l'industrie et de la recherche.

III.2.3 Conception et simulation de l'antenne de référence

III.2.3.1 Antenne source

Tout d'abord, nous allons commencer par concevoir et simuler l'antenne référence. Cette dernière est constituée d'une antenne source à fente imprimée sur un plan de masse de dimensions latérales $4\lambda \times 4\lambda$, le tout alimenté par un guide d'onde rectangulaire WR75 comme montré sur la figure III.1, avec $f=12\text{GHz}$.

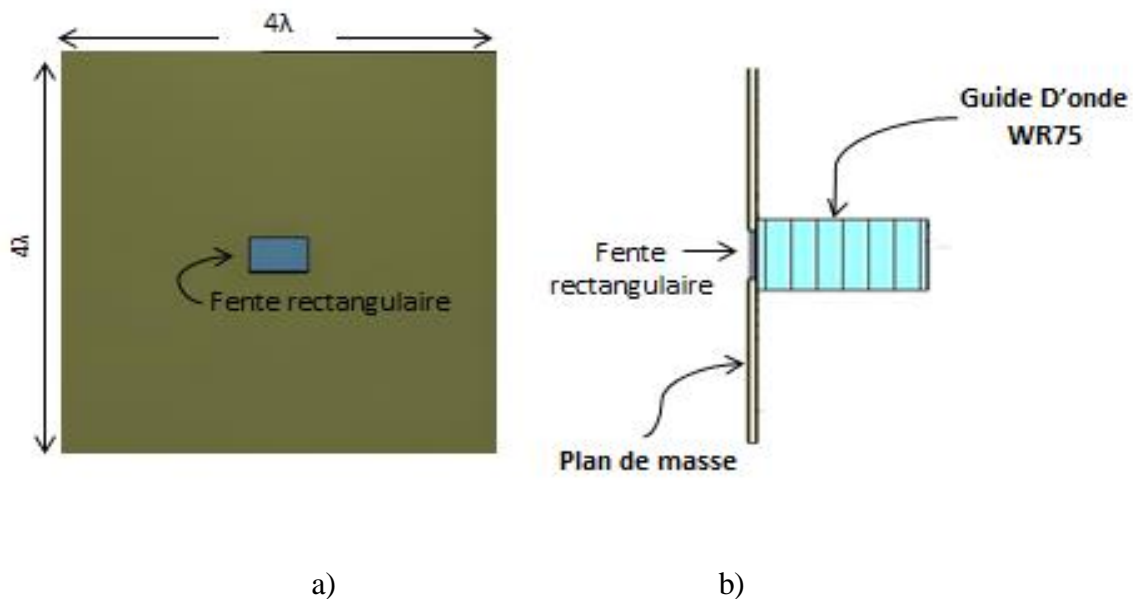


Figure 37 : Antenne fente source conçue sur CST, a). Vue de haut b). Vue de profil
Les résultats de simulation de cette antenne sont représentés sur les figures 38, 39 et résumés dans le tableau 4.

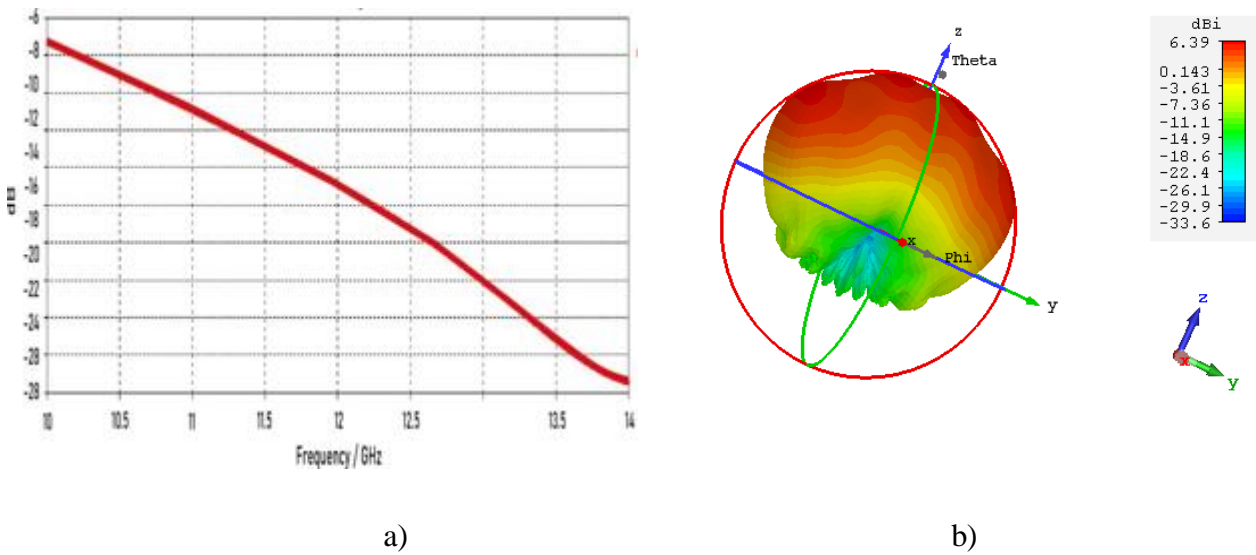


Figure 38 : Résultats de simulation de l'antenne source a) Niveau d'adaptation S11, b).Diagramme de rayonnement 3D à f=12GHz.

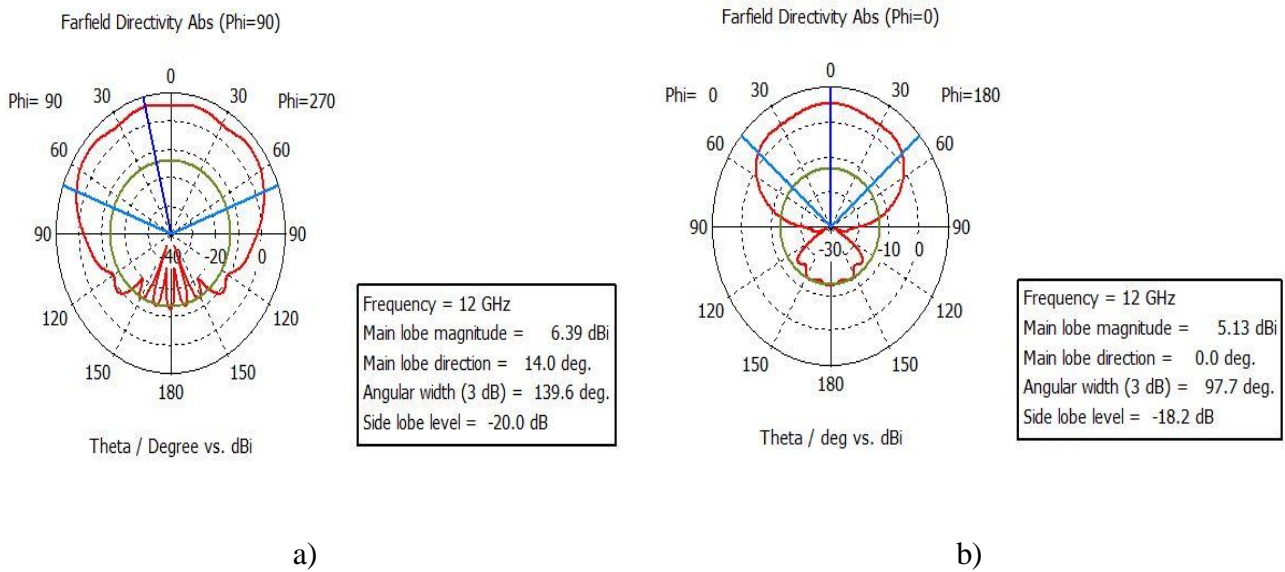


Figure 39 : Diagramme de rayonnement de l'antenne source à f=12GHz a) Plan phi=0°, b). Plan phi=90

Tableau 4: Résultats de simulation de l'antenne fente à f=12Gz.

Antennes	S11 (dB)	Directivité (dBi)	Gain (dB)	SLL (dB)	
				$\varphi=0^\circ$	$\varphi=90^\circ$
Antenne fente (Source)	-14.86	6.7	6.66	-18.2°	-20°

L'antenne source présente une très large bande mais ça directivité de l'ordre de 6.39 dBi reste très faible.

3.2.3.2 Ajout de PRS homogène diélectrique

Pour améliorer la directivité de l'antenne source on ajoute à une distance $H=\lambda/2$ au-dessus de l'antenne source un PRS homogène de dimensions latérales $4\lambda \times 4\lambda$, d'épaisseur $h=3.157$, substrat Rogers TMM4, avec une permittivité relative de $\epsilon_r=4,7$, avec $\tan\delta = 0,002$. La structure de l'antenne obtenue est représentée sur la figure 40.

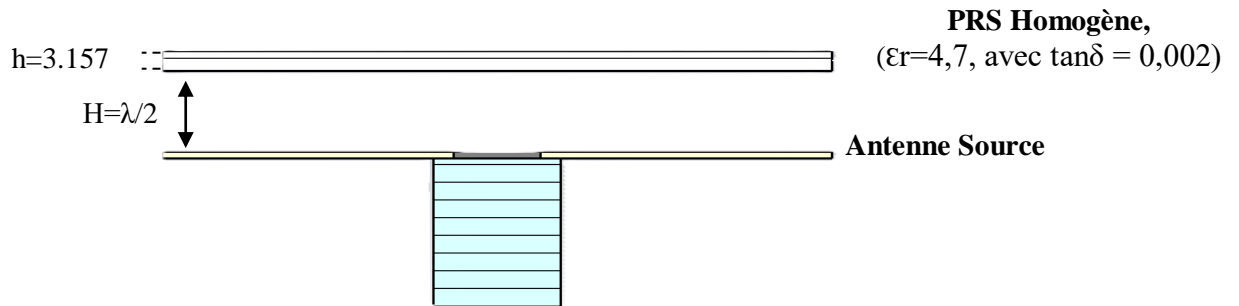


Figure 40 : Antenne fente avec PRS simulée sur CST

Les résultats de simulation de l'antenne sous CST sont représentés sur la figure 41 et la figure 42, 43 et le tableau 5.

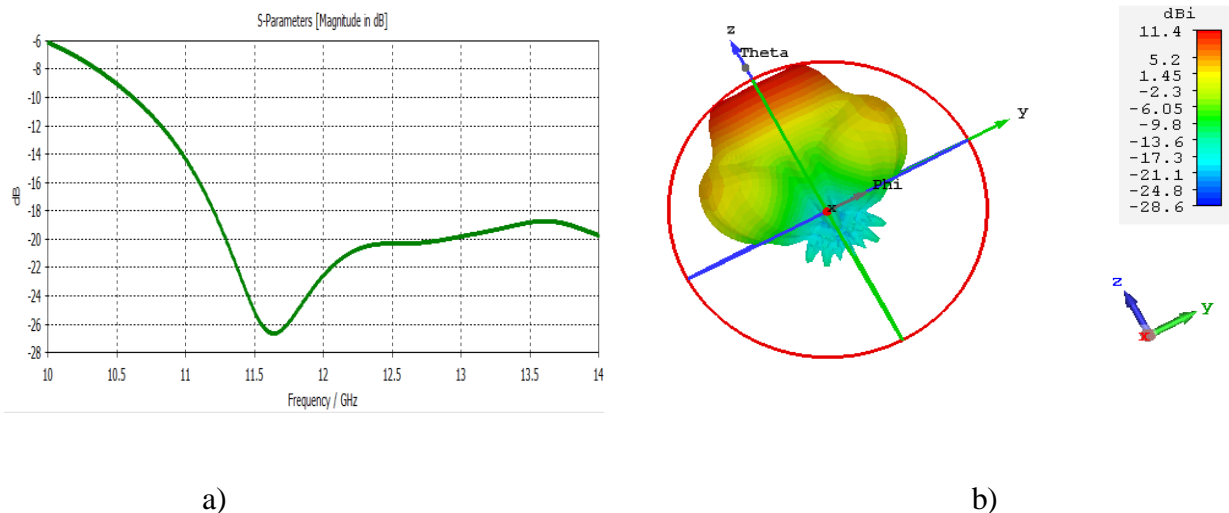


Figure 41 : Résultats de simulation de l'antenne fente avec PRS a) S11, b). Diagramme de rayonnement en 3D à $f=12$ GHz.

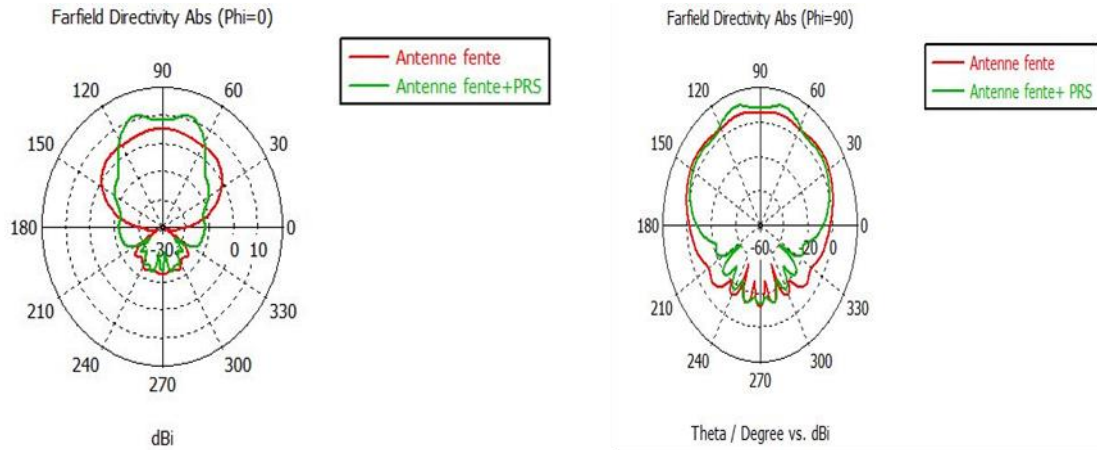


Figure 42: Digramme de rayonnement de l'antenne fente et l'antenne fente+PRS à $f=12$ GHz ; a) plan $\phi=0^\circ$; b) plan $\phi=90^\circ$.

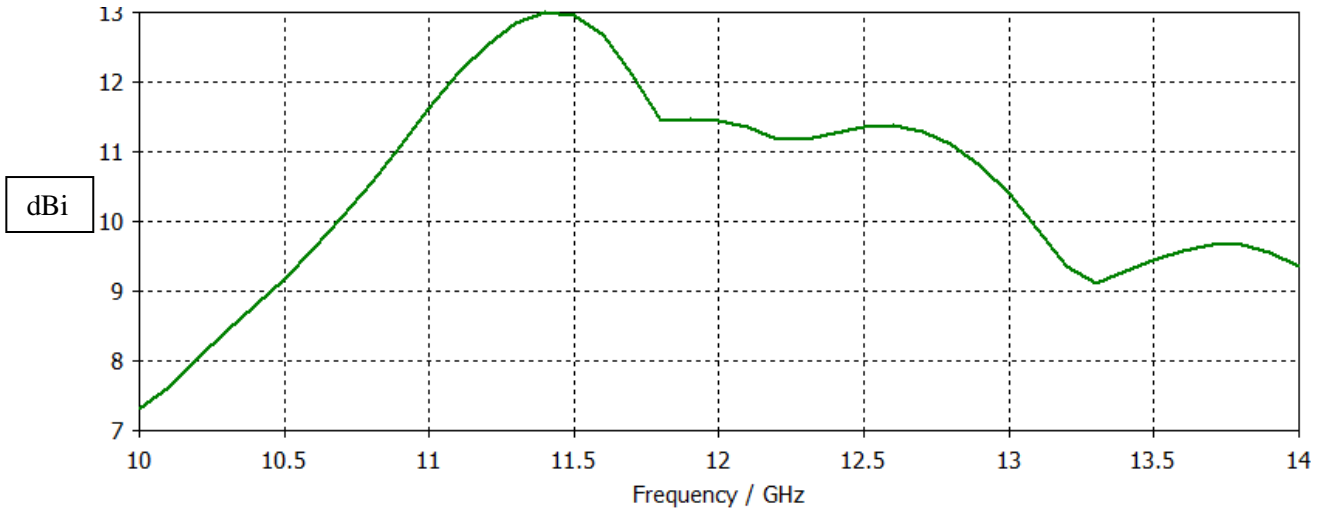


Figure 43: Directivité de l'antenne fente+PRS en fonction de la fréquence .

Tableau 5: Résultats de simulation de l'antenne de référence à $f=12$ GHz.

Antenne	S11 (dB)	Directivité (dBi)	Gain (dB)	SLL (dB)		Bp à -3dB (%)
				$\phi=0^\circ$	$\phi=90^\circ$	
Antenne fente (Source)	-14.86	6.7	6.66	-18.2	-20	20.96%
Antenne avec PRS homogène	-22.58	11.4	11.4	-23.4	-7.2	

Les résultats de simulation obtenus montrent que le l'ajout du PRS homogène a augmenté la directivité de l'antenne source. Elle est passée de 6.34dBi à 11.4dBi en présence du PRS, soit le double, aussi la bande passante de l'antenne à -3dB est passée à 20.96%. Néanmoins, l'ajout du PRS a augmenté le niveau des lobes secondaires de l'antenne, il est passé de -18dB à -7.2 dB.

3.2.3.3 Ajout du PCM a méta surfaces

Pour améliorer d'avantage les performances de l'antenne fente avec PRS autrement appelée antenne de référence, on a tracé sous CST la répartition du le champ en amplitude et en phase a la sortie de l'antenne. Le résultat obtenu est représenté sur la figure 44 ci-dessous :

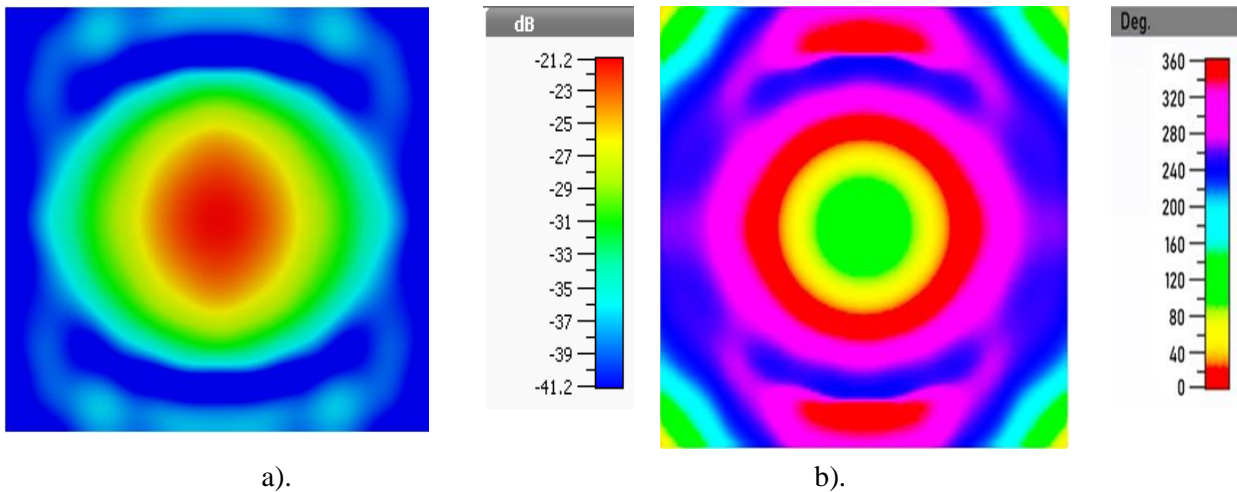


Figure 44 : PCM a correction de phase . Champ électrique E de l'ouverture rayonnante de l'antenne tracé a $f=12\text{GHz}$. a) Amplitude du champ, b). Phase du champ.

Le tracé du champ a la sortie de l'antenne montre une répartition non uniforme de l'amplitude et de la phase du champ sur toute l'ouverture rayonnante de l'antenne. Néanmoins pour de meilleure performances en rayonnement, le champ a la sortie de l'antenne doit être stable, soit homogène [44]. Pour satisfaire cette condition on va procéder a la conception d'une Surface a Correction de Phase a metasurface (PCM) qu'on va déposer a la sortie de l'antenne de référence.

Pour commencer la conception du PCM , la surface au-dessus du PRS a été divisée sous forme de gille 2D de 12x12 cellules comme montré sur la figure 45. Ensuite, la phase du champ électrique a été enregistrée à l'intérieur de chaque cellule, celle phase est notée Θ_i

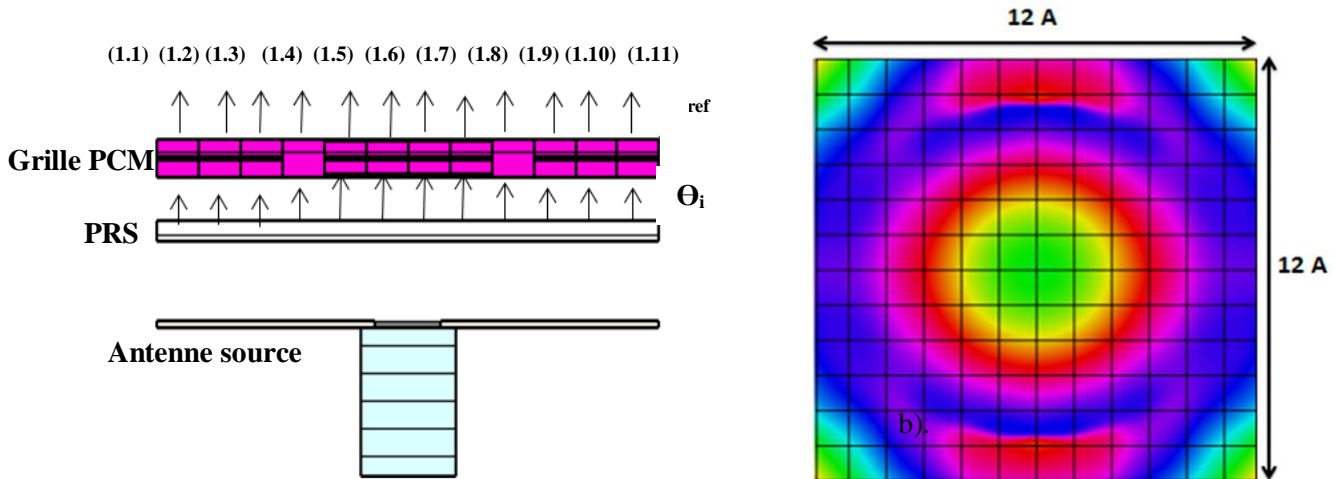


Figure 45 : Grille 2D tracé à la sortie de l'antenne référence. a) plan de coupe de l'antenne, b). Vue de haut de la grille.

Pour avoir une phase homogène a la sortie du PCM, une phase de référence, notée θ_{ref} , est définie et est fixée à 200° . Le retard de phase nécessaire pour corriger la phase a la sortie du PCM est calculé pour chaque cellule suivant l'équation (III.1).

$$\theta_{retard} = \theta_{ref} - \theta_i \quad (III.1)$$

Avec :

θ_{retard} : le retard requis par le PCM pour corriger la répartition de phase en sortie de l'antenne.

Les résultats obtenus sont représenté sur le tableau 6.

Tableau 6 : phase requise, phase a l'entrée et phase a la sortie du PCM.

Cellule	θ_i	θ_{ref}	θ_{retard}
(1.1)	117.2°	200°	91.57°
(1.2)	87.03°		122°
(1.3)	37.74°		162.18°
(1.4)	-14.72°		215.12°
(1.5)	-62.08°		261.16°
(1.6)	-93.57°		263.5°

III.2. 4 Conception du PCM a correction de phase

Pour concevoir la surface à correction de phase trois types de cellule unitaire de type métasurface ont été conçues et simulées sur CST. Les cellules trois cellules de dimensions $6.5 \times 6.5 \times 8.33 \text{ mm}^3$ sont représentées sur la figure 46. Le diélectrique constituant chaque cellule a une permittivité relative $\epsilon_r = 4,5$ et une tangente de perte de $\text{tang}\delta = 0,0042$.

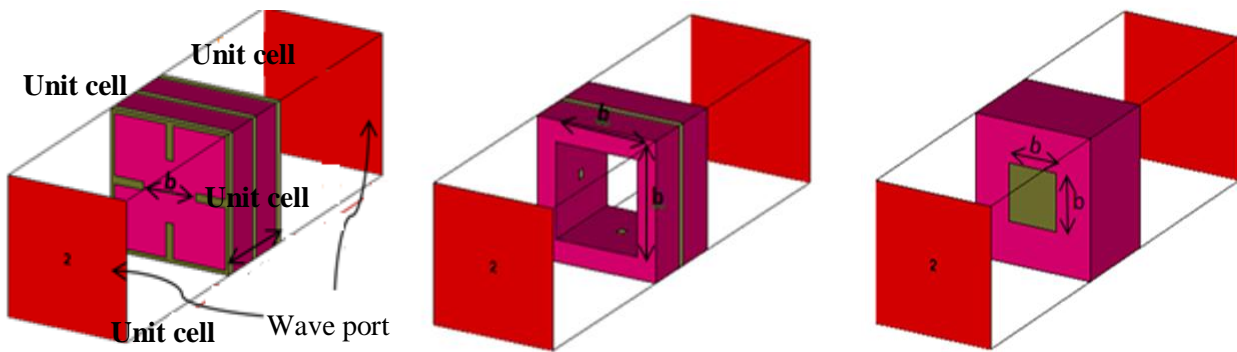


Figure 46: Trois types de cellules unitaires proposées .a) type1, b). type2, c) type3.

Le coefficient de transmission S_{21} est tracé en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la dimension b . Le résultat obtenu pour chaque type de cellule 1, 2 ou 3 est représenté sur les figures 47, 48 et 49 respectivement.

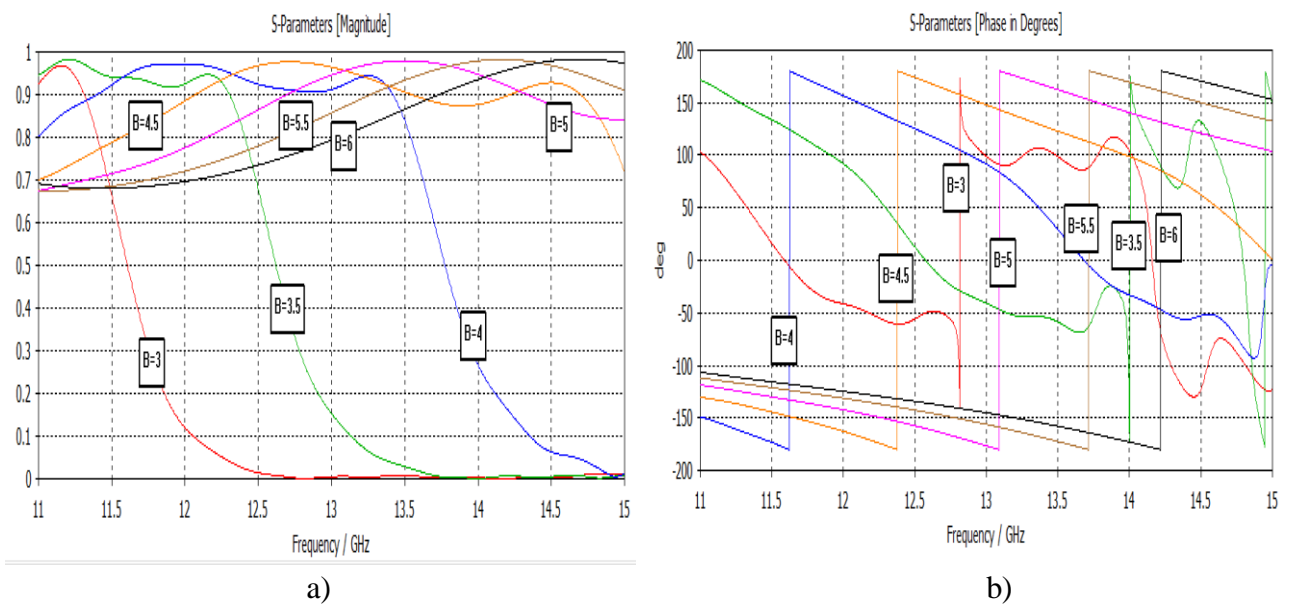


Figure 47 : S_{21} de la cellule type 1. a). Amplitude, b). Phase.

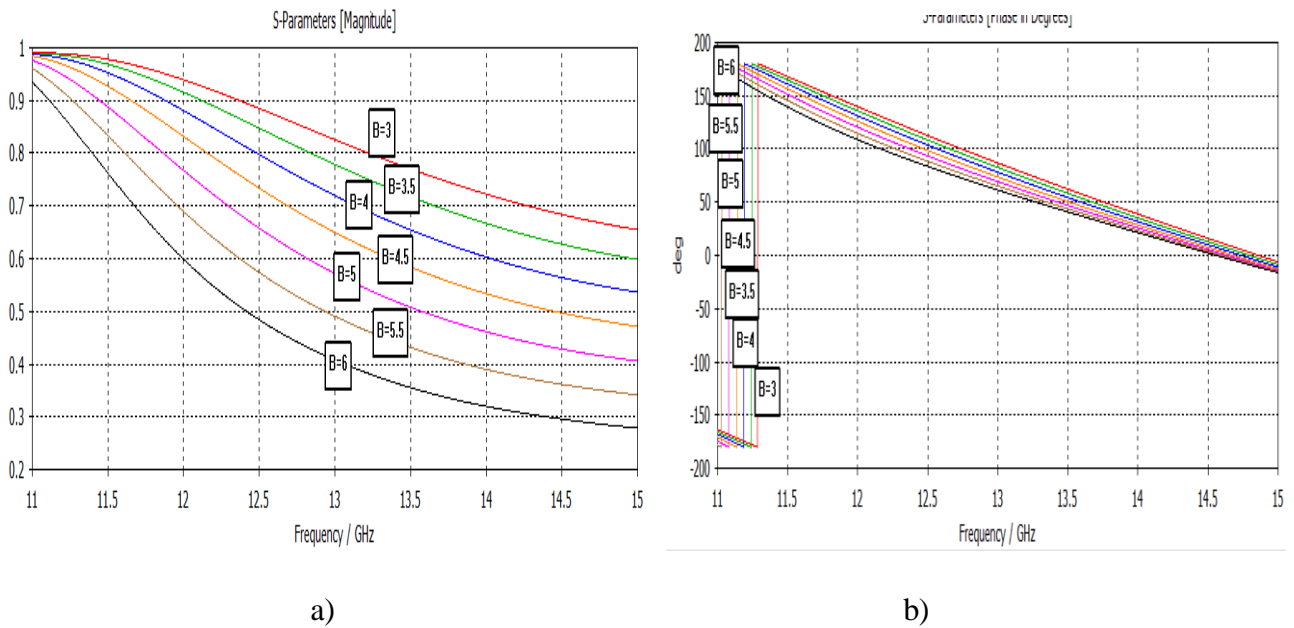


Figure 48: Coefficient de transmission S_{21} de la cellule type 2. a) Amplitude, b) Phase

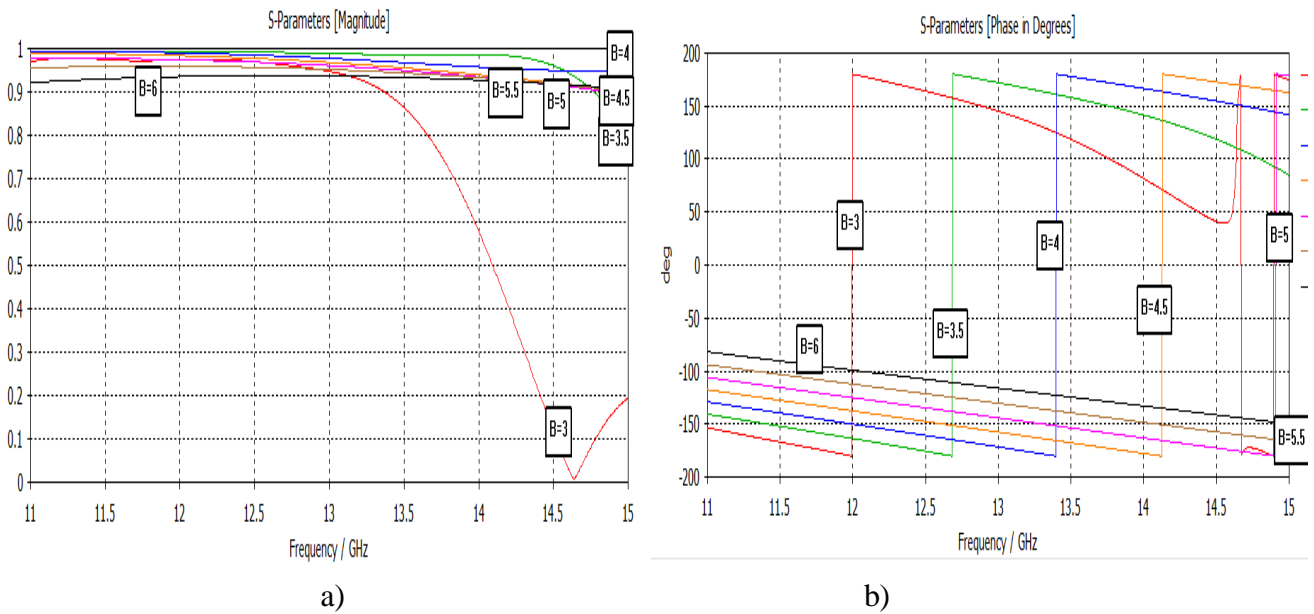


Figure 49: Coefficient de transmission S_{21} de la cellule type 3. a) Amplitude, b) Phase.

Le type de cellule à mettre en chaque point de la grille ainsi que la structure finale de l'antenne avec PCM obtenu est représentée sur la figure 50.

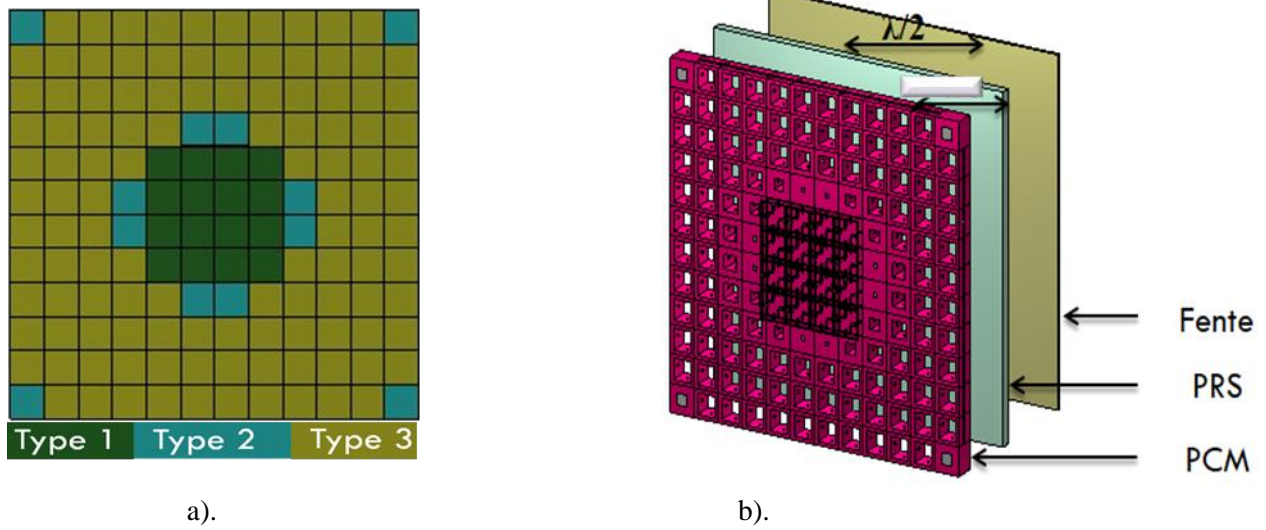


Figure 50: a) Schéma bloc du PCM, b) Structure finale de l'antenne avec PCM

La phase du champ électrique à la sortie de l'antenne avec PCM est comparée à celle à la sortie de l'antenne en absence du PCM sur la figure 51 :

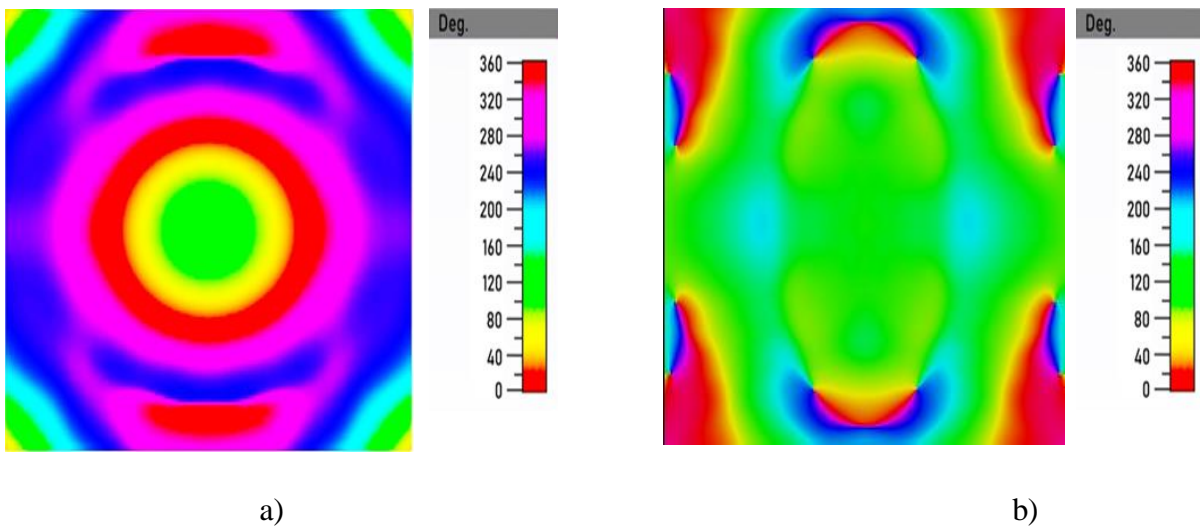


Figure 51: la distribution de phase en 2D a) à l'entrée de PCM. b) à la sortie de PCM.

On peut remarquer de la figure 51 que l'ajout du PCM a correction de phase a corrigé la répartition de la phase à la sortie de l'antenne. Elle est devenue plus uniforme. Par conséquent, il faut s'attendre à une amélioration des performances.

Les résultats de simulation de l'antenne en présence du PCM sont comparé à ceux de l'antenne finale sur les figures 52, 53, 54 et 55 sont résumés dans le tableau 6.

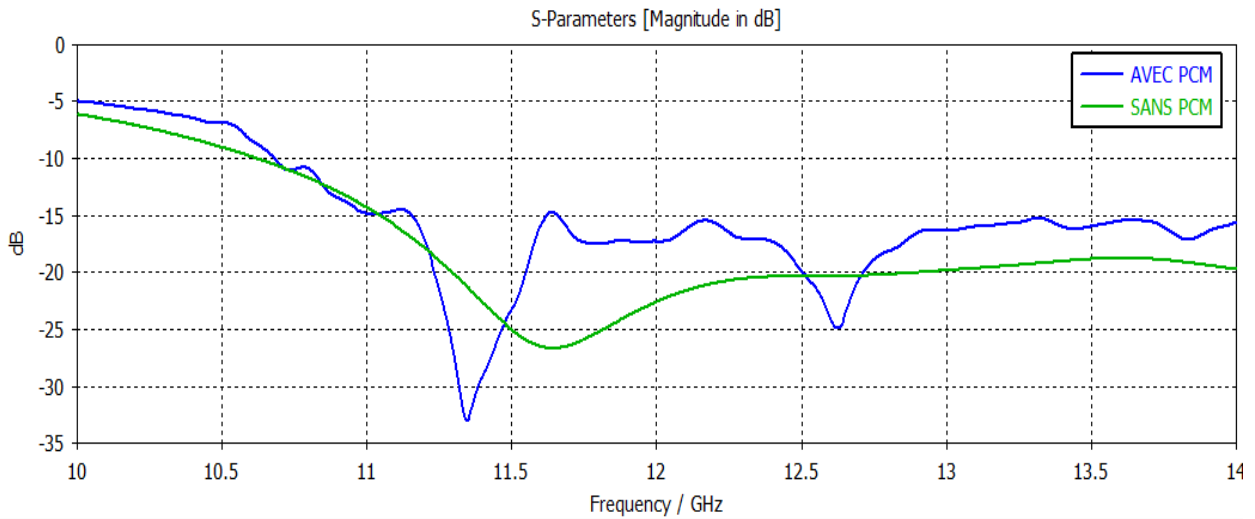


Figure 52: Niveau d'adaptation S11 des antennes

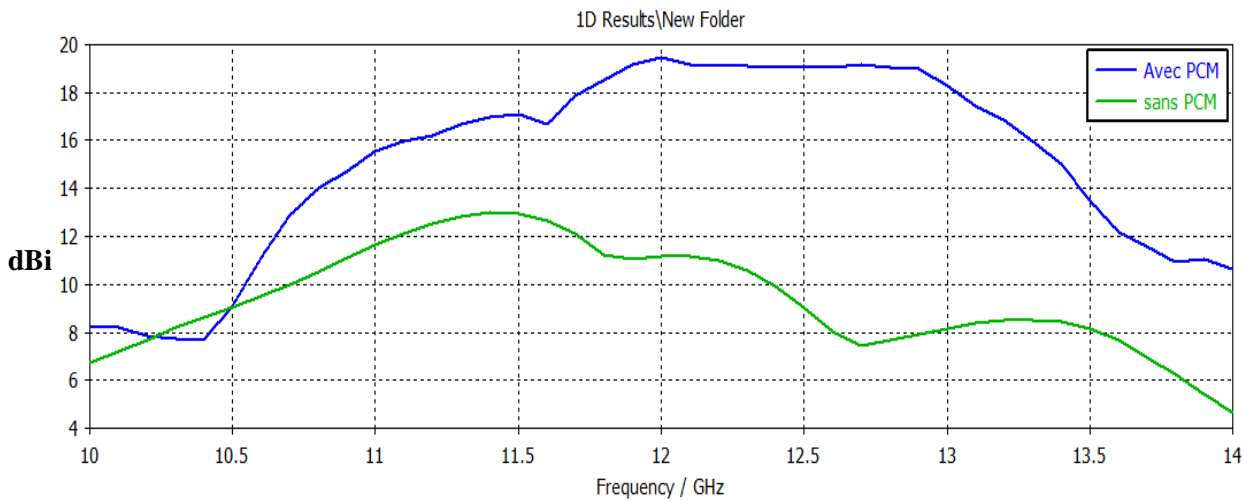
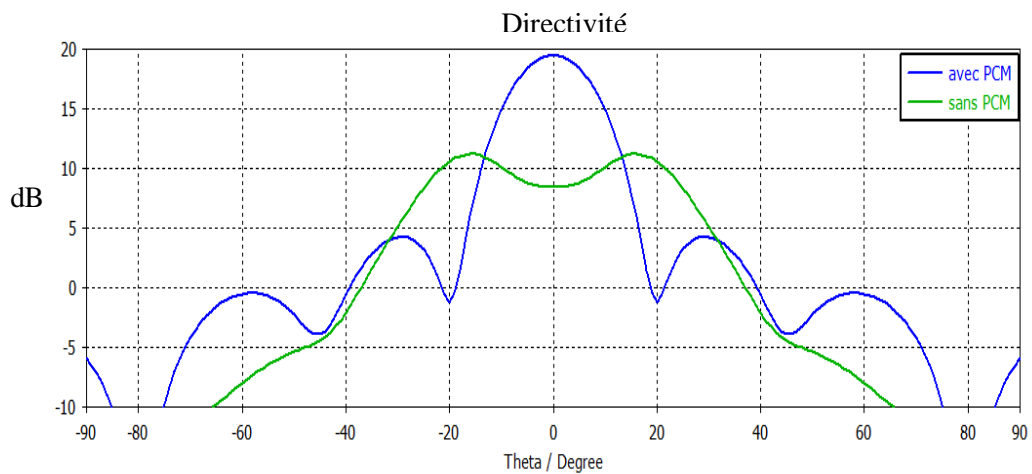
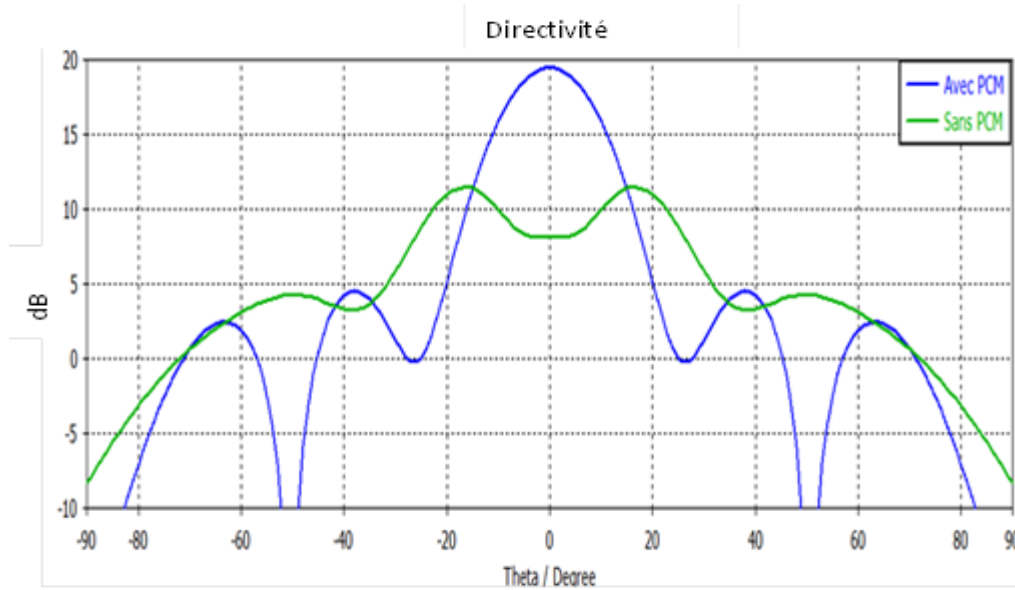


Figure 53: Bandes passante en rayonnement a -3dB des deux antennes



a)



b)

Figure 54: Diagramme de rayonnement en directivité des deux antennes avec et sans PCM à $f=12\text{GHz}$ a) $\varphi=90^\circ$ b) $\varphi=0^\circ$.

On remarque que après l'ajout de PCM la directivité est augmentée

Tableau 7: Comparaison des résultats de simulation des deux antennes (avec et sans PCM) à $f=12\text{GHz}$

Antenne	S11 (dB)	Directivité (dBi)	Gain (dB)	SLL (dB)		Bp à -3dB (%)
				$\varphi=0^\circ$	$\varphi=90^\circ$	
Antenne fente+PRS (référence)	-26.66	13	12.9	-25.4	-7.7	20.96%
Antenne fente+ PRS+ PCM (finale proposée)	-33.05	19.5	19.1	-15	-15	16.6%

Les résultats obtenus montrent qu'avec l'ajout du PCM, la bande passante en adaptation est passée de 2.383GHz à 1.98GHz. La directivité a augmenté de 13dBi à 19.5dBi. La bande passante en rayonnement à -3dB est passée de 20.96% à 16.6% en présence du PCM. Aussi l'antenne finale obtenue possède un niveau de lobes secondaires très réduit. Il est passé de -7.7dB en absence du PCM à -15dB en sa présence. Ainsi on peut conclure que la correction de la phase de l'ouverture rayonnante de l'antenne de référence avec le PCM a amélioré significativement les performances de l'antenne de référence. L'antenne finale obtenue est donc très directive, large bande et possède un niveau de lobes secondaire réduit.

III.3 Comparaison des performances de l'antenne finale avec celles des antennes de la littérature.

Les performances de l'antenne finale proposée sont maintenant comparées à celles d'une antenne de littérature fonctionnant à la même fréquence et utilisant la même technologie de correction de phase. La structure finale du PCM proposée est comparée à celle de l'antenne de littérature sur la figure 55.

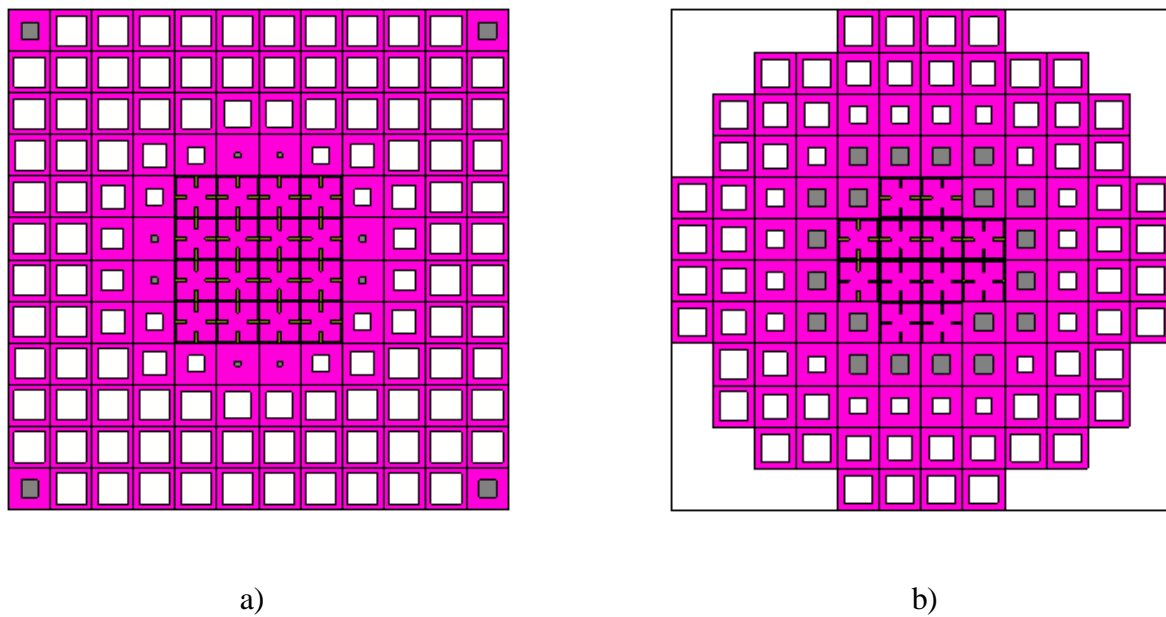


Figure 55 : Vue de haut du PCM a) notre Proposition b) celui de la littérature [41.]

La bande passante des deux antennes sont comparées sur la figure 3.20 :

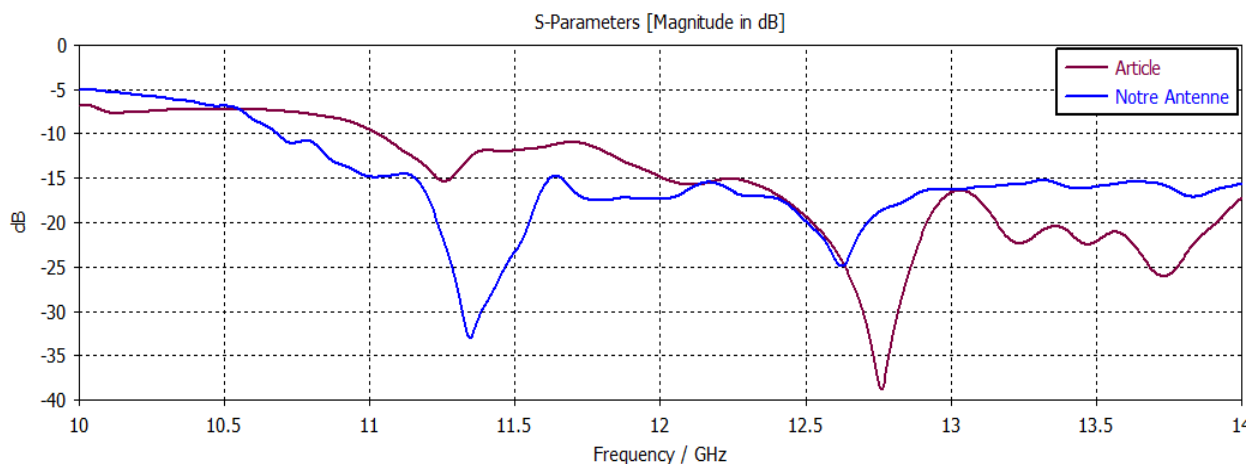


Figure 56: Niveau d'adaptation S11 de l'antenne finale proposée comparé a celui de l'antenne de littérature

Les bandes passantes a -3dB en rayonnement des deux antennes sont comparées sur la figure 57 :

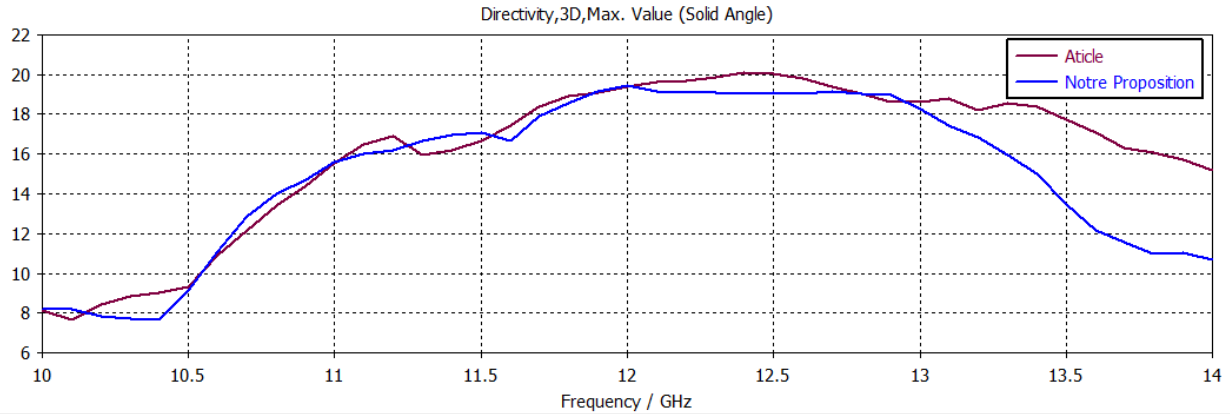


Figure 57 : Bande passante a -3dB de l'antenne finale proposée comparé à celui de l'antenne de littérature

Le diagramme de rayonnement et le niveau des lobes secondaires des deux antennes sont représentés comparés sur la figure 58 et 59:

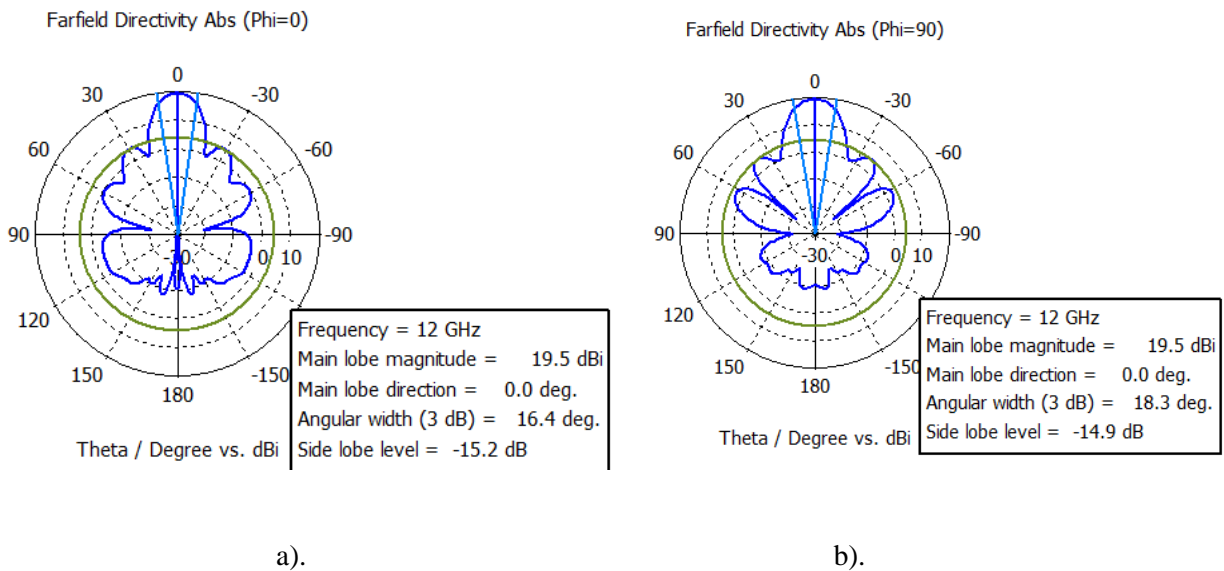


Figure 58: Diagramme de rayonnement de notre antenne à f=12GHz .a) pour plan $\varphi=0^\circ$, b) plan $\varphi=90^\circ$

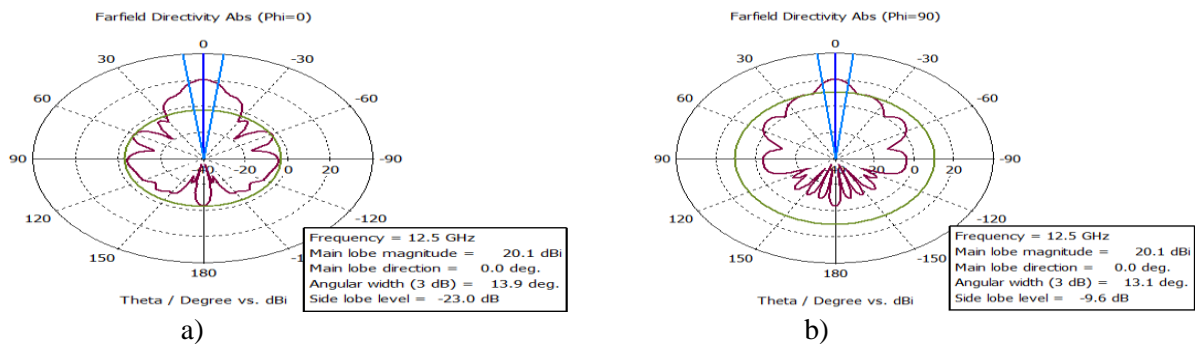


Figure 59: Diagramme de rayonnement de l'antenne de la littérature à f=12.45GHz .a) pour plan $\varphi=0^\circ$, b) plan $\varphi=90^\circ$

Les performances des deux antennes sont comparées dans le tableau 8.

Tableau 8 : Comparaison des performances de l'antenne finale proposée avec celles de l'antenne de la littérature

Antennes	Bande passante en GHz	Directivité (dBi)	SLL (dB)	Bp à -3dB (%)
Antenne finale proposée	11.26-13.24GHz	19.5	-15	16.6
Antenne de la littérature [.]	11.54-13.61	20	-10	16.6

En conclusion ; l'antenne proposée possède une directivité maximale et une bande passante a -3dB presque similaires à ceux de l'antenne de la littérature. Néanmoins, notre antenne finale proposée possède un niveau de lobes secondaires SLL=-15dB beaucoup plus faible que celui de l'antenne de la littérature ayant un SLL de l'ordre de -10dB.

III .4 Conclusion

Dans ce chapitre, une antenne directive large bande à metasurface est proposée. Pour concevoir cette antenne, un PRS homogène et une surface à correction de Phase PCM à métasurfaces inhomogène ont été ajoutées au-dessus d'une antenne source de type fente. L'antenne finale proposée a été comparé à celle de l'antenne de la littérature utilisant la même technologie. Les deux antennes possèdent le même niveau de directivité et la même bande passante a -3dB néanmoins, l'antenne finale proposée reste meilleure que celle de l'antenne proposé avec un SLL= -15dB comparé à un SLL=-10dB pour l'antenne de la littérature.

Conclusion Général

Ce mémoire a exploré le domaine des antennes directives large bande utilisant les méta-surfaces, mettant en lumière les avancées et les défis liés à cette technologie prometteuse. À travers une analyse approfondie, nous avons démontré que l'intégration des méta-surfaces dans la conception d'antennes permet de surmonter plusieurs limitations des antennes traditionnelles, notamment en termes de directivité et de largeur de bande.

Les méta-surfaces offrent des solutions innovantes pour améliorer les performances des antennes. Elles permettent de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques de manière précise, augmentant ainsi la directivité, le gain et même la bande passante des d'antennes. Ces améliorations ouvrent de nouvelles perspectives pour les applications dans les domaines des communications aérospatiales, des radars, et de l'imagerie médicale, où des antennes de performances élevées sont essentielles.

A ce jour, l'amélioration de la directivité et de la bande passante des antennes à fente est souvent réalisée en utilisant des réseaux de fentes. Cependant, cette méthode présente des inconvénients. Elle peut augmenter l'encombrement de l'antenne et compliquer considérablement son installation. De plus, elle entraîne des coûts de fabrication plus élevés et peut provoquer des problèmes d'interférences et de couplage entre les différents éléments du réseau. C'est pourquoi dans ce mémoire une nouvelle technique d'amélioration de directivité et bande passante d'antennes est abordée. Cette technique repose sur l'utilisation des propriétés des méta-surfaces pour corriger la répartition de la phase du champ à la sortie de l'antenne.

Le premier chapitre de ce mémoire a permis de donner un aperçu général sur les antennes. Les caractéristiques d'antennes, les différentes familles d'antennes ainsi que les différentes techniques utilisées à ce jour pour améliorer les performances en rayonnement des antennes à fente rayonnante. Le deuxième chapitre a été dédié principalement aux matériaux artificiels utilisés pour améliorer les performances en rayonnement des antennes. Enfin le troisième chapitre a été consacré à l'étude et à la conception d'une antenne directive large bande fonctionnant sur la bande fréquence [12-14]GH. L'augmentation de la directivité et la bande passante a -3dB de l'antenne source a été obtenu grâce à l'utilisation d'un PCM inhomogène utilisant des métasurfaces à correction de phase. Ainsi une antenne directive avec une large bande avec une directivité d'environ 20 dBi, de bande passante en rayonnement de 16.6 % et de niveau de lobes

secondaires très réduit de -15 dB a été obtenue.

En conclusion, l'utilisation des méta-surfaces dans la conception d'antennes directives large bande représente une avancée majeure dans le domaine des communications et des technologies électromagnétiques. Les résultats obtenus dans ce mémoire offrent une base solide pour de futurs travaux.

Bibliographie

- [1] D. M. Pozar, 'Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays'
- [2] « les antennes » 13^e édition Dunood : RAYMOUD Branlt, ROERTPiat. P. Bhartia, I. Bahl, R. Garg et A. Ittipiboon, 'Microstrip Antenna Design Handbook'
- [3] Smith, W., Pendry, J. B., & Wiltshire, M. C. (2004). Metamaterials with negative effective permittivity and permeability. *Science*, 308(5728), 1508-1511.
- [4] Caloz, C., & Palocz, M. (2003). Transformation électromagnétique par des structures périodiques sub-longueurs d'onde. *Journal of Applied Physics*, 93(7), 113103.
- [5] T. Bougoutaia, D. Khedrouche and A. Hocini "Bandwidth Improvement for Compact Microstrip Patch Antenna Using Metamaterials", *Acta Physica Polonica A*, 129, 538-540, (2016)
- [6] Joannopoulos, J. D., Winn, J. N., Meade, R. D., & Joannopoulos, J. D. *Photonic Crystal Fundamentals and Applications* (2nd Edition). Princeton University Press. (2011).
- [7] Soukoulis, C. M. (2001). *Photonic Bandgap Materials*. Springer.
- [8] Sze, J. Y., & Lee, Y. J., 'Microstrip Antennas with Dual-Polarization and Wideband Characteristics for 5G Mobile Communication Systems', *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, 1-10, 2015.
- [9] V. Gilg and C. L. Holloway, 'A Comparative Study of Reflection Coefficient Measurements and Their Use in Impedance Matching', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 67, N°1, pp. 83-94, Jan. 2018.
- [10] Alexandre Boyer, "ANTENNES SUPPORT DE COURS ENONCE DE TRAVAUX DIRIGES", INSTITUT DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE, 5^{ème} Année Réseau et Télécom, Toulouse, 2011.
- [11] v. eLearning, Director, <https://www.youtube.com/watch?v=sSRVsSALhWU>. [Film]. 2019.
- [12] N. AOUNALLAH, Master 1 de Systèmes de Télécommunications, (2017 - 2018).
- [13] http://www.telecom.ulg.ac.be/teaching/notes/total1/elen008/node89_ct.html
- [14] Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. 'Antenna Theory and Design'. Wiley, (Chapter 5 et 7), 2021.
- [15] Boyer, "ANTENNES SUPPORT DE COURS ENONCE DE TRAVAUX DIRIGES", INSTITUT DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE, 5^{ème} Année Réseau et Télécom, Toulouse, 2011.
- [16] Chen, X., et al, 'Recent Advances in Broadband and Multiband Antennas for Wireless Applications', *IEEE Access*, (7, 96737-96760), 2019

- [17] Chen, X., et al, 'Recent Advances in Broadband and Multiband Antennas for Wireless Applications', IEEE Access, (7, 96737-96760), 2019.
- [18] Structures'. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, (12, 1441-1444), 2013.
- [19] Caloz, C., & Palocz, M. (2003). Transformation électromagnétique par des structures périodiques sub- longueurs d'onde. Journal of Applied Physics, 93(7), 113103.
- [20] Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., & Schultz, S. (2000). Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. *Physical Review Letters*, 84(18), 4184-4187.
- [21] Caloz, C., & Palocz, M. (2003). Transformation électromagnétique par des structures périodiques sub- longueurs d'onde. Journal of Applied Physics, 93(7), 113103.
- [22] Pendry, J. B. (2000). « Matériaux avec une permittivité et une perméabilité négatives simultanée ». Science, 285(5430), 1660-1663.
- [23] Sameer Kumar Sharma, "Design and Analysis of Compact Metamaterial Antennas Wireless", avril 2015.
- [24] C. Caloz and T. Itoh. „Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications”. John Wiley and Sons, 2006.
- [25] Agate, B. M., & Franco, M. A. (Eds.). (2014). Handbook of Photonic Crystals. Princeton University Press.
- [26] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering. Cambridge University Press, 2008.
- [27] S. Asmaa, "Propriétés optique des cristaux photoniques unidimensionnels périodiques," mémoire master, sep. 2016.
- [28] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering. Cambridge University Press, 2008.
- [29] Zanouada, K. (2018). Conception d'antenne Micro-ruban à l'aide d'un Conducteur Magnétique Artificiel. Mémoire de Master, Sciences et Technologies, Télécommunications, Réseaux et Télécommunications, Université, 24 juin 2018.
- [30] Magnétique Artificiel. Mémoire de Master, Sciences et Technologies, Télécommunications, Réseaux et Télécommunications, Université, 24 juin 2018.
- [31] Feresidis, A. P., & Goussetis, G. (2009). High-impedance surfaces for wireless and optical applications. Journal of Optics, 11(11), 114013.
- [32] LAMOURI, S.B.A., KHATIR, A., & ZAITER, S. «Conception et simulation d'une antenne à dépointage de faisceau en utilisant des matériaux artificiels». mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, (2023).
- [33] Engheta, N., & Ziolkowski, R. W. (2006). Metamaterials: Physics and engineering explorations. John Wiley & Sons

- [34] Kuhler, L. « Étude et conception de guides d'onde cylindriques à métamatériaux ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse. (2010).
- [35] Ma, T., & Cui, T. J. (2017). Recent advances in manipulating electromagnetic waves with designer metamaterials or metasurfaces. *National Science Review*, 4(5), 631-653.
- [36] Zhou, L., Sun, S., Li, Z., & Cui, T. (2022). Metasurface-Based Antenna Aperture Phase Correction for Efficient Beamforming. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(6), 3381-3390.
- [37] Engheta, N., & Ziolkowski, R. W. (2006). *Metamaterials: Physics and engineering explorations*. John Wiley & Sons.
- [38] Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., & Meade, R. D. (2008). *Photonic crystals: Molding the flow of light* (2nd ed.). Princeton University Press
- [39] Bassaid, F., & Benhabib, G. « Etude et conception d'une antenne à base de métamatériaux pour les applications sans fil 5G ». Master's thesis, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, (2021).
- [40] Selon Habane, «la conception d'antennes à polarisation circulaire est essentielle pour les communications coïmpartielles dans les mines souterraines. ». mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master , Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, (2018).

