

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTRONIQUE

*OPTION : SYSTEME DE
TELECOMMUNICATION (STLC)*

Intitulé :

**Conception et simulation d'un réseau d'antennes
micro-rubans triangulaires à BIE à deux éléments**

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

***Par* : BELKHIRI Hossam Eddine**

SEGHIRI Oussama

***Dirigé Par* :**

Dr. BENMEDDOUR Fadila

Année universitaire : 2019 /2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

« قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا »

إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ »

الآية 32 من سورة البقرة

Remerciements

En premier lieu nous tenons à remercier Le Bon Dieu Tout Puissant et Miséricordieux de la bonne santé, de la volonté et de la patience qu'il nous a accordé tout au long de notre étude

Nous ne pouvons, réellement, trouver les expressions élégantes que mérite notre encadreur Dr. Fadila BENMEDDOUR , afin de la remercier pour sa sympathie sa patience, ses encouragements ses conseils, son aide, ainsi que pour le temps qu'elle a consacré pour évaluer et critiquer ce travail et sa présence total, au cours de cette modeste étude.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres du jury qui ont bien voulu consacrer de leur temps à l'examen et l'étude de notre travail. Notre profonde gratitude à tous les Enseignants du Département d'Electronique qui nous ont encouragés à donner le meilleur de nous-mêmes en nous assurant une formation aussi meilleure que possible. Un remerciement spécial aux Étudiants du département de l'Électroniques et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

GRAND Merci

Dédicaces

Nous dédions ce travail à la source de tendresse que sont nos très chers parents.

Tout en étant convaincue que notre succès est une récompense pour tous leurs sacrifices, qu'ils trouvent ici l'expression de notre plus profonde gratitude.

A nos grands-parents, et toute la famille

A nos amis proches

A nos camarades les étudiants de Télécom

A tous ceux que nous connaissons de près ou de loin.

HOSSAM et OUSSAMA

Table de matières

Remercie	i
Dédicace.....	ii
Listes des figures :.....	iii
Listes des tableaux :.....	vi
Liste des Abréviations	viii
Résumé	xi
Abstract.....	xi
ملخص.....	xi
Introduction générale	2

Chapitre I

I.1. Introduction.....	5
I.2. Réseau d'antennes.....	5
I.3. Réseau d'antennes imprimées.....	6
I.3.1 Types de réseaux d'antennes.....	7
I.4. Présentation générale d'une antenne patch.....	7
I.4.1. Définition d'une antenne patch.....	7
I.4.2. Différentes formes du patch d'une antenne	8
I.4.3. Avantages et inconvénients des antennes Patches	9
I.5. Représentation en quadripôles	10
I.6. Technique d'alimentation de l'élément rayonnant	10
I.6.1 Alimentation par ligne microbande	11
I.6.2 Alimentation coaxiale	11
I.6.3 Alimentation couplée par ouverture	12
I.6.4 Alimentation couplée par proximité.....	13
I.7. Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne patch	13
I.7.1 Alimentation parallèle	14
I.7.2 Alimentation série	14
I.7.3 Réseaux bidimensionnels.....	15
I.8. Les caractéristiques électriques des antennes	16
I.8.1 Coefficient de réflexion	16
I.8.2 Bande passante	16

I.8.3 Le facteur de qualité	17
I.9. Caractéristique de rayonnement des antennes	17
I.9.1 Gain	18
I.9.3 Rendement de l'antenne :.....	18
I.9.4 Diagramme de rayonnement :	18
I.9.5 Ouverture de l'antenne.....	19
I.9.6 Polarisation.....	20
I.10. Méthodes d'analyse d'une antenne Patches	20
I.10.1. Méthode analytiques	20
I.10.2. Méthodes numériques	21
I.11. Les substrats	21
I.11.1. Les matériaux diélectriques utilisés.....	21
I.11.2. Caractéristique des matériaux diélectriques du substrat	22
I.11.3. Critères de choix du substrat : La conception des antennes micro-rubans dans le domaine des ondes millimétriques est guidée par les critères suivants pour le choix du substrat :	23
I.12. Domaines d'applications	23
I.13. La bande Ku	23
I.13. Conclusion	24
Bibliographie.....	25

Chapitre II

II.1. Introduction	2828
II.2. Définition et historique	28
II.3. Description des matériaux BIE diélectriques.....	30
II.3.1. Réseaux unidimensionnels.....	31
II.3.2. Réseaux bidimensionnels.....	31
II.3.3. Réseaux tridimensionnel.....	33
II.4. Description des structures BIE métalliques	34
II.5. Les surfaces partiellement réfléchissantes	34
II.6. Principe de fonctionnement d'une antenne BIE.....	37
II.7. Caractéristiques et performances de l'antenne à résonateur BIE.....	38
II.7.1. Adaptation de l'antenne.....	39
II.7.2. Diagrammes de rayonnement et gain	39
II.8. Application des matériaux BIE	39
II.8.1. Fréquences optique	40

II.8.2. Domaine des fréquences.....	41
II.8.3. Dans le domaine micro-onde	41
II.9. Conclusion.....	42
Bibliographie.....	43

Chapitre III

III.1. Introduction	45
III.2. Présentation de l’outil de simulation CST.....	45
III.2.1. Description du logiciel de simulation CST Studio Suite.....	45
III.2.2. Modules de CST	45
III.2.3. La méthode FIT utilisée par le logiciel CST.....	46
III.2.4. La méthode qui décrit la structure.....	47
III.2.5. Etapes à suivre pour une simulation réussie.....	48
III.3. Les étapes de création d’une antenne.....	50
III.3.1. Créer un plan de masse	50
III.3.2. Créer une substrat diélectrique	51
III.3.3. Créer des trous en substrat	51
III.3.4. Créer un patch.....	52
III.3.5. Créer un encoche de substrat	52
III.3.6. Créer la ligne microbande	53
III.3.7. Définir le port	54
III.3.8. Définir le domaine de fréquence.....	54
III.3.9 . Définir les conditions au bord	55
III.3.10.La simulation	56
III.4 Influence des paramètres de l’antenne sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité.....	57
III.4.1. Présentation de la structure d’un seul élément	57
III.4.2. Structure d’antenne réseau à deux patches triangulaire	58
III.4.3. Influence des paramètres de l’antenne sur ses caractéristiques	59
III.4.4. Comparaisons entre un réseau d’antenne à deux éléments (pour une alimentation série et parallèle) et une antenne d’un seul élément :	59
III.4.5. Comparaisons entre une antenne à un substrat à BIE et un substrat normal	61

III.4.6. L'effet De La Forme Du Réseau Des Trous (Carré, Triangulaire, Hexagonal)	63
III.4.7. L'effet Du Diamètre Des Trous :.....	65
III.4.8. Effet de la variation la hauteur du patch triangulaire H	67
III.4.9. Effet de l'épaisseur du substrat h :	70
III.4.10. Effet de la variation de la permittivité ϵ_{r1} :	72
III.4.11. Effet de la variation de la permittivité ϵ_{r2}	74
Conclusion	76
Bibliographie.....	79
Conclusion générale	80

Listes des figures :

Chapitre I

Figure I.1: Association de plusieurs éléments rayonnants ou réseau d'antennes.....	6
Figure I.2: Exemple de la géométrie d'un réseau d'antennes.....	7
Figure I.3: Différents types de réseaux: (a) linéaire (b) bidimensionnels.....	8
Figure I.4: Structure de base d'une antenne patch.....	9
Figure I.5: Différentes formes d'antennes patch.....	9
Figure I.6: Quadripôle d'antenne.....	10
Figure I.7: Excitation par ligne microbande.....	11
Figure I.8: Alimentation coaxiale.....	12
Figure I.9: Alimentation Couplée Par Ouverture.....	12
Figure I.10: Alimentation couplé par proximité	13
Figure I.11: Alimentation parallèle d'un réseau linéaire.....	15
Figure I.12: Alimentation série d'un réseau linéaire.....	15
Figure I.13: Alimentation parallèle d'un réseau plan.....	16
Figure I.14: Alimentation série d'un réseau plan.....	16
Figure I.15: Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement.....	17
Figure I.16: Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne	19
Figure I.17: Rayonnement d'une antenne Patch.....	20
Figure I.18: Types de polarisation.....	20

Chapitre II

Figure II.1: Structures de matériaux BIE.....	29
Figure II.2: Principe du miroir de Bragg.....	30

Figure II.3: Caractérisation d'un matériau BIE.....	31
Figure II.4: Exemples de structures périodiques 1D, 2D et 3D.....	31
Figure II.5: Structure 1D et son diagramme de dispersion.....	32
Figure II.6: Exemples de différents réseaux 2D.....	33
Figure II.7: Bandes interdites en fonction du réseau et du type de polarisation	33
Figure II.8: Différentes structures 3D comme la structure cubique (1), le tas de bois (2), la structure multicouches (3), les opales ou opales inversées (4) et la Yablonovite (5)	34.
Figure II.9: Exemples de Surfaces Sélectives en Fréquence (SSF).....	36
Figure II.10: A gauche, PRS 1D composée de tiges métalliques parallèles au champ E de l'excitation. A droite, son dual obtenu par le théorème de Babin.....	37.
Figure II.11: PRS 2D à comportement passe-bas et passe-haut en transmission. A gauche, une PRS passe-bas à patchs métalliques déconnectés. A droite, une grille métallique à comportement passe-haut.....	37
Figure II.12: PRS 2D à comportement stop et passe-bande en transmission. A gauche, une PRS stop-bande à anneaux métalliques. A droite, son dual composé d'une grille métallique dotée de patchs déconnectés, à comportement passe-bande.....	38
Figure II.13: PRS 2D à motifs croix.....	38
Figure II.14: Réflexion des ondes dans la cavité résonante formée par un plan de masse et une surface PRS.....	39
Figure II.15: Diagramme de rayonnement et directivité d'une antenne à résonateur BIE.....	41
Chapitre III	
Figure III.1: Différents maillages et approximations.....	49
Figure III.2: Début de création un nouveau projet en CST MICROWAVE STUDIO	49
Figure III.3: Les étapes primaire (réglage) pour créer un projet par CST MICROWAVE STUDIO.....	50

Figure III.4: L'interface de CST MICROWAVE STUDIO	51
Figure III.5: Créer un plan de masse.....	52
Figure III.6: Créer des substrats diélectriques	53
Figure III.7: Créer Un Troue.....	53
Figure III.8: Créer le premier élément du réseau.....	54
Figure III.9: Créer les encoches des éléments rayonnants.....	55
Figure III.10: Créer les lignes microbandes.....	55
Figure III.11: Définir le port.....	56
Figure III.12: Définir le domaine de fréquence.....	56
Figure III.13: Définir les conditions au bord.....	57
Figure III.14: Choisir la précision	57
Figure III.15: La structure d'antenne 1 patch.....	59
Figure III.16: Antenne réseau de 2 patches rectangulaires alimentés : a) en série et b) en parallèle	59
Figure III.17: Coefficient de réflexion S11 pour : un réseau alimenté en série, un réseau alimenté en parallèle et une antenne d'un seul élément.....	60
Figure III.18: Directivité en 3D d'une antenne 1 patch triangulaire.....	60
Figure III.19: Directivité en 3D pour un réseau d'antennes patches à 2 éléments triangulaires alimentés en parallèle.....	60
Figure III.20: Directivité en 3D pour un réseau d'antennes patches à 2 éléments triangulaires alimentés en série.....	61
Figure III.21: Structure des antennes : a) à substrat normal b) à substrat à BIE.....	62
Figure III.22: La directivité en 3D : a) Substrat normal b) Substrat à BI.....	62

Figure III.23: Le coefficient de réflexion S_{11} : Substrat normal et Substrat à BIE	62
Figure III.24: Coefficient de réflexion S_{11} pour trois formes du réseau des trous du substrat BIE : Carré, Triangulaire et Hexagonal.....	63
Figure III.25: La directivité pour trois formes du réseau des trous du substrat BIE : Carré, Triangulaire, Hexagonal.....	64
Figure III.26: Coefficient de réflexion S_{11} pour différents diamètres des trous.....	66
Figure III.27: La Directivité En 3D De Différents Diamètre Des Trous a) $D=3\text{mm}$) $D= 4\text{mm}$ C) $D= 5\text{mm}$	67
Figure III.28: Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la hauteur du patch triangulaire pour une alimentation parallèle.....	68
Figure III.29: La directivité en 3D pour une variation de la longueur du patch.....	69
Figure III.30: Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat h	70
Figure III.31: La directivité en 3D pour une variation de l'épaisseur E_p	71
Figure III.32: Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r1}	71
Figure III.33: La directivité en 3D pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r1}	72
Figure III.34 : Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r2}	73
Figure III.35 : La directivité en 3D pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_r	74

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne patch triangulaire.....	58
Tableau III.2 : Les résultats pour les différentes structures.....	61
Tableau III.3 : Les résultats pour type différents substrats.....	62
Tableau III.4 : La fréquence de résonance et la bande passante pour trois formes du réseau des trous du substrat BIE : Carre, Triangulaire, Hexagonal.....	63
Tableau III.5 : La directivité pour trois formes du réseau des trous du substrat BIE : Carré, Triangulaire, Hexagonal.....	64
Tableau III.6 : La Fréquence de résonance et la bande passante pour différents diamètres des trous.....	66
Tableau III.7 : La directivité pour différents diamètres des trous	67
Tableau III.8 : Variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la longueur du patch rectangulaire.....	68
Tableau III.9 : Variation de la directivité en fonction de la longueur du patch.....	69
Tableau III.10 : Fréquence de résonance et bande passante pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat h.....	70
Tableau III.11 : Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur des couches du substrat du patch h(mm).....	71
Tableau III.12 : La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r1})	71
Tableau III.13 : Variation de la directivité pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r1}	72
Tableau III.14 : La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r2})	73
Tableau III.15 : La directivité en fonction de la permittivité ϵ_{r2}	73

Liste des Abréviations

BIP : Bande Interdite Photonique.

BIE : Bande Interdite électromagnétique.

1D, 2D, 3D : Une, Deux, ou Trois Dimensions.

PRS : Partially Reflective Surface (Surface Partiellement Réfléchissante).

BIEM : Bande Interdite électromagnétique Métallique.

WDM : Wavelength Division Multiplexing.

SSF : Surfaces Sélectives en Fréquence.

EBG : Electromagnétique Band Gap

CFC : Cubique à Face Centrée

Résumé :

L'objectif principal de notre travail est l'étude d'un réseau d'antennes micro-rubans triangulaires à bande interdite électromagnétique (BIE) 2D.

Nous avons étudié l'influence des paramètres géométrique de l'antenne réseau sur la fréquence de résonance et la bande passante et sur la directivité. Les paramètres que nous avons étudiés : la forme du réseau des trous dans le substrat, le diamètre des trous, la surface de patch, l'épaisseur de substrat du patch, et aussi les paramètres physiques : le substrat simple et le substrat à BIE, la permittivité du substrat ϵ_{r1} et la permittivité des trous du substrat ϵ_{r2} .

En utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST qui est basé sur la méthode d'intégration finie.

Abstract:

The main objective of our work is the study of a 2D electromagnetic band gap (EBG, BIE) triangular micro strip antenna array.

We study the influence of the geometric parameters of the array antenna on the resonant frequency, bandwidth and on the directivity. The parameters that we studied: the shape of the holes of the substrate, the diameter of the holes, patch surface, substrate thickness, and also the physical parameters: substrate permittivity ϵ_{r1} and holes permittivity substrate ϵ_{r2} .

Using the CST frequency domain electromagnetic simulation tool, which is based on the finite integration method.

ملخص

الهدف الرئيسي من عملنا هو دراسة صفيق هوائي مصغر بفجوة النطاق الكهرومغناطيسي الثلاثي الأبعاد (BIE). ندرس تأثير العوامل الهندسية المتغيرة لهوائي المصفوفة على تردد الرنين وعرض النطاق وعلى الاتجاهية. العوامل المتغيرة التي درسناها: شكل شبكة الثقوب في الركيزة، قطر الثقوب، سطح الرقعة، سمك ركيزة التصحيح، وكذلك في: سماحية الفجوات داخل الركيز (ϵ_{r2}) و سماحية الركيزة (ϵ_{r1}) العوامل الفيزيائية المتغيرة المتمثلة باستخدام أداة المحاكاة الكهرومغناطيسية لمجال التردد CST والتي تعتمد على طريقة التكامل المحدود.



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique au cours des dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie. Parmi les préoccupations de ce domaine, on trouve les antennes. Ce sont des éléments indispensables pour assurer une opération d'émission ou de réception des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace. Elles sont présentes dans tous les systèmes de communication sans fil.

Afin de répondre aux besoins actuels du domaine de télécommunication les concepteurs ont développé un point important : celui d'être connecté en permanence à un réseau mobile d'où l'apparition d'un nouveau réseau sans fils pour la communication à distance (le réseau de téléphonie mobile). Et cela en élaborant des dispositifs à base des antennes imprimées (ou antennes micro-rubans). Ces antennes présentent des caractéristiques très avantageuses en ce qui concerne le poids, le volume, le cout, la simplicité de fabrication et surtout la possibilité de les implanter sur tout type de dispositif électronique.

Cependant ce type d'antenne présente des limites notamment la bande passante étroite, le faible gain, et la possibilité de résonner à une seule fréquence.

Aujourd'hui les antennes imprimées connaissent un grand intérêt chez les chercheurs à cause de leurs nombreuses applications. En effet, les domaines d'utilisation privilégiés des antennes microbande sont les communications en hautes fréquences tels que les communications spatiales, les systèmes militaires et commerciaux, la navigation aérienne ou terrestre, les réseaux informatiques sans fil et la téléphonie mobile.

Pour une antenne, de nombreuses bandes opérationnelles sont à couvrir suite à l'évolution des standards de communication. Elle est présente dans tous les systèmes de communication sans fil. Face à la croissance de divers standards tels que le GSM, DCS les nouvelles antennes doivent être capable de couvrir le maximum des bandes de fréquences correspondant à ces différents services en un minimum d'encombrement.

De nos jours, l'évolution des systèmes de télécommunications crée de nouveaux besoins doit être transcender les limitations intrinsèques de ce type d'antenne (telles que : la bande passante étroite, le faible gain et la dégradation de l'efficacité de rayonnement aux fréquences élevées), une nouvelle technique, basée sur le concept de bande interdite électromagnétique (BIE), peut être utilisée.

Introduction générale

Les matériaux à bandes électromagnétique interdites sont des structures artificielles qui présentent une périodicité de la constante diélectrique dans une ou plusieurs directions. Selon le nombre de directions, ces structures sont désignées par l'appellation de bande interdite électromagnétique (BIE) à une, deux ou trois dimensions. Ces matériaux ont été découverts par Eli Yablonovitch à la fin des années quatre-vingt.

Ils présentent des bandes de fréquences pour lesquelles la propagation des ondes électromagnétiques est interdite. Celui-ci a introduit une bande interdite pour contrôler l'émission stimulée et spontanée de la lumière. Ces matériaux présentent, pour les ondes électromagnétiques, des propriétés physiques intéressantes (en matière de propagation) à la fois dans le domaine de l'optique et dans le domaine des micro-ondes, mais plus particulièrement dans celui des antennes.

Les réseaux d'antennes imprimées sont composés d'éléments rayonnants branchés entre eux par des tronçons de lignes micro rubans, avec une distance entre eux de demi-longueur d'onde de l'antenne, pour éviter le bruitage. Ce réseau a permis d'obtenir de meilleures caractéristiques par rapport aux antennes d'un seul élément, qui ne peuvent pas répondre aux besoins d'encombrement et de simplicité pour atteindre les performances exigées. L'objectif majeur d'un réseau d'antenne imprimé est d'améliorer la largeur de bande passante.

La présence des structures BIE, au-dessus de l'antenne patch, a pour effet d'augmenter sa directivité. L'antenne résultante de cette association s'appelle antenne BIE.

L'objectif de ce mémoire est de conception et simulation d'un réseau d'antennes micro ruban, à BIE en 2D à deux patches triangulaires à deux éléments opérant dans la bande Ku [12 à 18 GHz], en utilisant le simulateur électromagnétique CST MICROWAVE STUDIO. Nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques de l'antenne sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité.

Pour atteindre cet objectif, le présent travail est scindé en trois chapitres :

- Dans le premier de ce mémoire est une présentation générale des antennes micro rubans (imprimées), Ainsi que les différentes méthodes d'alimentation et certaines des caractéristiques, les différents matériaux et substrat utilisés. Enfin nous présentons des applications des antennes.

Introduction générale

- Le deuxième chapitre nous vous offrons une définition et l'histoire des structures BIE, les concepts de base liés aux matériaux à BIE. Nous étudions les différents types de ces matériaux (1D, 2D, 3D), enfin des différentes applications des structures BIE.
- Le troisième chapitre traite de la construction d'une antenne patch triangulaire avec un substrat BIE en 2D, puis de la formation d'un réseau à deux composants pour que ce réseau soit dans un état très adapté. Après cela, nous menons une étude à ce sujet en l'exposant à divers changements géométriques et physiques et voyons l'effet de cela sur les caractéristiques du réseau d'antennes représenté dans (la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité).



CHAPITRE I

les réseaux d'antennes imprimées

I.1 Introduction

Dans les systèmes de communication par ondes hertziennes, les antennes d'émission et de réception sont des dispositifs indispensables pour assurer la liaison entre deux communicantes sans fils ; Pour ce type de liaison, les antennes patchs permettent d'avoir un gain considérable et une large bande passante pour des liaisons très hauts débits. De plus, ce type d'antennes est applicable dans de nombreux dispositifs électroniques de communications modernes destinés au grand public avec un faible coût [1]. Actuellement, avec le progrès des télécommunications, les réseaux d'antennes imprimées ont été proposés pour le but d'améliorer la largeur de la bande passante et d'avoir une bonne directivité pour assurer un haut débit.

I.2 Réseau d'antennes

Un réseau d'antennes est un assemblage d'antennes élémentaires identiques (antennes filaires, cornets, patchs ...) avec la même orientation, disposées selon une forme donnée et excitées par un système d'alimentation, afin de créer un rayonnement de forme particulière. Le rayonnement résultant est la superposition des rayonnements provenant de chaque élément, la puissance rayonnée est donc plus grande. Le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antenne est plus étroit que celui d'une antenne élémentaire, sa directivité et son gain sont aussi importants, c'est pour ces avantages que les systèmes de télécommunication récents utilisent les réseaux d'antennes comme dispositifs d'émission et de réception [2].

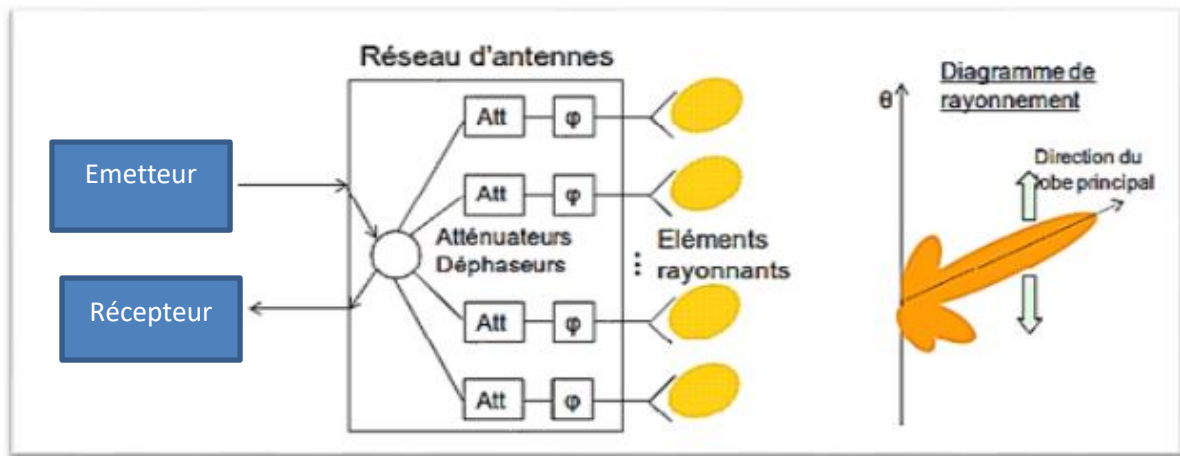


Figure I.1 : Association de plusieurs éléments rayonnants ou réseau d'antennes [2]

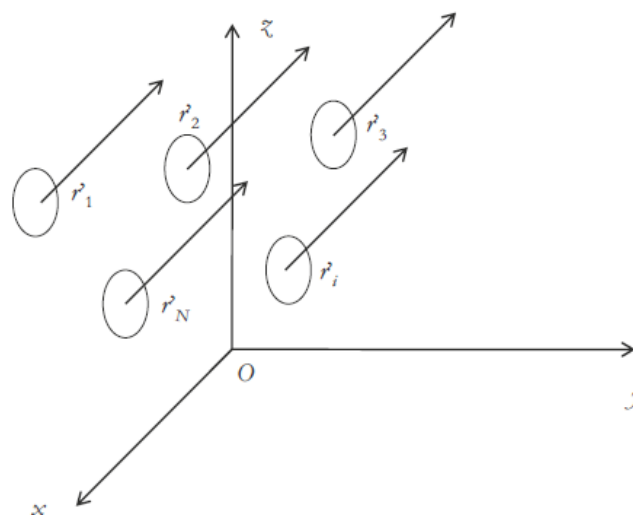


Figure I.2. Exemple de la géométrie d'un réseau d'antennes [2].

I.3 Réseau d'antennes imprimées

Le développement des télécommunications spatiales, les contrôles et commandes à distance, a fait apparaître la nécessité croissante de réaliser des dispositifs micro-ondes peu coûteux et peu encombrants, faisant appel à une technologie simple et économique. L'emploi des fréquences de plus en plus élevées dans les systèmes micro-ondes à structure micro-ruban a été à l'origine du développement des antennes imprimées. Celles-ci sont le plus souvent utilisées en réseaux afin d'améliorer leurs performances et de permettre la réalisation de

fonctions très particulières, telles que : le pointage et le balayage électronique, la réjection de brouilleurs, la détection adaptative, l'auto-adaptativité, la génération de diagrammes de rayonnement variés ou désirés, le contrôle du diagramme de directivité, le contrôle de la polarisation, etc.... [3].

I.3.1 Types de réseaux d'antennes

Il existe plusieurs configurations géométriques des réseaux d'antennes que l'on peut regrouper comme suit : réseau linéaire, réseau circulaire, réseau planaire (forme rectangulaire ou circulaire) et réseau volumique (Figure I.3).

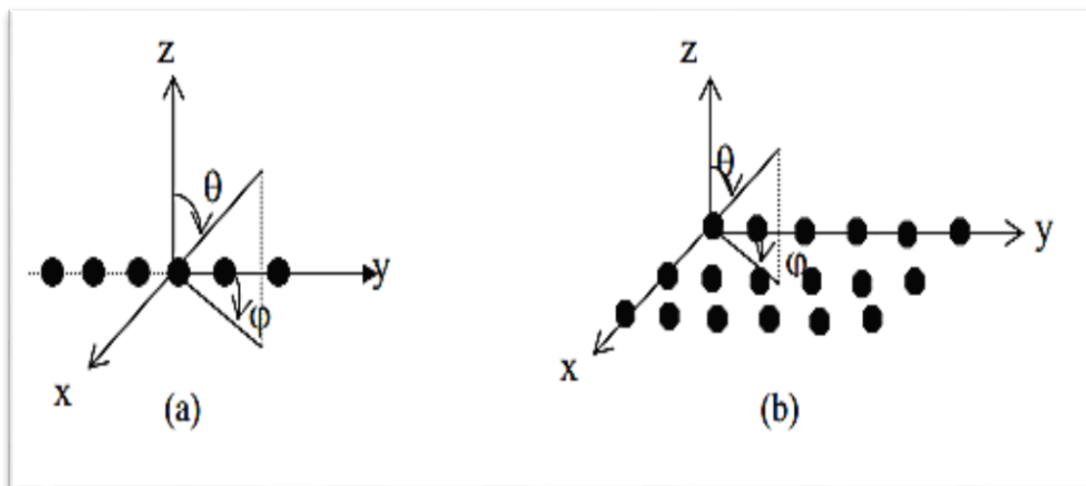


Figure I.3 : Différents types de réseaux : (a) linéaire (b) bidimensionnels.

I.4. Présentation générale d'une antenne patch

I.4.1 Définition d'une antenne patch

Une antenne patch est constituée d'un conducteur métallique (cuivre, l'argent ou l'or) plusieurs forme (carré, rectangulaire, circulaire, triangulaire, elliptique), ou une autre forme, déposé sur un substrat diélectrique au-dessus d'un plan de masse (Figure I.1) [1].

L'antenne patch (MSA : Microstrip Antenna) ou plaquée n'est pas un concept nouveau. Les premières publications en 1953 avec DESCHAMPS et en 1955 avec le dépôt d'un brevet français par GUTTON et BAISSINOT. Les premières réalisations naissent avec HOWELL et MUNSON en 1970. Ce n'est qu'à partir de cette date que l'on porte un grand

intérêt pour ce concept. Le développement prodigieux de ces structures imprimées est lié aux progrès considérables réalisés dans les années 80 dans le domaine de la miniaturisation, de l'intégration des circuits électroniques et sur tous les substrats diélectriques à faibles pertes. Il convient de souligner leur faible poids, leur encombrement réduit, leur faible coût de revient et leur configuration plane compatible avec les circuits intégrés et éventuellement conformable [4].

Ainsi, les études et les réalisations s'intensifient et visent de nombreuses utilisations dans les domaines civil, militaire et médical [5].

L'antenne imprimée (patch) est conçue pour satisfaire à ces besoins, son caractère en miniature offre la possibilité de l'intégrer facilement dans les systèmes d'émission-réceptions.

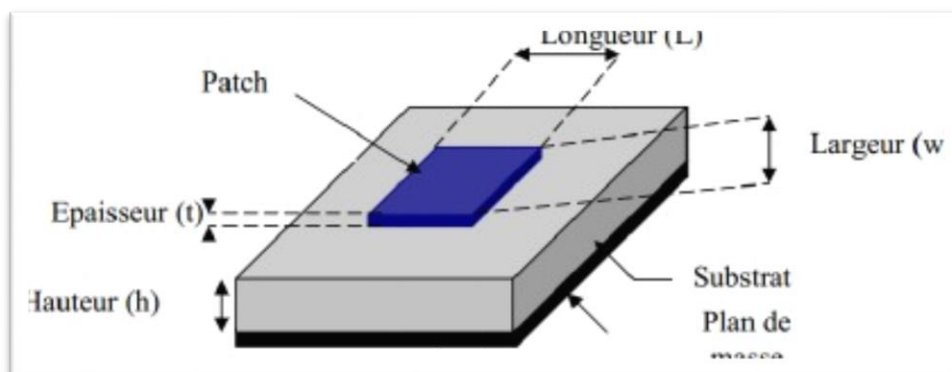


Figure I.4 : Structure de base d'une antenne patch [6].

Les principaux paramètres physiques et géométriques qui déterminent la bande et le domaine de fonctionnement sont : La permittivité relative, Les dimensions du patch, L'épaisseur du substrat. [6].

I.4.2 Différentes formes du patch d'une antenne

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carré, circulaire ou simplement un dipôle. La figure I.5 suivante montre ces différentes formes

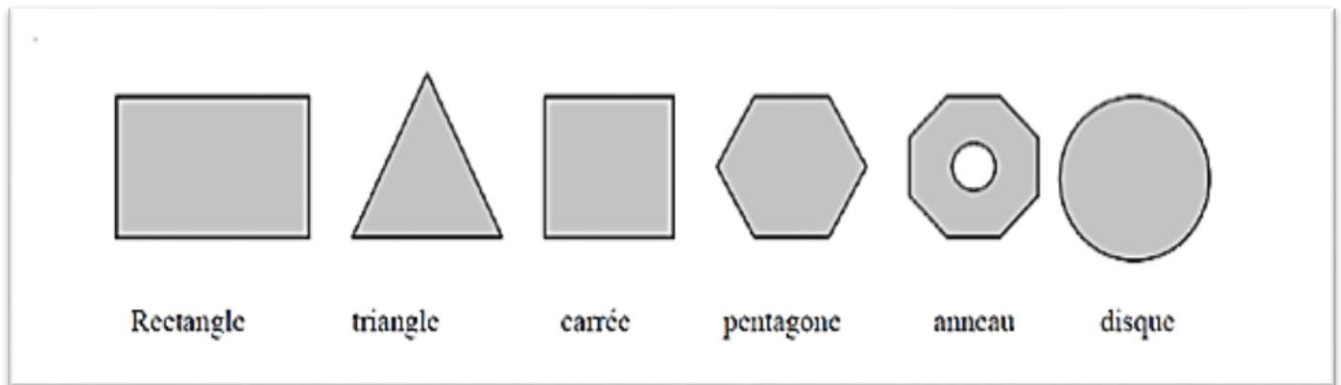


Figure I.5 : Différentes formes d'antennes patch [7]

I.4.3 Avantages et inconvénients des antennes Patches

Les antennes patches sont largement utilisées, leurs applications couvrent un large domaine de fréquence, leur configuration et dimensions favorisent leurs intégrations sur de nombreux mobiles. Parmi les avantages de ces d'antenne :

- Profil plat ;
- Faible poids ;
- Volume réduit ;
- La conformabilité et la possibilité d'intégrer les circuits micro-ondes au niveau des antennes ;
- Simplicité de leurs structures ;
- Faible coût de fabrication donc la production en grandes quantités devient facile ;
- Plusieurs éléments radiants peuvent être placés sur la même plaque avec le réseau d'alimentation ou avec d'autres circuits imprimés (déphaseurs, commutateurs, etc.).

Quand même, comme rien n'est jamais parfait, ce type d'antenne a ses propres inconvénients :

- Faible bande passante, le facteur de qualité Q , va d'environ 50 jusqu'à 75 ;
- Faible puissance ;
- Impureté de la polarisation ;

- Faible gain. [8]

I.5 Représentation en quadripôles

Une antenne peut être représentée comme un quadripôle (Figure I.6), défini par les Paramètres S.

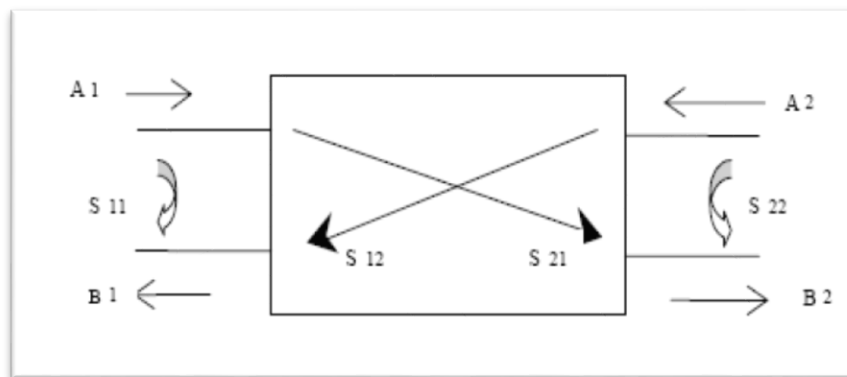


Figure I.6 : Quadripôle d'antenne

$A1, A2, B1$ et $B2$, sont des ondes de puissance.

On a les relations suivantes :

$$B1 = S11.A1 + S12.A2$$

$$B2 = S21.A1 + S22.A2$$

- Le coefficient $S11$ correspond à la réflexion en entrée des quadripôles lorsque $A2 = 0$.
- Le coefficient $S12$ représente la transmission de la puissance entrant en sortie vers l'entrée lorsque $A1 = 0$.
- Le coefficient $S21$ est le gain du quadripôle lorsque $A2 = 0$.
- Le coefficient $S22$ est la réflexion en sortie du quadripôle lorsque $A1 = 0$ [9].

I.6. Technique d'alimentation de l'élément rayonnant

Parmi les choses dans l'étude et la réalisation d'antennes imprimées est leur alimentation. Pour cela, plusieurs techniques ont été considérées dans ce but. Les méthodes d'alimentation des antennes patches peuvent être classées en deux catégories :

Les alimentations par contact (par sonde ou ligne micro ruban).

Les alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente) [6].

I.6.1 Alimentation par ligne microbande

L'alimentation peut être établie par la connexion directe à une ligne microbande dont le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément ou d'écale par rapport à cet axe de symétrie si cela permet une meilleure adaptation d'impédance [10].

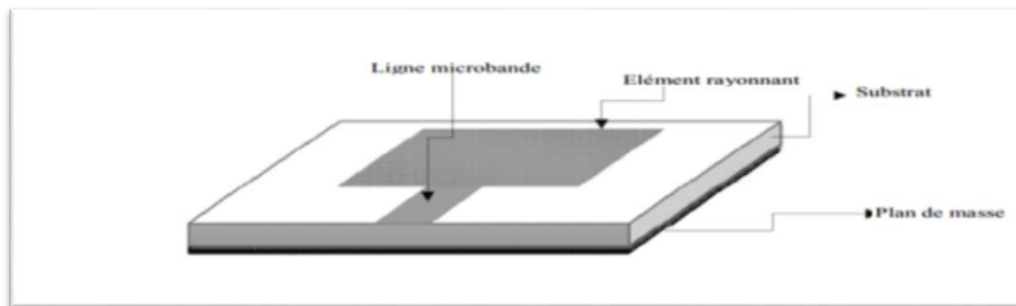


Figure I.7 : Excitation par ligne microbande [10]

I.6.2 Alimentation coaxiale

Dans ce cas l'élément rayonnant est connecté au conducteur intérieur du connecteur coaxial traversant le diélectrique, tandis que le conducteur externe est soudé directement au plan de masse (Figure I.9).

L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être appliquée à n'importe quel endroit désiré du patch afin d'assurer l'adaptation d'impédance, cependant cette méthode présente des inconvénients au niveau du diagramme du rayonnement. En effet, la connexion génère un pic de courant localisé au niveau de l'élément rayonnant qui peut induire une dissymétrie dans le diagramme du rayonnement, de plus des pertes apparaissent avec les perçages du plan de masse ainsi que de l'élément plaqué [11].

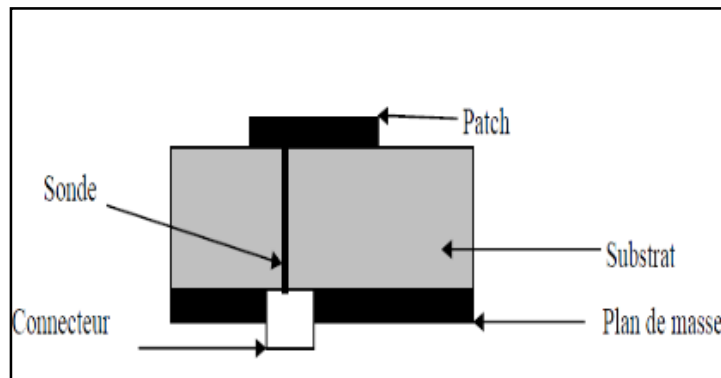


Figure I.8 : Alimentation coaxiale.

I.6.3 Alimentation couplée par ouverture

Dans ce type d'alimentation, le patch rayonnant et la ligne microruban d'alimentation sont séparés par le plan de masse comme représentée dans la figure (I.10) Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation est assuré par une fente ou une ouverture dans le plan de masse [12] .

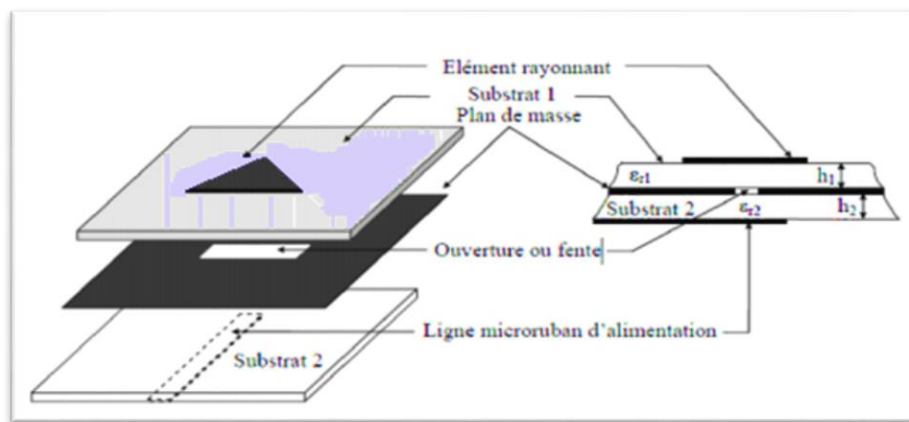


Figure I.9 : Alimentation Couplée Par Ouverture. [12]

L'ouverture de couplage est habituellement centrée sous le patch. La quantité de couplage à partir de la ligne d'alimentation au patch est déterminée par la forme, la taille et l'emplacement de l'ouverture. Puisque le plan de masse sépare le patch et la ligne d'alimentation, le rayonnement parasite est minimisé. D'une façon générale, un matériau ayant une constante diélectrique élevée est employé pour le substrat inférieur, alors qu'un matériau épais et ayant une constante diélectrique faible est employé pour le substrat supérieur afin d'optimiser le rayonnement du patch. L'inconvénient majeur de cette technique d'alimentation est qu'elle présente des

difficultés au niveau de la fabrication en raison des couches multiples qui augmentent également l'épaisseur d'antenne. Cette technique d'alimentation fournit aussi une largeur de bande étroite [12].

I.6.4 Alimentation couplée par proximité

Cette technique d'alimentation est connue également sous le nom de couplage électromagnétique. Deux substrats diélectriques sont employés de sorte que la ligne d'alimentation soit située entre les deux substrats et le patch soit imprimé sur le substrat supérieur comme il est montré dans la (figure I.12).

L'avantage principal de cette technique d'alimentation est qu'elle élimine le rayonnement parasite dû à l'alimentation et fournit une largeur de bande très élevée (plus que 13%), en raison de l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne microbande. Cette technique fournit également des choix entre deux milieux diélectriques différents, un pour le patch et un pour la ligne d'alimentation pour optimiser les performances de l'antenne [13].

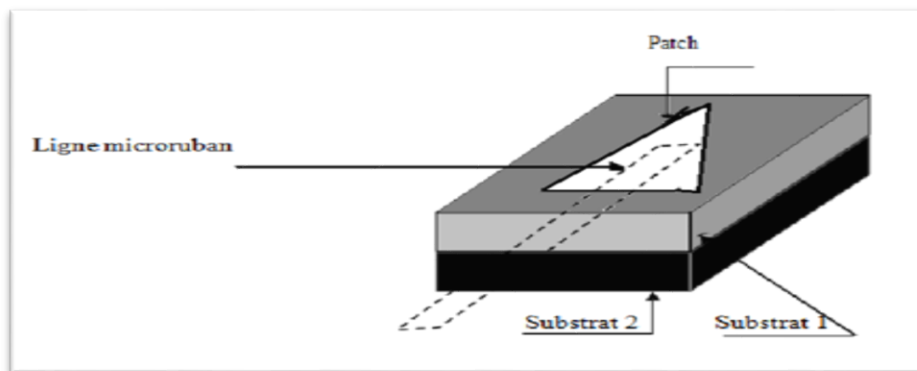


Figure I.10 : Alimentation couplée par proximité [13]

I.7. Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne patch

Le réseau d'alimentation de l'antenne aura pour objectif d'amener l'énergie aux différentes sources en respectant les lois de pondération. La technique la plus simple consiste à alimenter les éléments rayonnants par des lignes microbandes. Le réseau d'excitation peut avoir des architectures variées selon le besoin. Le principe de répartition d'énergie se fait par utilisation des lignes microbandes et des transformateurs d'impédances quart-d'ondes. Les déphaseurs dans le circuit d'alimentation peuvent être formés d'éléments supraconducteurs. Toutes les structures d'alimentations sont supposées uniformes de point de vue distribution de

puissance (les patches doivent être alimentés avec la même puissance). Il faut mettre en considération que les signaux émis par les sources sont tous avec la même fréquence en fonction du temps.

Le circuit d'excitation peut prendre plusieurs architectures ; on distingue deux types :

- Alimentation en série ;
- Alimentation en parallèle ;

Le choix du type d'alimentation se fait en fonction de différents paramètres qui sont :

- La loi de pondération souhaitée, en amplitude et/ou en phase ;
- La bande passante souhaitée ;
- Un réseau série aura une bande passante plus faible dans la mesure où la loi de pondération sera plus sensible à la fréquence que dans le cas d'une alimentation parallèle [14].

I.7.1 Alimentation parallèle

Un réseau parallèle (Figure I. 13), sera plus encombrant qu'un réseau série (Figure I.14). De plus, il est à noter qu'un réseau parallèle présente des longueurs de lignes supérieures et un plus grand nombre de coudes ce qui engendre d'avantage de pertes, en particulier dans le domaine millimétrique. Un autre choix important dans la conception d'une antenne imprimée est celui du substrat diélectrique. Si la structure du réseau à $2n$ éléments rayonnants qui peuvent être alimentés en parallèle par n étages de $(2m - 1)$ diviseurs de puissance à chaque étage m . Afin que cette alimentation soit totalement adaptée, il est judicieux d'utiliser des diviseurs de type Wilkinson [14].

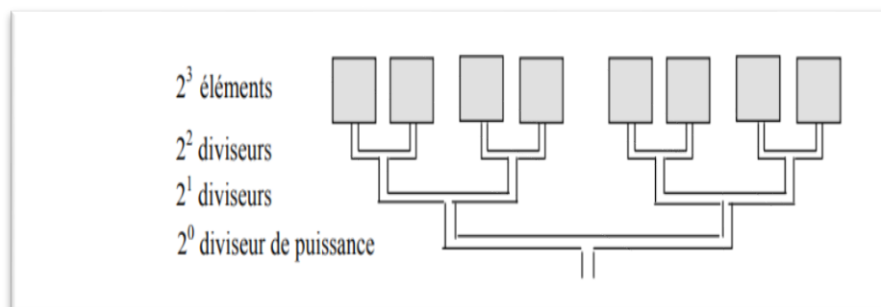


Figure I.11 : Alimentation parallèle d'un réseau linéaire

I.7.2 Alimentation série

Dans la figure I.14 nous avons une ligne de transmission excitée en série les éléments

rayonnants. Chaque ligne présente à son entrée un déphaseur, qui lui-même est lié de façon orthogonale à un guide commun d'alimentation. La distance des branchements des lignes sur la ligne principale doit être uniforme, et les signaux doivent arriver en phase jusqu'aux déphaseurs pour ne pas s'induire dans des erreurs de phase [14].

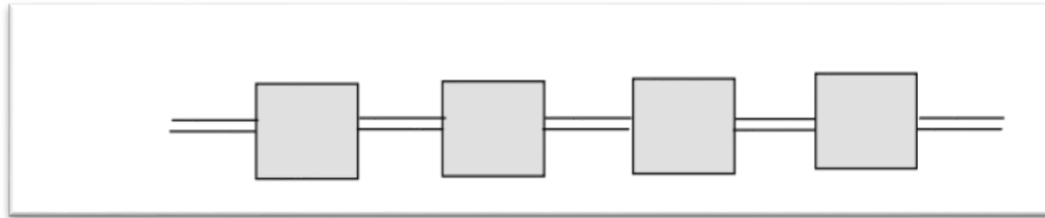


Figure I.12 : Alimentation série d'un réseau linéaire

I.7.3 Réseaux bidimensionnels

Les réseaux linéaires permettent de conformer le diagramme de rayonnement dans un plan passant par les sources du réseau. Afin d'obtenir un effet de réseau dans tout l'espace et, en particulier dans les plan E et H, il est nécessaire d'avoir recours à des réseaux bidimensionnels (Figures I. 15- I.16). Ils peuvent être obtenus en mode non résonant à partir des réseaux linéaires à alimentation série ou parallèle [14].

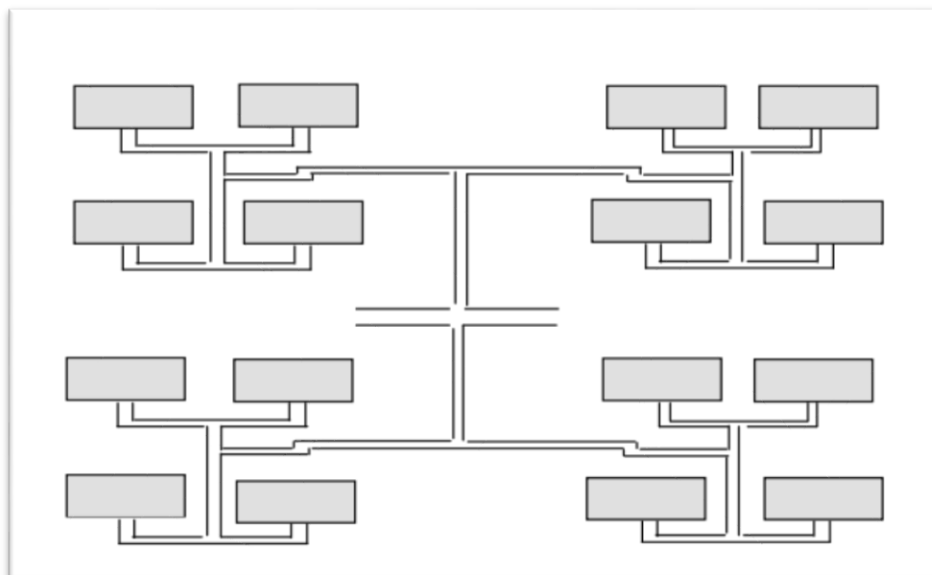


Figure I.13 : Alimentation parallèle d'un réseau plan

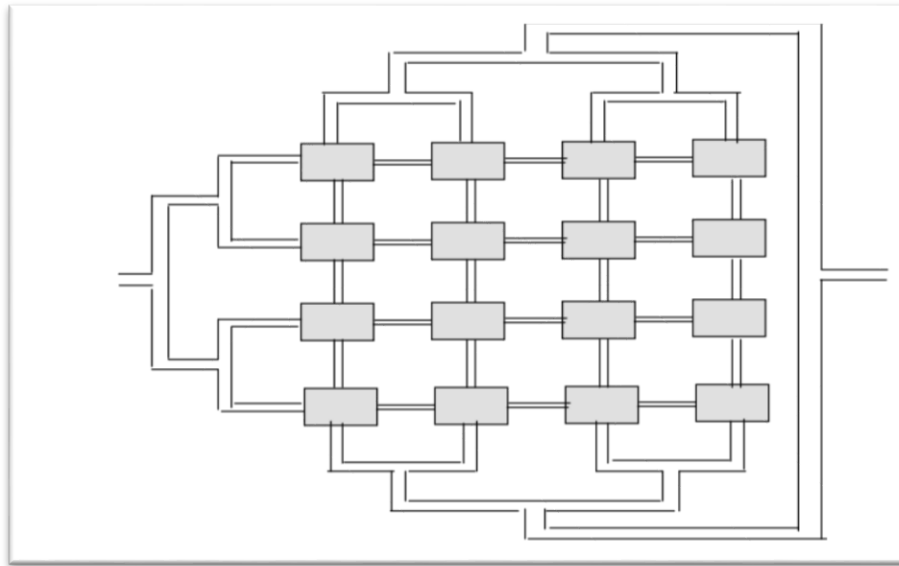


Figure I.14 Alimentation série d'un réseau plan

I.8 Les caractéristiques électriques des antennes

I.8.1 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion donne le transfert d'énergie par l'antenne (l'adaptation de l'antenne) qui est lié à l'impédance d'entrée par la relation suivante :

$$S_{11} = \frac{Z_r - Z_c}{Z_r + Z_c} \dots \dots \dots (I.1)$$

Où :

Z_c : est l'impédance de normalisation, en générale égale à 50Ω .

Le module du coefficient de réflexion est habituellement présenté en décibel (dB) et est noté $|S_{11}|$ et se définit comme suit :

$$S_{11}(dB) = 20 \log S_{11} \dots \dots \dots (I.2)$$

I.8.2 Bande passante

Ce paramètre correspond à la gamme de fréquence où le transfert d'énergie vers l'antenne ou de l'antenne vers le récepteur est maximal (largeur de bande de fonctionnement) [15] :

$$|BP| = f_2 - f_1 \dots\dots\dots (I.3)$$

Généralement, ce paramètre est évalué aussi en pourcentage du rapport de la bande passante relative par rapport à la fréquence centrale :

$$BP\% = \frac{BP}{f_0} \dots\dots\dots (I.4)$$

La figure (I.17) présente la courbe coefficient de réflexion S_{11} d'une antenne en fonction de la fréquence et met en évidence la largeur de bande de fonctionnement (bande passante à - 10 dB).

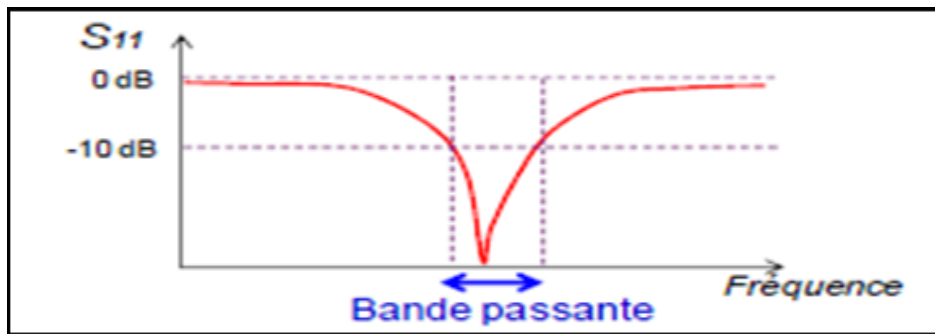


Figure I.15 : Coefficient de réflexion d'une antenne et sa bande de fonctionnement

I.8.3 Le facteur de qualité

Pour obtenir l'expression du facteur de qualité Q d'une antenne à résonateur diélectrique rectangulaire, il suffit de calculer l'énergie totale W stockée dans l'antenne et la puissance totale rayonnée $Prad$ [16].

Une bonne estimation du facteur de qualité est donnée par le rapport entre la fréquence de résonance f_r de l'antenne et sa bande passante Δf :

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} \dots\dots\dots (I.5)$$

I.9 Caractéristique de rayonnement des antennes

Les caractéristiques de rayonnement visées sont utiles pour le dimensionnement des systèmes antennaires. Le rôle d'une antenne dans un système de communication sans fils est d'émettre ou de recevoir le rayonnement à grande distance. Plusieurs caractéristiques permetts de grouper

les antennes tels que le gain, le diagramme de rayonnement, la largeur de fonctionnement, la polarisation, etc. [6]

I.9.1 Gain

Le gain est considéré comme un des principaux paramètres des antennes directives. Pour ces derniers, l'énergie est moins importante dans certaines directions et plus importante dans d'autres. Le gain d'une antenne est évalué par le rapport entre la puissance émise dans la direction du lobe principal et la puissance qui serait émise par une antenne omnidirectionnelle, les deux antennes étant alimenté [15-17].

$$G(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p_0} = \frac{p(\theta, \varphi)}{\frac{P_t}{4\pi R^2}} = \frac{4\pi R^2 p(\theta, \varphi)}{\iint p(\theta, \varphi)} \dots\dots\dots (I.6)$$

P : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne directive (W/m²).

P₀ : est la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne isotrope (W/m²).

P_t : est la puissance totale rayonnée par les deux antennes (W).

La directivité (θ, φ) d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée (θ, φ) et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope [18].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_r}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \dots\dots\dots (I.7)$$

I.9.3 Rendement de l'antenne :

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

$$\eta = \frac{P_r}{P_f} \dots\dots\dots (I.8)$$

Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne [19].

I.9.4 Diagramme de rayonnement :

Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace (θ_0, φ_0) dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique. On trace dans le diagramme de rayonnement la fonction caractéristique de rayonnement $r(\theta, \varphi)$, qui varie entre 0 et 1 selon la direction. Celui-ci peut se représenter sous différentes formes (Figure I.18). En général, le diagramme de rayonnement d'une antenne est représenté dans les plans horizontaux ($\theta = 90^\circ$) et verticaux ($\varphi = \text{constante}$), ou bien dans les plans E et H [20.]

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta_0, \varphi_0)} \dots\dots\dots (I.9)$$

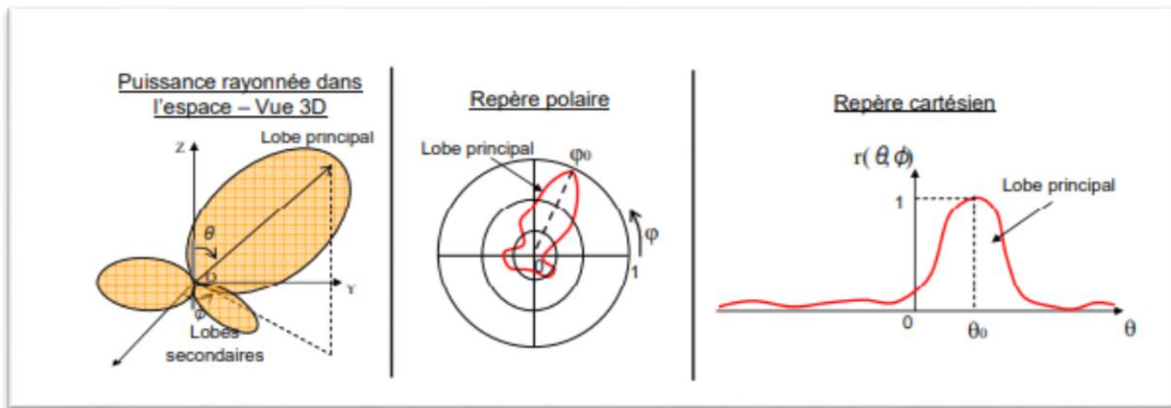


Figure 1.16 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [20]

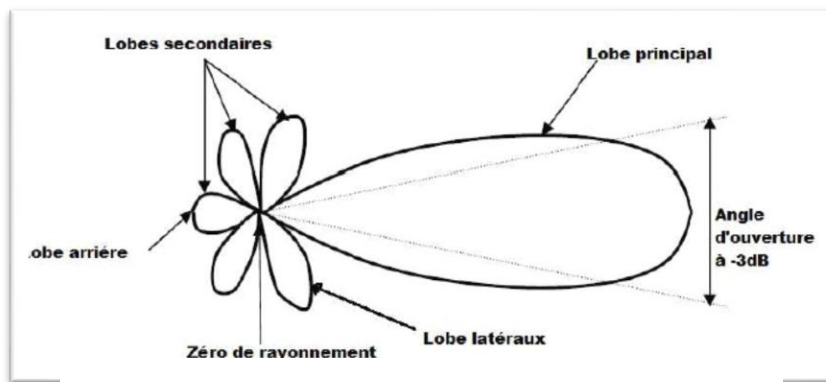


Figure I.17 : Rayonnement d'une antenne Patch [21].

I.9.5 Ouverture de l'antenne :L'ouverture angulaire à mi-hauteur ou ouverture à 3 dB est

définie par l'écart angulaire existant entre les deux directions situées de chaque côté de l'axe, pour lesquelles la puissance est divisée par deux [22].

I.9.6 Polarisation : La polarisation d'une antenne est déterminée par la trajectoire que décrit le champ électrique E de l'onde qu'elle émet ou reçoit de manière privilégiée. Le type de polarisation peut être linéaire, circulaire ou dans le cas général elliptique [8].

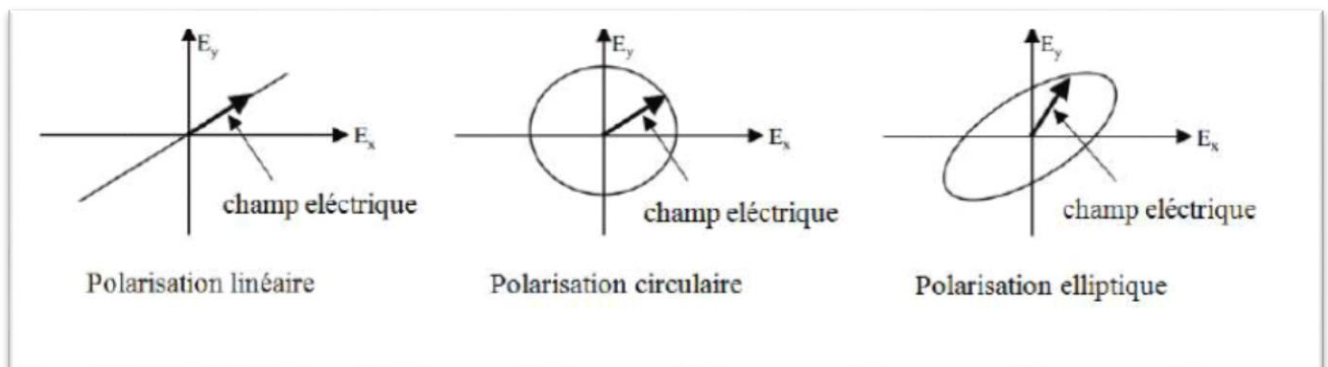


Figure I.18: Types de polarisation.

I.10 Méthodes d'analyse d'une antenne Patches

Les antennes Patches, généralement constituées d'un élément rayonnant à deux dimensions imprimées sur un substrat de faible permittivité, sont principalement analysées par les méthodes dédiées aux circuits planaires. Ces méthodes peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes analytiques simples, tels que le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité et les méthodes numériques rigoureuses telles que la méthode des moments, la méthode des éléments finis et la méthode des différences finies. Depuis les années quatre-vingt-dix de nouvelles méthodes dites d'optimisation basées sur les réseaux de neurones artificiels et les algorithmes génétiques ont été introduites avec succès [23].

I.10.1 Méthode analytiques

Ces méthodes sont basées sur la distribution du courant magnétique autour du patch, les principales méthodes de cette catégorie sont [23] :

- Le modèle de la ligne de transmission

- Le modèle de la cavité.

I.10.2 Méthodes numériques

Les méthodes numériques les plus utilisées en électromagnétisme sont [24] :

- Méthode variationnelle : les éléments finis.
- Méthode différentielle : différences finies et TLM.
- La méthode intégrale.

I.11 Les substrats

Il existe une multitude de matériaux diélectriques pour les substrats. Les paramètres importants sont : le diélectrique ($2 < \epsilon_r < 16$) dans la bande RF ou micro-ondes. La classe des valeurs de la constante diélectrique du substrat s'étale de 2.2 à 12 pour opérer aux fréquences allant de 1 à 100GHz. Les pertes dans le diélectrique qui sont représentés par une tangente ($0.0001 < \delta < 0.06$) ou la partie imaginaire de la constante diélectrique. A cause de leur faible cout, leur facilité de fabrication et leurs bonnes surfaces d'adhésion, les plastics sont couramment utilisés dans la bande RF. Une autre considération à prendre en compte dans le choix du substrat est l'effet de la constante diélectrique sur les caractéristiques de radiation. Une grande constante diélectrique entraine, généralement, une faible radiation des patches [25].

I.11.1 Les matériaux diélectriques utilisés

Le substrat joue un rôle double dans la technologie microbande. Il est à la fois un matériau diélectrique, où viennent se graver les circuits, et une pièce mécanique, car il supporte la structure. Cela implique des exigences à la fois sur le plan mécanique et électrique parfois difficiles à concilier, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde de fonctionnement ($h \ll \lambda_0$).

Le substrat diélectrique affecte le comportement et les performances électromagnétiques de l'antenne. On préfère souvent utiliser des substrats à faibles pertes diélectriques ($\tan \delta < 10^{-3}$) qui favorisent le rendement de l'antenne et ceux à permittivité relative faible ($\epsilon_r < 3$) qui améliorent le rayonnement tout en diminuant les pertes par ondes de surface pour une hauteur donnée. Les matériaux utilisés sont : Les matériaux céramiques, Les matériaux semi-conducteurs, Les matériaux ferromagnétiques, Les matériaux synthétiques, etc. [25].

I.11.2 Caractéristique des matériaux diélectriques du substrat :

Les matériaux diélectriques se divisent en différentes catégories :

- **Les matériaux céramiques** : Couramment employés pour les circuits micro rubans.
- **Les matériaux semi-conducteurs** : De type Arséniure de Gallium (GaAs) ou Silicium (Si) permettent couramment la fabrication des circuits M.M.I.C.
- **Les matériaux ferrimagnétiques** : Ce sont des matériaux anisotropes à forte permittivité relative (de 9 à 16) et à faibles pertes diélectriques.
- **Les matériaux photoniques** : Depuis le début des années nonante, un nouveau type de matériaux, les cristaux photoniques (matériaux à permittivité périodique) font l'objet d'une grande effervescence dans le monde scientifique. Or, la grande majorité des recherches portant sur ces matériaux ont été effectuées par des physiciens dans le cadre d'études de dispositifs optiques. Actuellement les chercheurs s'intéressent à une application dans le domaine des microondes. Il s'agit de concevoir une antenne imprimée sur une cavité constituée par des matériaux photoniques, ces derniers peuvent réduire les ondes de surface.
- **Les matériaux chiraux** : Les propriétés de chiralité ou de bi-isotropie que possèdent certains matériaux, notamment dans le domaine des microondes et de l'optique.
- **Les matériaux T.M.M (Thermoset Microwave Material)** : Ces matériaux constitués de résines chargées de différents composants céramiques, génèrent une gamme de substrats TMM-3, TMM-4, TMM-6, TMM-10 de faibles pertes ($\tan < 0,0018$) pour des permittivités respectivement égales à 3,25 ; 4,5 ; 6,5 ; 9,8.
- **Les matériaux RO3000** : Ces matériaux sont de permittivité relative stable en température et en fréquence. Ils sont fabriqués par ajout de poudre céramique au Téflon et peuvent être utilisés à haute fréquence (> 30 GHz).
- **Les matériaux composites** : Ce type de matériaux s'obtient en combinant les qualités radioélectriques et mécaniques d'un substrat.
- **Anisotropie du substrat** : L'anisotropie est définie comme étant la dépendance de la constante diélectrique du substrat sur l'orientation du champ électrique appliqué, pour obtenir les propriétés électriques et mécaniques nécessaires [26].

I.11.3 Critères de choix du substrat :

La conception des antennes microrubans dans le domaine des ondes millimétriques est guidée par les critères suivants pour le choix du substrat :

(a) Possibilité d'excitation par onde de surface ;

(b) Effets de la constante et de la tangente de perte diélectrique sur la dispersion ;

(c) Importance des pertes par diélectrique et par conducteur ;

(d) Anisotropie dans le substrat ;

(e) Effets de l'environnement tels que la température, l'humidité ;

(f) Conditions mécaniques: Physiquement, le matériau doit résister aux contraintes mécaniques, conserver sa forme originelle. Son facteur d'expansion doit être voisin de celui de la métallisation, car il est confronté à de fortes températures lors des soudures.

Enfin, son état de surface doit être le plus parfait possible ;

(g) Coût de fabrication [12].

I.12 Domaines d'applications

Grâce à leurs nombreux avantages, par rapport aux quelques inconvénients, les antennes patchs sont utilisées dans beaucoup de domaines : de l'électronique grand public :

Aux systèmes technologiques de pointe. Parmi ces domaines, on peut mentionner : la Télémétrie et les antennes de communication sur les missiles, le radar, l'aviation, les liaisons de communication entre les navires ou les satellites géostationnaires, les armes intelligentes, Les systèmes GPS... [27]

I.13 La bande Ku

La bande Ku telle que définie par l'IEEE est une gamme de fréquences de 12 à 18 GHz. IEEE utilise des lettres pour signifier une gamme de fréquences de 1 à 170 GHz. La bande Ku est principalement utilisée pour la télévision par satellite et pour les systèmes VSAT sur les navires.

Quelques applications clés de la bande Ku:

Service fixe par satellite (FSS) (11,7 à 12,7 GHz): C'est la partie du spectre de la bande Ku qui est utilisée pour les services fixes par satellite. Presque toutes les paraboles de 1 mètre à 1,7 mètre sont utilisées pour la réception de la bande FSS. Les systèmes par satellite Free-To-Air (FTA) utilisent également la bande FSS.

Satellite de diffusion directe (DBS) (12,2 à 12,7 GHz): Il s'agit de la partie du spectre de la bande Ku utilisée pour la diffusion directe par satellite. Cette bande est réservée aux satellites de forte puissance destinés à la livraison de la télévision numérique.

Points clés de la bande Ku:

- Le large espacement entre les satellites permet des transmissions de très grande puissance, ce qui permet d'utiliser des antennes paraboliques plus petites pour les applications VSAT.
- La bande Ku subit moins de brouillage terrestre.
- La longueur d'onde de la bande Ku de 16,7 à 25 mm commence à voir une atténuation du signal due aux gouttes de pluie. Cet effet s'aggrave lorsque vous passez au-dessus de la longueur d'onde de la bande Ku vers la bande K.[28]

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref sur les réseaux antennes patches et les paramètres importants : la présentation et caractéristiques de l'antenne imprimée, leur avantages, inconvénients avec les techniques d'alimentation, en plus des méthodes d'analyse, comme nous avons cités quelques applications des antennes patch dans le domaine de télécommunication.

Bibliographie

- [1] Nigarura Dieudonné « Etude et Conception d'un réseau d'antennes imprimées log - périodique multicouches » Mémoire de Master, Université de Abou Bekr-Belkaid de Tlemcen Juillet 2012.
- [2] GUELLIL Nasser « Etude et conception d'un réseau d'antennes beamforming à base de la matrice de Butler en utilisant ADS Momentum » Université Ferhat Abbas –SETIF1, 2014.
- [3] L. Merad1, F.T. Bendimerad 1 et S.M. Meriah 1 « Conception de réseaux d'antennes imprimées par les algorithmes génétiques et le recuit simulé », traitement du signal 2004, volume 21, numéro 3.
- [4] BENTALHA Zakaria et DALI Mohammed Amine « Conception d'une antenne microruban carrée utilisant un substrat à base de cristaux photoniques pour application WI-FI » Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen, 2019.
- [5] M.F. Bendahmane, F.T. Bendimerad, « Etude du couplage entre antennes imprimées », Editions universitaires européennes, 2014.
- [6] AZZAZ RAHMANI Salima « Analyse et conception des antennes imprimées multibandés en anneaux concentriques pour les réseaux de télécommunications » Thèse de doctorat, Université de Abou Bakr-Belkaid–Tlemcen, 2013.
- [7] Fouad BENAMRANE « Conception d'une antenne Patch Microstrip », Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fès) Maroc-Master télécoms hyperfréquence 2011.
- [8] CHOUTI Leila « Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage » Mémoire de magister en Electronique UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE 13 Jan 2009.
- [9] BENISLAMANE Khawla et BETTAYEB Hanane « Modélisation d'une antenne multifréquence par ligne de transmission » Université Kasdi Merbah Ouargla (2017-2018
- [10] Amina MEFTAHI et Rabia OUZZIR « Conception des nouvelles topologies des antennes multi fonctionnelles » Mémoire de master, UNIVERSITE Abou Bekr-BELKAID TLEMCEN 2016-2017.
- [11] MELIHI Souhila et FENGAL Tine-Hinane « Antenne de Téléphonie mobile,

caractérisation et optimisation », Mémoire de Master en Télécommunication par Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2016.

[12] BELAZZOUG Fares « Etude d'une antenne micro-ruban triangulaire à bande interdite photonique (BIP) 2D », Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila Juin 2016.

[13] DILMI Assia « *Etude D'une Antenne Micro- ruban Triangulaire A Bande Interdite Photonique (BIP) 1D* » Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2016.

[14] BARKAT Ouarda, « Etude et Synthèse des Caractéristiques de Réseaux d'antennes Imprimées Supraconductrices dans la Bande Millimétrique » Thèse de Doctorat en science Université Mentouri, Constantine 2009.

[15] Guennach Mohamed « Conception d'une antenne "PIFA" multi-bandes pour applications sans fil » Mémoire d'Ingénieur, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2016.

[16] HEDI Ragad « Etude et conception de nouvelles topologies d'antennes à résonateur diélectrique dans les bandes UHF et SHF » Thèse de doctorat, Université de Nantes ; Université de Tunis El Manar, Tunisie, 2013,

[17] ANNA Niang « Antennes miniatures et structures électromagnétiques avec circuits non-Foster » Thèse de doctorat présenté à l'Université de Paris-Saclay, 2017.

[18] ATTALLAOUI Attallah "Etude D'une Antenne Micro-ruban Circulaire A Bande Interdite Electromagnétique (BIE) 1D A Défauts" Mémoire de Master Université Mohamed Boudiaf M'sila 2018.

[19] Youssef DAHER, "*Antenne – Cours Universitaire*" Université Libanaise, Faculté de Génie, Branche 1.

[20] Alexandre BOYER « Antennes » Support de cours énoncé de travaux dirigés institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2011.

[21] CHOUICHA Mohamed HAISSOUNE Lahcen « Etude de l'influence des différents matériaux sur les performances d'une antenne multicouche fort gain » Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 – Guelma

[22] Picon Odile, « Les Antennes Théorie, conception et applications » Paris : Dunod : L'Usine nouvelle, DL 2009, 2009.

[23] Yamina TIGHILT « Identification des antennes microrubans multicouches par la méthode spectrale et les réseaux de neurones » thèse doctorat en sciences université Ferhat Abbas – SETIF UFAS (Algérie) 2011.

[24] MOULAY Mohammed « Mesure de la Densité de Puissance Rayonnée RF dans le Milieu Ambiant » Mémoire de magister, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem 2012.

[25] MEDDOUR Meriem BENKEDDA Siham « Etude et simulation d'une antenne microbande dans la bande WiFi 5 GHz » Mémoire MASTER ACADEMIQUE Université Kasdi Merbah Ouargla Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication Département d'Electronique et Des Télécommunications 2017.

[26] BENKHERBACHE Ahlam SALEM Asma « Etude D'un Réseau D'antenne Patch Rectangulaire A Bande Interdite Electromagnétique (BIE) 1D Opérant Dans La Bande X » M'sila 2019.

[27] M. CHAABANE Abdelhalim « Conception D'une Antenne Bip Large Bande A Fort Gain » Thèse Doctorat, Université-Ferhat-Abbas-Sétif-1-le-23/02/2017.

[28] <https://www.everythingrf.com/community/ku-band> .



CHAPITRE II

*Les matériaux à Bandes Interdites
électromagnétiques*

II.1 Introduction

Ce chapitre présente les matériaux à bandes interdites, nous rappellerons les propriétés générales des matériaux BIE par un bref historique et quelques définitions et leurs caractéristiques, une description des matériaux BIE et aussi pour la structure. Ce type de matériau a des spécificités bien particulières que nous allons présenter dans ce chapitre.

II.2 Définition et historique

Les matériaux à bande interdite photonique (BIP), plus récemment appelés matériaux à bande interdite électromagnétique (BIE) sont des structures diélectriques ou métalliques composées d'un assemblage périodique de deux ou plusieurs matériaux. Cette périodicité peut se manifester dans une, deux ou trois dimensions sous la forme de plaques, de tiges, et enfin de parallélépipèdes agencés en "tas de bois" (Figure II.1).

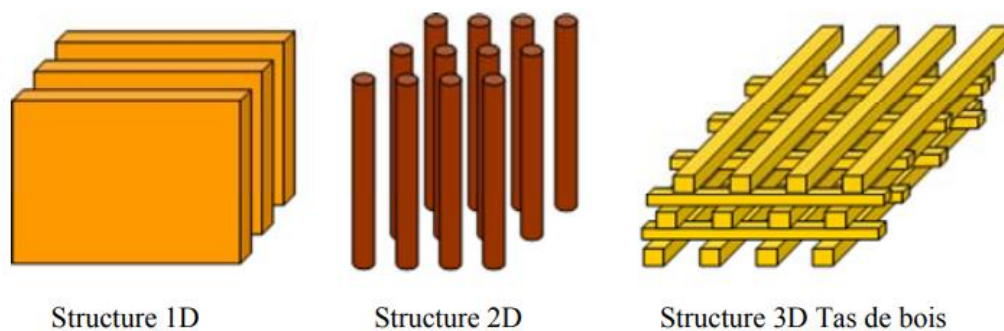


Figure II.1: Structures de matériaux BIE

Dès 1915, le célèbre physicien anglais William Laurence Bragg réalisait le tout premier matériau à bande interdite photonique en se basant sur la réflexion d'ondes électromagnétiques. En empilant successivement des couches transparentes de matériaux d'indices de réfraction différents, il réussit à créer un miroir presque parfait permettant de renvoyer 99.5% de l'énergie incidente (Figure II.2). Ce rendement est obtenu quand la longueur d'onde et l'angle d'incidence du rayonnement sont accordés avec l'épaisseur des strates constituant le matériau BIE. La réflexion est optimale quand les couches sont distantes de $\lambda/4$.

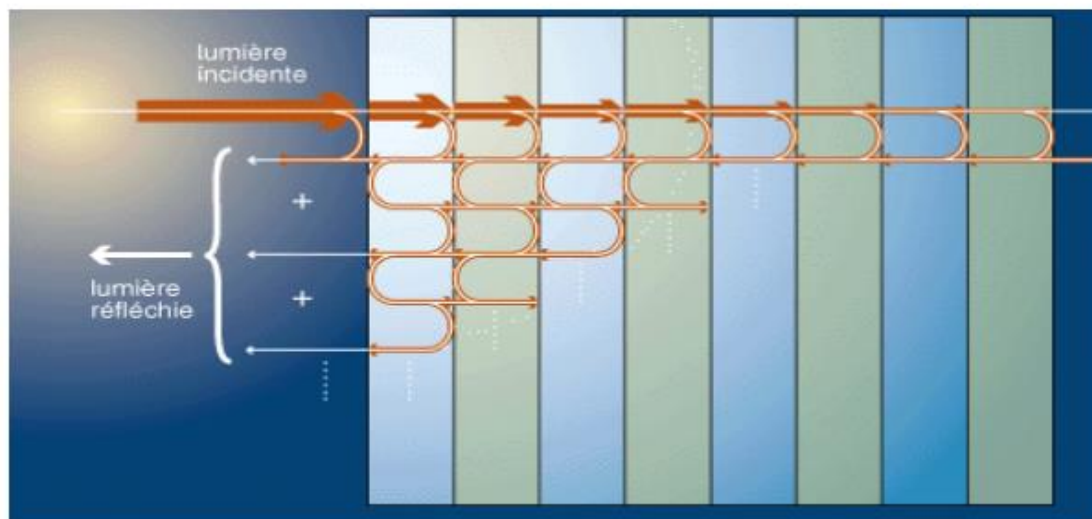


Figure II.2: Principe du miroir de Bragg

En 1987, Eli Yablonovitch généralise cet assemblage périodique unidimensionnel à des structures à deux ou trois dimensions. Il réussit aussi à faire le rapprochement entre les propriétés des cristaux solides et des cristaux photoniques, issus respectivement de l'équation de Schrödinger et des équations de Maxwell. Il a ainsi été démontré la possibilité d'obtenir des bandes de fréquence interdites totales pour des matériaux diélectriques périodiques 3D. Pour ces bandes de fréquences, aucune onde électromagnétique ne peut se propager dans le matériau, et ceci quel que soit l'angle d'incidence considéré. Ces plages de fréquences sont appelées bandes interdites électromagnétiques.

Pour illustrer ces propos, il est possible de caractériser par son coefficient de transmission une structure 1D éclairée en incidence normale comme indiquée sur la figure II.3. Cette structure est un empilement de plaques d'épaisseur $\lambda_g/4$ séparées de $\lambda_0/4$. On constate alors la création d'une bande interdite centrée en f_0 .

Les caractéristiques de cette bande interdite, à savoir sa fréquence centrale, sa largeur fréquentielle et sa "profondeur" peuvent être ajustées en modifiant la géométrie du matériau.

Ces caractéristiques deviennent particulièrement importantes lorsque l'on insère un défaut dans la périodicité [1].

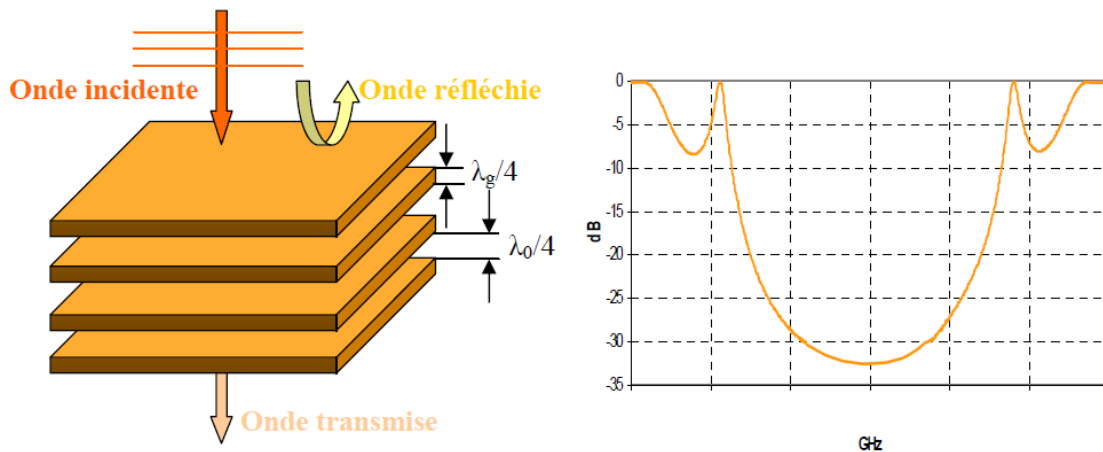


Figure II.3: Caractérisation d'un matériau BIE

II.3 Description des matériaux BIE diélectriques

Pour les matériaux semi-conducteurs, l'objectif était de contrôler les propriétés électriques des matériaux. Avec les matériaux BIE, nous souhaitons obtenir un contrôle de leurs propriétés électromagnétique. Les matériaux BIE sont des structures périodiques à une, deux ou trois directions de périodicité constituées d'éléments diélectriques ou métalliques (Figure II.4). Ils ont la propriété de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques. Ces structures peuvent jouer le rôle de filtre fréquentiel et de filtre spatial [2].

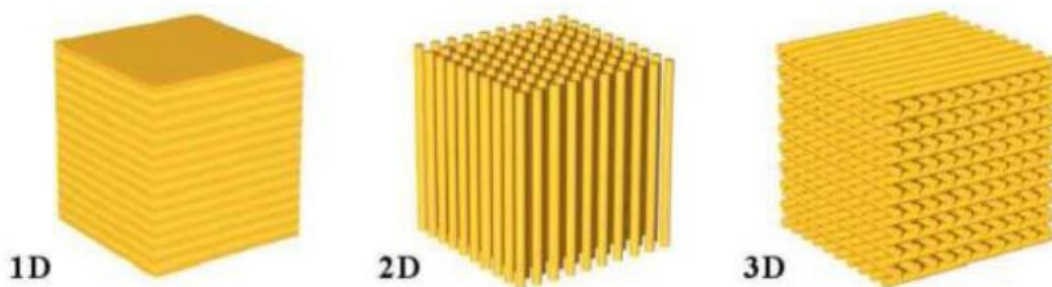


Figure II.4: Exemples de structures périodiques 1D, 2D et 3D.

Puisque l'incidence des ondes est un facteur limitant les performances de ces structures, les chercheurs travaillent dans les domaines utilisant ces matériaux. Ils ont tenté de développer des structures BIE isotropes qui gardent leurs propriétés quel que soit l'angle d'incidence des ondes.

II.3.1 Réseaux unidimensionnels

Les structures 1D sont les plus anciennes bien qu'elles soient depuis peu intégrées aux structures BIE. En effet, elles ont été déjà très longuement étudiées et utilisées comme miroirs diélectriques ou filtres optiques. Elles consistent à empiler plusieurs couches de matériaux avec des permittivités différentes (principe du miroir de Bragg). Les bandes interdites sont d'autant plus grandes que le contraste d'indice est élevé pour des épaisseurs de structures égales au quart de la longueur d'onde guidée (Figure II.5).

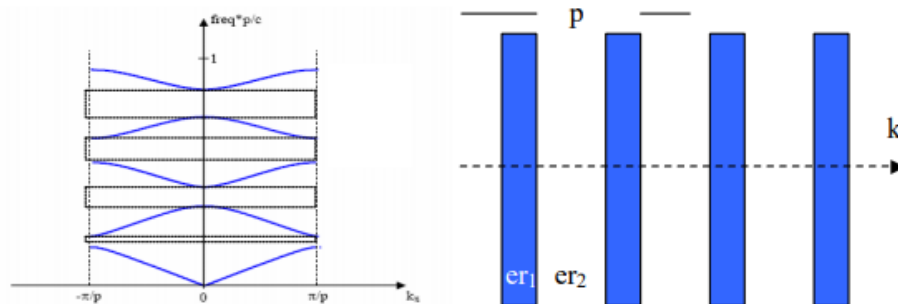


Figure II.5: Structure 1D et son diagramme de dispersion

Lors des réalisations, la conception de ce type de réseau est plus simple. Mais les bandes interdites ainsi créées sont sensibles à l'angle d'incidence de l'onde. Pour obtenir un contrôle de la bande interdite quel que soit l'angle d'incidence, il faut étendre la périodicité à 2 voire 3 dimensions.

II.3.2 Réseaux bidimensionnels

Les matériaux 2D sont des cristaux dont la constante diélectrique est structurée périodiquement dans les deux dimensions et reste homogène dans la troisième. Nous pouvons donc étudier les ondes électromagnétiques incidente à la structure 2D en deux polarisations distinctes : TE (champ électrique parallèle aux barreaux de la structure) et TM (champ électrique perpendiculaire aux barreaux). Le comportement fréquentiel n'est pas forcément identique selon la polarisation. En effet, l'apparition des bandes interdites dépend du contraste d'indice qui doit être plus élevé selon le type de réseau. Nous présentons sur la figure II.6, plusieurs types de réseaux comme le réseau carré, le réseau triangulaire ou le réseau hexagonal [3].

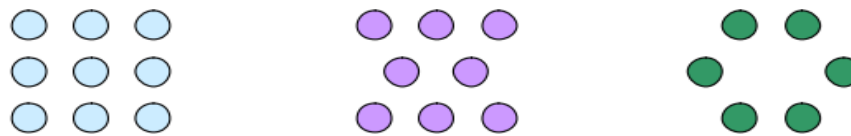


Figure II.6: Exemples de différents réseaux 2D.

Ce sont les paramètres géométriques c'est-à-dire le pas du réseau, le diamètre des tiges (par conséquent le taux de remplissage de la structure), le motif élémentaire et le contraste d'indice qui fixent les largeurs et les positions des bandes interdites et des bandes permises. Les diagrammes de la figure II.7 représentent :

- En abscisse, le parcours fait par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit le contour formé par les points de haute symétrie Γ , X, M de la première zone de Brillouin.
- En ordonnée, la fréquence des modes calculés.

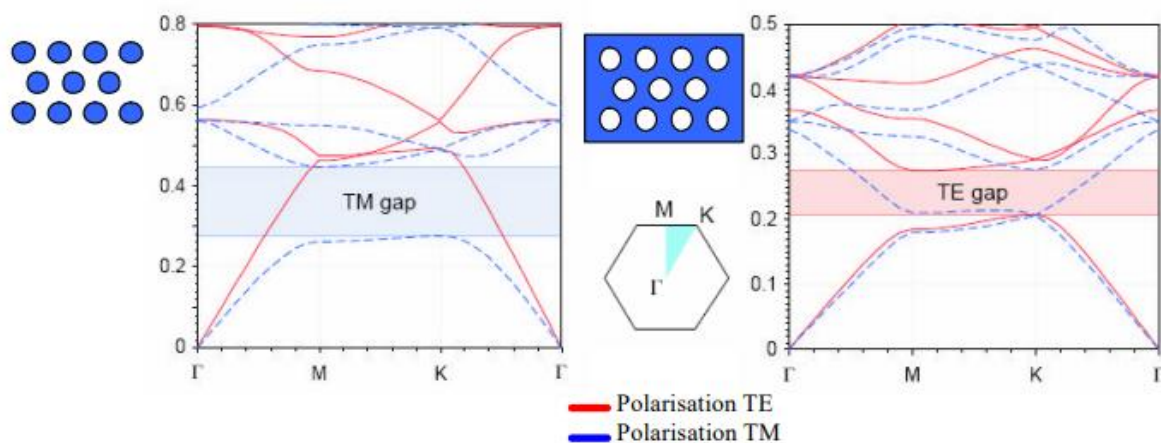


Figure II.7: Bandes interdites en fonction du réseau et du type de polarisation.

Dans les deux cas, nous constatons qu'il n'y a pas de recouvrement des bandes interdites dans les deux polarisations (en étudiant ici les diagrammes de bande d'une structure 2D en polarisation TE et TM). Mais, lorsque les bandes interdites correspondant à chacune des polarisations se recouvrent même de façon partielle, nous parlons alors de bandes interdites complètes. En réalité, il n'y a que dans le cas des structures en trois dimensions que nous pouvons obtenir théoriquement une vraie bande interdite complète, c'est-à-dire dans le

cas où il n'y a aucune propagation possible quelles que soient la polarisation et la direction de l'onde incidente.

II.3.3 Réseaux tridimensionnel

Les structures 3D sont les premières structures étudiées avec les structures 1D ou réseaux de Bragg. L'objectif était d'obtenir des structures 3D fonctionnant sur les mêmes principes que les miroirs de Bragg mais possédant une bande interdite photonique complète c'est-à-dire dans toutes les directions de l'espace. Il existe un grand nombre de structures possibles (**Figure II.8**) [4].

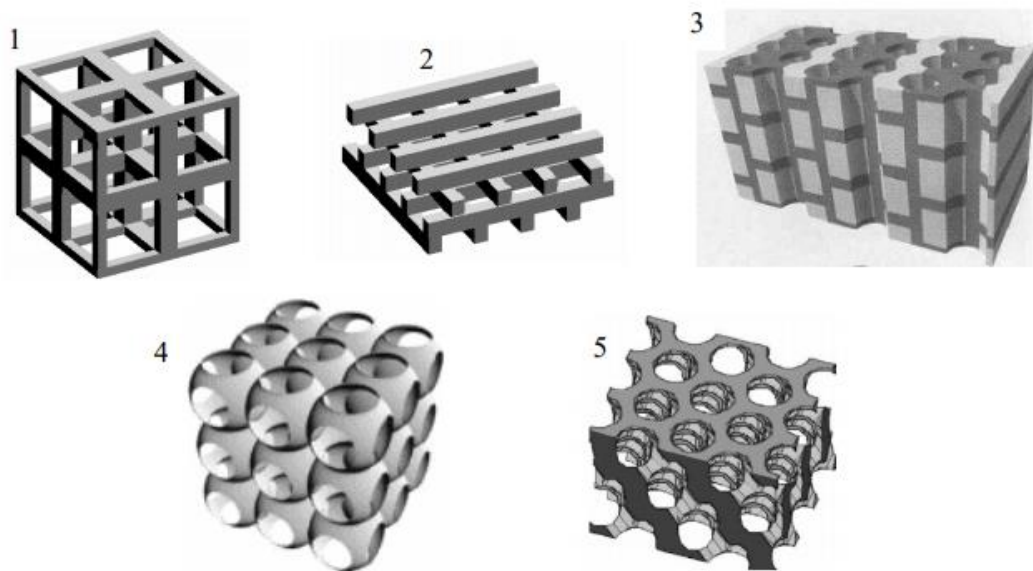


Figure II.8: Différentes structures 3D comme la structure cubique (1), le tas de bois (2), la structure multicouches (3), les opales ou opales inversées (4) et la Yablonoite (5)

En réalité, peu de structures 3D possèdent une bande interdite complète. Ho, Chan et Soukoulis ont été les premiers à montrer théoriquement la présence d'une bande interdite complète dans une structure à symétrie Cubique à Face Centrée (CFC) ou communément appelée structure diamant. Les deux types de structures BIE 3D réalisées dans le domaine des micro-ondes pour des raisons évidentes de contraintes technologiques plus faibles que dans le domaine de l'optique sont la Yablonoite (un diélectrique percé de trous d'air) et la structure tas de bois. Cette dernière est un empilement de tiges diélectriques rectangulaires ou circulaires. Les deux niveaux consécutifs sont perpendiculaires et les deux plans consécutifs

de tiges parallèles sont décalés d'une demi-période. Quelques structures de type tas de bois ont été réalisées dans le domaine des micro-ondes soit avec des tiges d'aluminium, soit avec du silicium grâce à l'empilement des grilles gravées les unes sur les autres avec un pivotement de 90° à chaque étage et en respectant l'alignement de l'ensemble. Auguste Bravais a établi un classement des différentes familles de cristaux. Il a montré qu'ils peuvent se répartir en 7 types de mailles (7 systèmes cristallins) et 14 types de réseaux. Ceux-ci sont à la base des structures périodiques tridimensionnelles [5-6].

II.4 Description des structures BIE métalliques

Les premiers matériaux à bandes interdites ont été réalisés avec des matériaux purement diélectriques pour répondre aux applications dans le domaine de l'optique. En effet dans ce domaine, l'utilisation de structures métalliques était difficile car il y avait de fortes pertes des métaux à ces fréquences. Par contre aux fréquences micro-ondes et radiofréquences, les pertes deviennent négligeables dans certains cas. Les métaux sont donc de quasi parfaits réflecteurs avec de faibles absorptions. Pour des fréquences de l'ordre du gigahertz, l'épaisseur de peau d est très faible devant la longueur d'onde qui est bien en dessous des fréquences optiques. Il y a une cinquantaine d'années, les premières études portaient sur des éléments métalliques possédant différents axes de périodicité dans le but de réaliser des polariseurs et des réflecteurs. Elles ont aussi permis de concevoir des Surfaces Sélectives en Fréquence ou SSF (Figure II.9) mais la plupart concerne des structures monocouches avec des motifs 1D ou 2D. Les structures BIE Métalliques ou encore communément appelées BIEM sont une extension de ces réseaux périodiques métalliques à des réseaux multicouches à plusieurs dimensions [7].



Figure II.9: Exemples de Surfaces Sélectives en Fréquence (SSF).

II.5 Les surfaces partiellement réfléchissantes

Les surfaces partiellement réfléchissantes PRS ou méta-surfaces peuvent être employées dans le système à résonateur BIE. L'objectif de leur utilisation dans l'antenne BIE est d'obtenir de nouveaux profils de phase permettant éventuellement d'améliorer la bande

passante de l'antenne. L'analyse de ces surfaces est généralement effectuée en admettant que la structure est plane, infinie et périodique. Les champs et les courants dans le plan peuvent être alors représentés dans la base des modes de Floquet. Il est suffisant de représenter le champ ou le courant sur un seul motif de la surface périodique pour décrire d'une façon complète le problème. Les motifs de la PRS sont périodiques selon une ou deux dimensions. Excitées par une onde plane, ces surfaces agissent comme des filtres fréquentiels. La PRS 1D a déjà été employée pour construire l'interface supérieure de l'antenne BIE. Elle est en général constituée de tiges métalliques minces et parallèles au champ E de l'excitation. Ce type de surfaces se comporte comme un filtre fréquentiel passe-haut et possède une phase à la réflexion de π en basses fréquences (domaine d'utilisation dans l'antenne BIE). Le dual de cette surface obtenu par l'application du théorème de Babinet, se comporte comme un filtre passe-bas avec une phase à la réflexion de $-\pi$ [8-9].

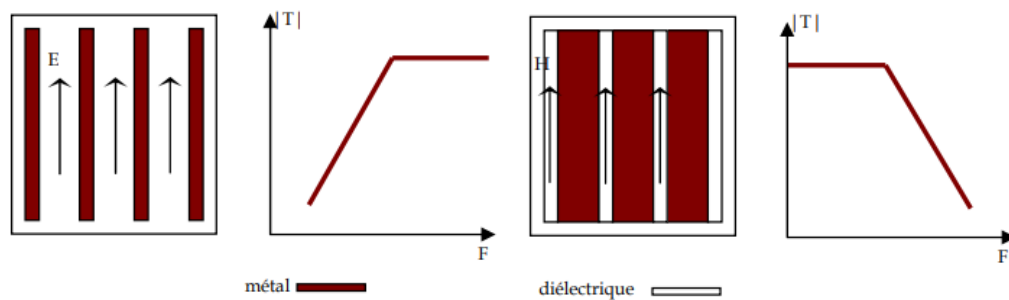


Figure II.10: A gauche, PRS 1D composée de tiges métalliques parallèles au champ E de l'excitation. A droite, son dual obtenu par le théorème de Babinet

Les PRS 2D sont des surfaces composées d'un agencement périodique 2D d'éléments métalliques ou d'ouvertures dans un plan métallique. La réponse fréquentielle d'une PRS 2D dépend de la forme de ses motifs. Une PRS à patchs métalliques déconnectés se comporte comme un filtre passe-bas. Son dual, la grille métallique, est caractérisé par un filtre passe-haut. La PRS composée d'anneaux métalliques, offre un comportement de filtre stop-bande. Son dual, la grille métallique pourvue de patchs déconnectés se comporte comme un filtre passe-bande.

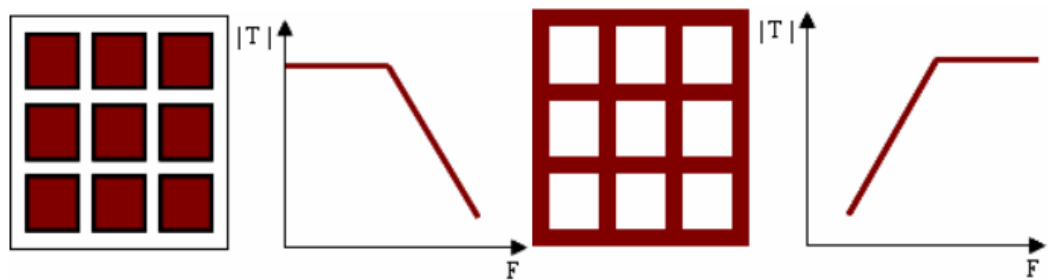


Figure II.11: PRS 2D à comportement passe-bas et passe-haut en transmission. A gauche, une PRS passe-bas à patchs métalliques déconnectés. A droite, une grille métallique à comportement passe-haut.

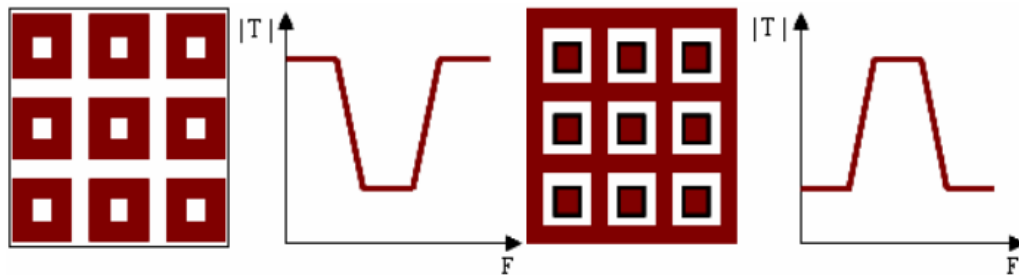


Figure II.12: PRS 2D à comportement stop et passe-bande en transmission. A gauche, une PRS stop-bande à anneaux métalliques. A droite, son dual composé d'une grille métallique dotée de patchs déconnectés, à comportement passe-bande.

Il existe d'autres géométries de motifs pour une surface PRS 2D. Nous citons parmi elles, les croix et les anneaux circulaires qui appartiennent à la catégorie des filtres stop-bande en transmission. Ces géométries ont trouvé des applications dans le domaine de micro-ondes tout comme les géométries classiques à motifs carrés. Les croix sont utilisées pour réaliser des

absorbants à base de surfaces partiellement réfléchissantes pour des applications WLAN 5GHz. Elles sont aussi utilisées pour créer des conducteurs magnétiques artificiels dans une bande de fréquences précise, avec une faible sensibilité par rapport à l'angle d'incidence [10].

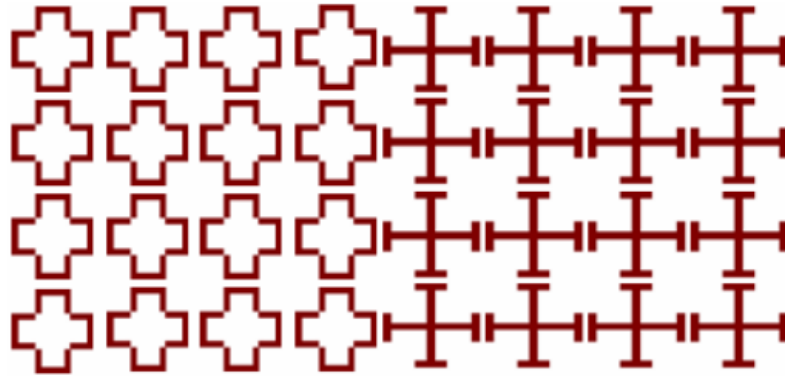


Figure II.13: PRS 2D à motifs croix.

Grâce à leur fonction de filtrage fréquentiel, les surfaces partiellement réfléchissantes sont utilisées dans des systèmes réflecteurs. Elles sont aussi utilisées pour supprimer ou réduire les lobes indésirables dans la bande de fonctionnement d'une antenne. Associées à un plan métallique, elles se comportent comme des surfaces à haute impédance dans une certaine bande de fréquences. Elles sont dans certains cas connectées au plan de masse par l'intermédiaire des vias métalliques. La présence des vias permet la création d'une bande interdite aux ondes de surface en mode TE et TM aux alentours de la fréquence de résonance. L'intérêt de l'utilisation de ce type de surfaces dans la conception de l'antenne BIE, réside dans la fonction de filtrage fréquentiel qu'elles assurent vis-à-vis les longueurs d'ondes incidentes. Ces surfaces vont être employées pour concevoir l'interface supérieure de l'antenne à résonateur BIE. L'objectif est d'améliorer la bande passante en rayonnement de l'antenne limitée par le profil de phase du matériau habituellement utilisé en interface supérieure [11].

II.6 Principe de fonctionnement d'une antenne BIE

Généralement, l'antenne BIE est formée par une surface partiellement réfléchissante (PRS), disposée à une distance d'environ une demi-longueur d'onde, au-dessus d'une source primaire de faible gain, placée sur un plan de masse. L'amélioration du gain de la source primaire est due à la résonance de la cavité et aux multiples réflexions des ondes entre la PRS

et le plan de masse. Le principe de fonctionnement d'une antenne BIE, avec superstrat métallique, est illustré dans la figure (II.14).

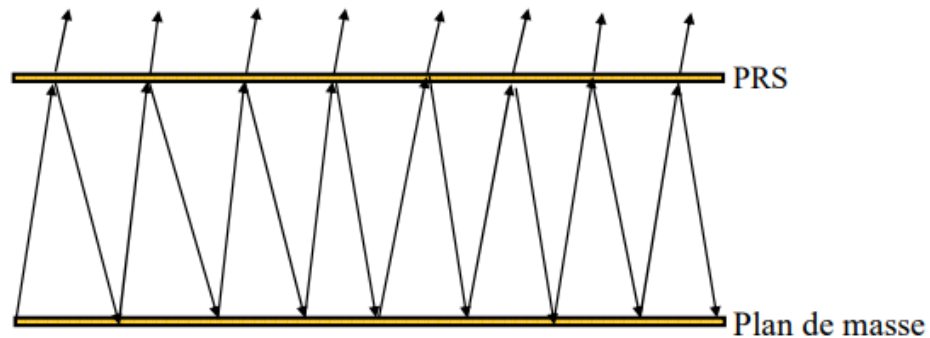


Figure II.14: Réflexion des ondes dans la cavité résonante formée par un plan de masse et une surface PRS

En matière de rayonnement, l'antenne BIE est caractérisée par une forte directivité et une faible bande passante qui dépend du coefficient de qualité de la cavité résonante. L'antenne BIE se comporte comme une ouverture rayonnante avec une distribution gaussienne du champ électromagnétique. Pour une directivité exigée D , l'ouverture de la structure peut être estimée par la formule suivante :

$$A = \frac{10^{D/10} \cdot \lambda_0^2}{0.8\pi^2} \dots \dots \dots (II - 1)$$

Où A est l'ouverture de l'antenne, D est la directivité et λ_0 est la longueur d'onde. [12]

II.7 Caractéristiques et performances de l'antenne à résonateur BIE

La finalité des recherches sur les matériaux BIE est la conception d'antennes directives. Ce paragraphe se propose de présenter et de décrire les différentes étapes nécessaires pour réaliser une telle antenne mais aussi d'expliquer son fonctionnement à travers ses différents paramètres. Dans un premier temps, il faut chercher à identifier le fonctionnement de l'antenne à travers l'adaptation et son impédance d'entrée, puis dans un second temps, à travers son rayonnement et son gain [13].

II.7.1 Adaptation de l'antenne

L'adaptation d'une antenne quelconque est un des objectifs incontournables et primordiaux lors de la réalisation d'une antenne.

II.7.2 Diagrammes de rayonnement et gain

Le diagramme de rayonnement doit présenter un seul lobe principal à la verticale du plan de masse. En effet, la direction de l'énergie émise par le système d'alimentation doit correspondre avec la direction de propagation autorisée par le matériau BIE. Dans ce cas, le dispositif complet aura un fonctionnement optimal. De plus, cette énergie ne doit pas être rayonnée hors du BIE. Il est donc primordial d'utiliser des sources ayant un rayonnement de type antenne plaquée avec un niveau faible des lobes secondaires pour favoriser la direction dans l'axe (Figure II.15) [14].

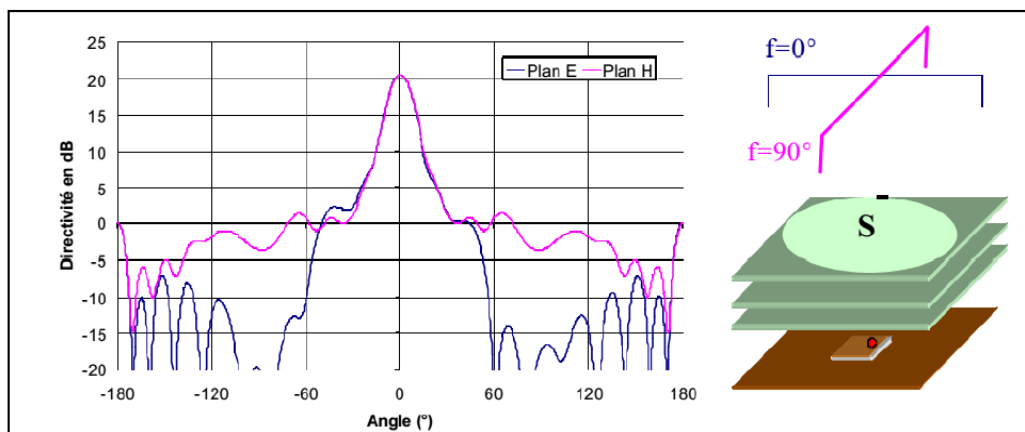


Figure II.15: Diagramme de rayonnement et directivité d'une antenne à résonateur BIE.

II.8. Application des matériaux BIE

L'application de la technologie BIE ou structures BIE (Bande Interdite Electromagnétique) ou EBG (Electromagnétique Band Gap, en anglais) est devenue un thème exaltant plus important pour les ingénieurs spécialisées dans le domaine d'antennes et les chercheurs vu quelle porte des améliorations aux caractéristiques des petites antennes et leurs performances telles que l'augmentation du gain et de l'efficacité de rayonnement.

II.8.1 Fréquences optique :

Les intérêts portés aux matériaux à bande interdite électromagnétique ont tout d'abord été dans le domaine optique.

Les micro-résonateurs :

L'utilisation des défauts ponctuels et linéaires permettent d'obtenir des micro-résonateurs et des guides d'ondes respectivement.

La réalisation des micro-résonateurs est obtenue par inclusion des défauts ponctuels dans une structure à périodique des matériaux BIE. Les premières études sur les micros résonateurs avec des structures bidimensionnelles ont été réalisées en 1997 par Labilloy [15].

Les guides d'onde :

L'idée de réaliser les guides d'onde est apparue en 1994 et les premières réalisations sont arrivées en 1999. Les guides linéiques présentent beaucoup de pertes. Il existe un autre type de guide qu'on appelle guide (coudé guide avec virage) [16].

Filtres et multiplexeurs :

Une fonction importante qu'on peut réaliser avec des matériaux BIE : le multiplexage en longueurs d'ondes (WDM, Wavelength Division Multiplexing). L'objectif est d'insérer ou d'extraire des longueurs d'onde bien précises. Plusieurs réalisations ont montré la possibilité du couplage d'une cavité avec un guide. Par exemple, la réalisation de permet l'extraction ou l'insertion dans un guide d'une longueur d'onde bien précise.

Les fibres optiques :

Les fibres dites sont apparues en 1996 aux universités de Bath et de Southampton. Elles sont constituées d'un cœur de silice pure entouré d'un arrangement régulier de canaux d'air de dimensions microscopiques, disposés parallèlement à l'axe.

Cette fibre à cristal photonique a la faculté de guider un mode fondamental sur une très large bande spectrale.

Des fibres monomodes possédant un effet de bande interdite électromagnétique grâce à une gaine optique périodique, sont également étudiées pour annuler la dispersion chromatique [17].

II.8.2 Domaine des fréquences

Un grand nombre d'équipes de recherche se sont intéressées à l'étude des BIE aux fréquences micro-ondes en raison des multiples applications envisageables dans ce domaine de fréquence. Le secteur des télécommunications avec notamment les antennes, est très impliqué. En effet, on peut utiliser des matériaux à bandes interdites électromagnétiques pour la réalisation de :

Substrats d'antennes : les premières expériences visant à exploiter les BIE diélectriques comme substrat d'antennes ont été menées par E.R. Brown et al. Surfaces à hautes impédances, qui peuvent être utilisées pour améliorer la directivité des antennes.

Peuvent aussi être utilisés dans la réalisation des circuits microondes tels que : filtres planaires, guides, multiplexeurs et amélioration du rendement des antennes par utilisation des substrats à base des matériaux BIE ultraréfractifs [18].

II.8.3 Dans le domaine micro-onde

Un grand nombre d'équipes de recherche se sont intéressées à l'étude des BIE aux fréquences micro-ondes en raison des multiples applications envisageables dans ce domaine de fréquence. Le secteur des Télécommunications avec notamment les antennes, est très concerné. En effet, on peut utiliser des matériaux à bandes photoniques interdites pour la réalisation de :

- **Substrats d'antennes** : les premières expériences visant à exploiter les cristaux électromagnétiques diélectriques comme substrat d'antennes ont été menées par ER. Brown et al.

- **Surfaces à hautes impédances** : peuvent être utilisées pour améliorer la directivité des antennes Les BIE peuvent aussi être utilisés dans la réalisation de circuits micro-ondes tels que :

-filtres planaires ;

-guides ;

-multiplexeurs,

- Amélioration du rendement des antennes par utilisation des substrats à base des cristaux électromagnétique ultra réfractifs [14].

II.9 Conclusion :

Les antennes à bande électromagnétique interdites se caractérisent par leur capacité à fournir un rayonnement plus directif sans nécessiter d'un système d'alimentation compliqué. Son principal inconvénient est la faible bande passante et avec le développement de réseaux d'antenne BIE, c'est essayer d'améliorer cet inconvénient et élargir la bande passante. Dans ce chapitre, une discussion sur la définition et l'histoire des structures BIE, le type de structure BIE, différentes applications des structures BIE.

Bibliographie

- [1] Elisa POINTEREAU “*Etude* d’antennes à bande interdite électromagnétique Omnidirectionnelles en azimut” Thèse de doctorat, université de Limoges, 2007.
- [2] A. POLMAN, P. WITZIUS “Materials science aspects of photonic crystals” Guest editors MRS bulletin August 2001.
- [3] M. PLIHAL, A. A MARADUDIN “Photonic band structure of two-dimensional systems: the triangular lattice” Phys. Rev B / vol 44 1991 – pp 8565.
- [4] G.S SMITH, M.P KESLER, J.G MALONEY “Dipole antennas used with all dielectric photonic band gap reflector: gain, field, patterns and input impedance crystals” M.O.T.L / Vol 21, N°3, May 5 1999 – pp191-196.
- [5] M.M SIGALAS, R. BISWAS, Q.LI, D. CROUCH, W. LEUNG, R. JACKOBSSWOODBURY, B.LOUGH, S.NIELSEN , S. McCALAMONT, G. TUTTLE, K.M. HO "Dipole antennas on photonic band gap crystals- Experiment and simulation " M.O.T.L / Vol 15, N°3, June 20 1997 – pp153-158.
- [6] G. KIRIAKIDIS, N. KATSARAKIS “Fabrication of 2-D and 3-D PBG crystals in the GHz and THz regions” Mater. Phys. Mech (2000).
- [7] M. M. SIGALAS, C. T. CHAN, K. M. HO and C. M. SOUKOULIS “Metallic photonic band-gap materials” Appl. Phys letters (1995).
- [8] T. Jaffre. “Caractérisation des matériaux à bande interdite électromagnétique multipériodiques et leurs applications aux antennes”. Thèse de doctorat, Université de Limoges n°3-, 2005.
- [9] E. Rodes. “Nouveaux concepts d’antenne à base de matériaux BIE métalliques. Application aux réseaux de télécommunications.” Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2006.
- [10] G.I. Kiani, A.R. Weily, K.P. Esselle. “Frequency selective surface absorber using resistive crossdipoles”. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 4199–4202, 2006.
- [11] par Lina MOUSTAFA. "Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et systèmes" Thèse Doctorat de l’université de limoges Discipline, 2009

- [12] M. CHAABANE Abdelhalim “CONCEPTION D'UNE ANTENNE BIP LARGE BANDE A FORT GAIN “ Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2017.
- [13] HAMDIKEN. N "Analyse d'une antenne microbande circulaire par la méthode neurospectrale " thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna, 2010.
- [14] BENKHERBACHE Ahlam SALEM Asma “Etude D'un Réseau D'antenne Patch Rectangulaire a Bande Interdite Electromagnétique (BIE) 1D Opérant Dans La Bande X” mémoire de Master, université de M'sila 2019.
- [15] M. LONCAR, D. NEDELJKOVIC, T. p. Pearsall, J. Vuckovic, A. Scherer, S. Kuchinsky, et D.C. Allan, “Experimental and theoretical confirmation of Bloch-mode light propagation in planar photonic crystal waveguides”, Appl. Phys. Lett., vol.80, p. 1689-1691, 2002.
- [16] T. BABA, N. FUKAYA, et J. Yonekura, “observation of light propagation in photonic crystal optical waveguides with bends”, Electron. Lett., vol. 35, p. 654-655, 1999.
- [17] ABDELWAHEB OURIR “Applications de matériaux bandes interdites photoniques et de métamatériaux en télécommunications ” Thèse de doctorat, université de paris xi d'orsay, december 2006.
- [18] MANSOUR Razik, HADJI Mohammed Khalil “Étude d'une antenne micro ruban à Bande interdite Électromagnétique (BIE) 1D à défauts” mémoire de Master,



CHAPITRE III

Résultats & discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, en premier, nous avons étudié une antenne patch triangulaire à substrat BIE alimentée par une ligne micro-ruban que nous l'avons utilisée pour le réseau d'antennes à deux patches alimentés en série, et pour le réseau à deux patches alimentés en parallèle. Nous avons comparé les différentes structures dans le but d'avoir les meilleures caractéristiques de ces antennes, après nous avons étudié l'influence des paramètres d'un réseau d'antennes patches à 2 éléments de forme triangulaire à substrats **BIE** à 2D sur la fréquence de résonance, la bande passante ainsi que la directivité de cette antenne, en utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel *CST MICROWAVE STUDIO*.

III.2 Présentation de l'outil de simulation CST

III.2.1. Description du logiciel de simulation CST Studio Suite

Fondé en 1992, le logiciel de simulation électromagnétique CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et de développement dans les solutions les plus efficaces et précises de calcul pour la conception électromagnétique. CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 dimensions basé sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales (FIT, Finite Integration Technic) [1]. Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3D de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle. De plus, contrairement à la plupart des logiciels de simulation électromagnétique, CST discrétise la forme intégrale des équations de Maxwell plutôt que leurs formes différentielles, et ce qui est l'une de ses caractéristiques clé de ce simulateur. CST Microwave Studio fait partie de CST DESIGN STUDIO suite, et offre un certain nombre de solveurs différents selon le type d'application et du problème rencontré [2].

III.2.2. Modules de CS

L'outil CST est constitué d'un certain nombre de modules appelés « solveurs ».

a) Un solveur transitoire 

Il s'agit d'un module 3D général qui permet d'obtenir des simulations en temps réel, ce qui peut être intéressant pour étudier la propagation du champ dans un composant électronique en fonction du temps.

b) Un solveur fréquentiel 

Comme le solveur transitoire, il est constitué d'un solveur général basé sur une méthode fréquentielle. Le type de maillage change selon la structure étudiée.

c) Un solveur intégral 

Ce solveur est dédié aux plus grandes structures électriques. Il se fonde sur la méthode des moments avec une formulation intégrale des champs électriques et magnétiques. Afin de réduire la complexité numérique l'approche MLFMM (Multi Level Fast Multipole Method) est utilisée.

d) Un solveur modal 

Ce solveur est dédié à la simulation des structures fermées résonantes. Les résultats qui peuvent être obtenus sont par exemple la distribution des modes ainsi que les fréquences de résonance de la structure [3].

III.2.3. La méthode FIT utilisée par le logiciel CST

La FIT est utilisée par le logiciel d'analyse électromagnétique 3D Microwave Studio de CST qui présente de nombreuses optimisations de calcul et une interface graphique conviviale, elle est appliquée dans le domaine temporel. La discrétisation des dérivées temporelles est faite par le schéma leap-frog. L'utilisation ici de la forme intégrale locale permet d'appliquer la technique des PBA (Perfect Boundary Approximation). Cette technique découpe une cellule élémentaire en deux et assigne à chacune des parties un matériau différent. La frontière entre les deux matériaux peut être une surface de forme quelconque. Pour des structures relativement complexes géométriquement ou contenant des singularités, la technique PBA diminue significativement le nombre de mailles nécessaires. Grâce à cette technique de maillage, Microwave Studio peut prendre par exemple en compte les épaisseurs des feuilles métalliques sans avoir besoin de les mailler directement et ce qui nous fait gagner du temps en termes de calcul.

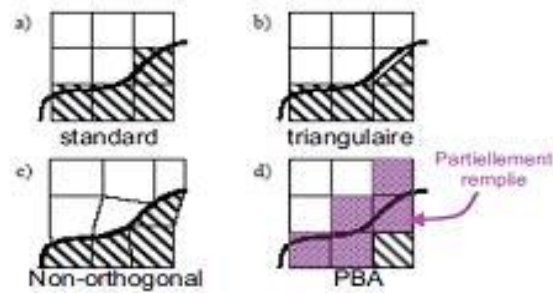


Figure III.1: Différents maillages et approximations.

III.2.4. La méthode qui décrit la structure

Les méthodes qui décrivent la structure sont :

- Modélisation du diélectrique.
- Modélisation du conducteur interne à l'intérieur de la partie diélectrique.

Après démarrage de l'environnement CST de conception et la création d'un nouveau projet CST Microwave Studio, la sélection du modèle de base doit être le plus proche possible du diélectrique à concevoir.

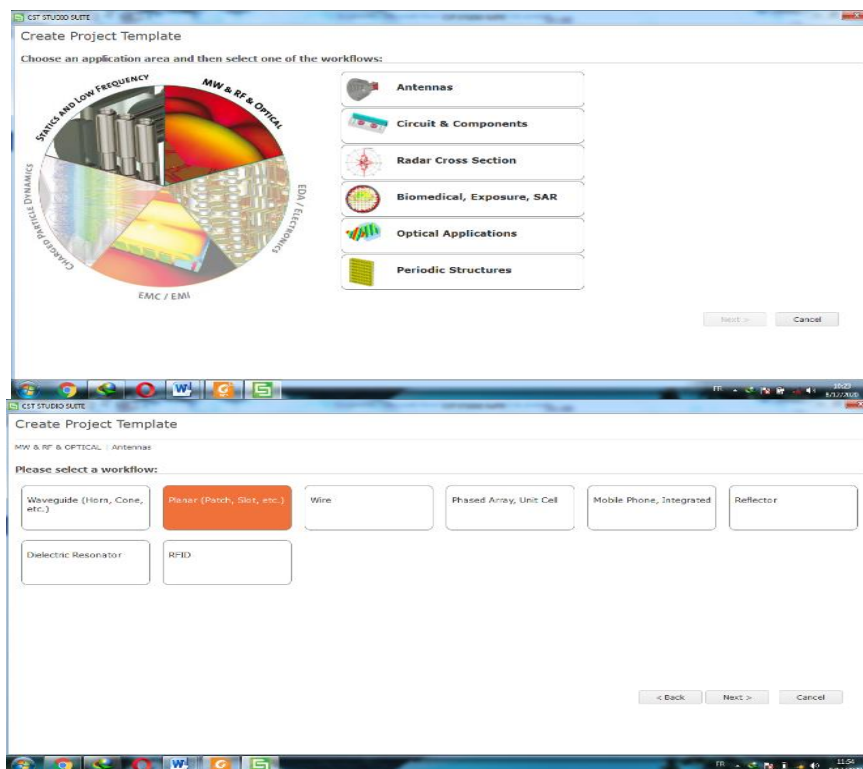


Figure III.2: Début de création un nouveau projet en *CST MICROWAVE STUDIO*

III.2.5. Etapes à suivre pour une simulation réussie

Voici les étapes nécessaires pour la réussite d'une simulation :

- Définition des unités ;
- Définition des matériaux de base ;
- Modélisation de la structure ;
- Définition de la gamme de fréquence ;
- Définition des ports et des conditions aux limites.
- Début de la simulation.

Après avoir défini ces paramètres, la simulation est apte à débiter.

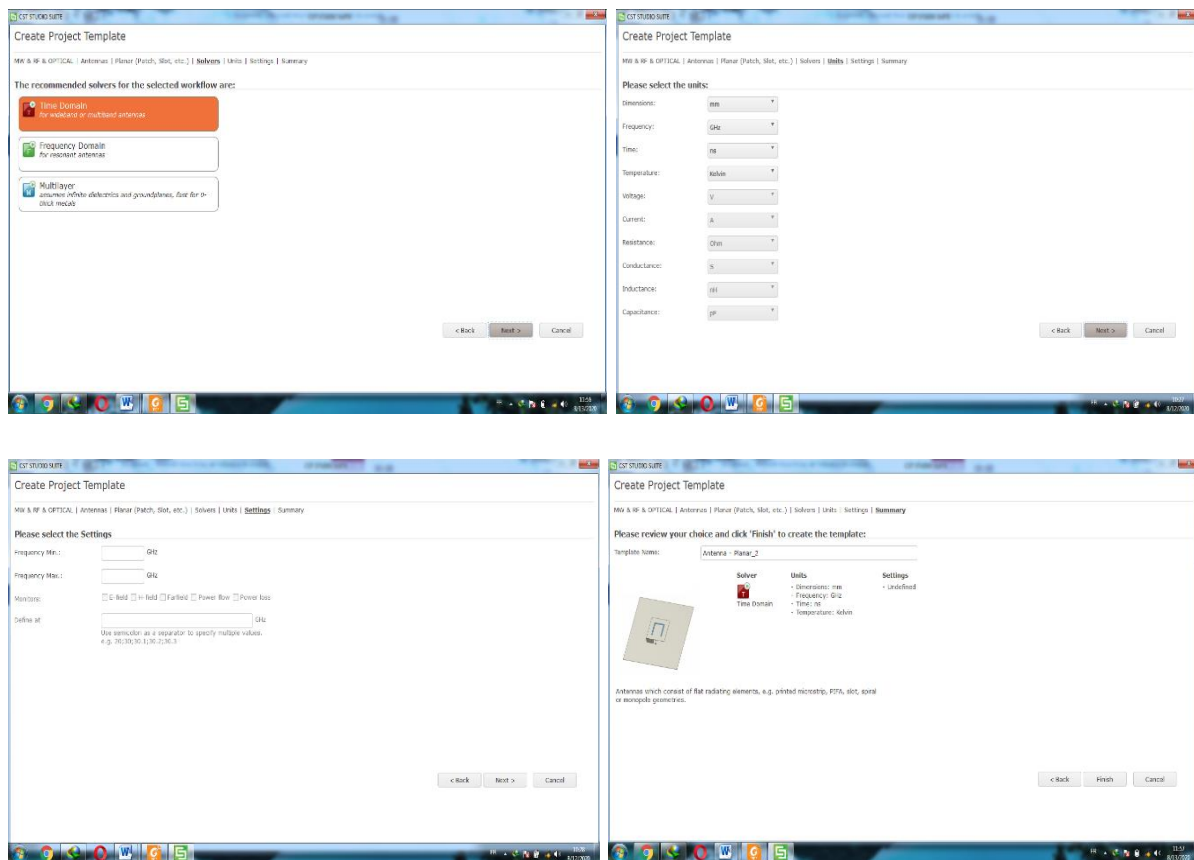


Figure III.3 : les étapes primaire (réglage) pour créer un projet par CST MICROWAVE STUDIO

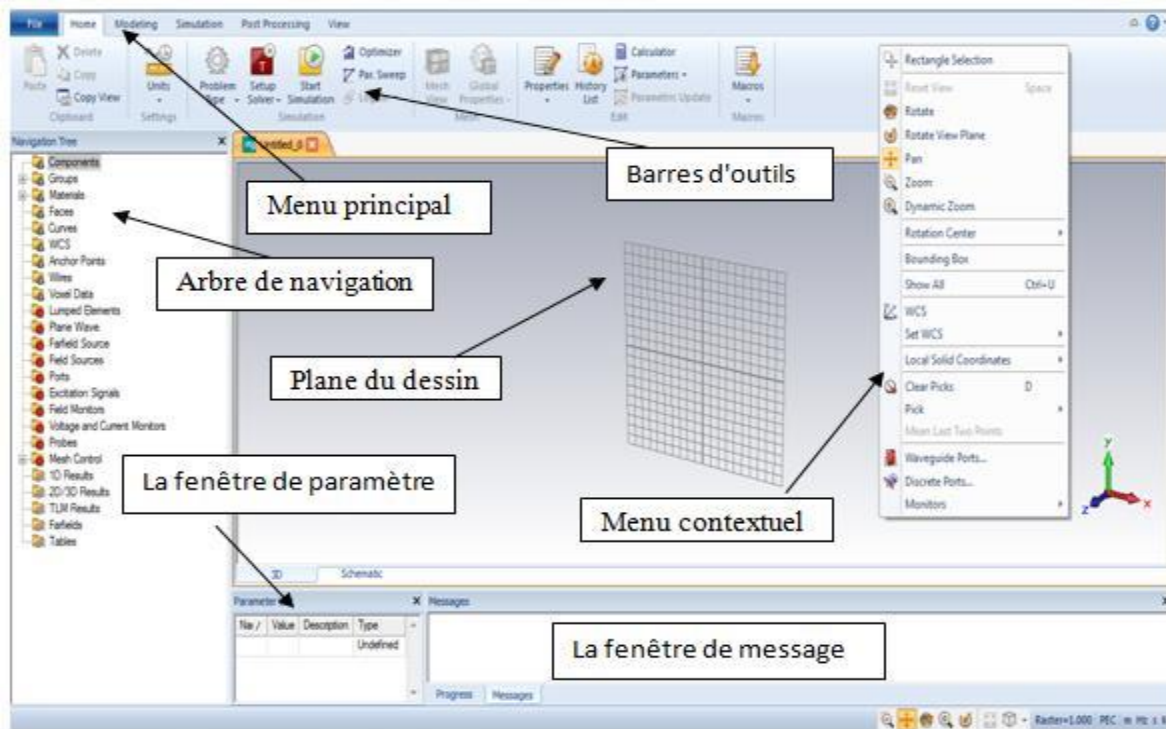


Figure III.4 : *l'interface de CST MICROWAVE STUDIO*


- L'arbre de navigation est un élément essentiel de l'interface utilisateur. De là, nous pouvons accéder aux éléments structurels ainsi que les résultats de simulation. Les sections suivantes expliquent les différents articles dans cette fenêtre d'arbre.
- Les menus contextuels sont un moyen souple d'accéder à des commandes de menu les plus fréquemment utilisées pour le contexte actuel. Le contenu de ce menu qui peut être ouvert en appuyant sur le bouton droit de la souris.
- Le plan du dessin est le plan sur lequel nous allons dessiner des primitives de la structure. Comme la souris n'est qu'un localisateur 2D, même lors de la définition des structures 3D, les coordonnées doivent être projetées sur le plan du dessin, afin de spécifier un emplacement 3D. Comme on peut modifier l'emplacement et l'orientation du plan de dessin à l'aide de différents outils, cette caractéristique rend le modeler très puissant.
- La fenêtre de paramètre affiche une liste de tous les paramètres précédemment définis avec leurs valeurs actuelles.

- La fenêtre de message affiche le texte de l'information (par exemple la sortie du solveur) le cas échéant
- Les autres éléments de l'interface utilisateur sont standards pour une application basée sur Windows.

III.3. Les étapes de création d'une antenne

Lorsque nous arrivons à l'interface du logiciel qui nous permet de créer notre nouveau projet, nous commençons à créer les composants de notre antenne, étape par étape comme suivant :

III.3.1. Créer un plan de masse :

1. Activez l'outil de briques en cliquant sur l'icône  correspondante dans la barre d'outils de l'objet ;
2. On peut définir un point de départ par un double-clic sur un emplacement sur le plan du dessin ;
3. Maintenant, on peut sélectionner la base de la face de coin de la brique sur le plan du dessin par double-clic dessus ;
4. Ensuite, définir la hauteur de la brique en faisant glisser la souris. Double-cliquez pour fixer la hauteur de la brique ;
5. Enfin, une boîte de dialogue s'ouvre où on peut introduire les valeurs numériques de toutes les coordonnées et choisir le matériau dans ce cas (PEC : perfect electric conductor) et cliquez sur OK.

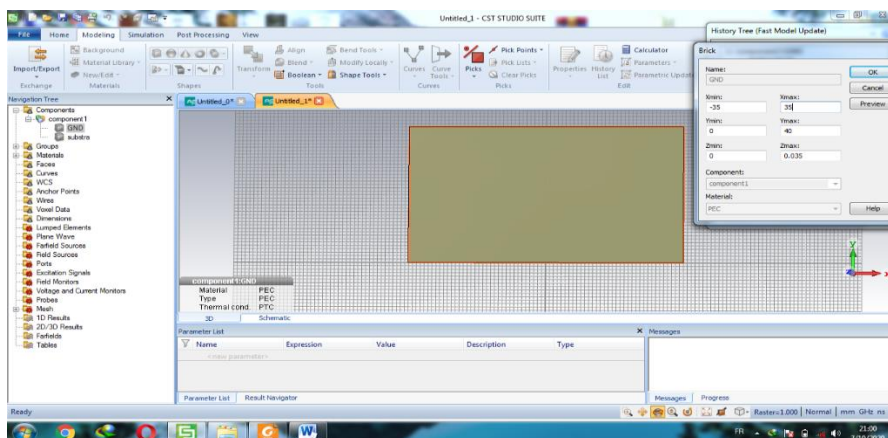


Figure III.5 : Créer un plan de masse.

III.3.2. Créer un substrat diélectrique

Le substrat est constitué de quatre couches diélectriques. Pour créer les couches 1 et 3 il faut :

1. choisir dans la barre d'outils l'icône correspondante et les mêmes étapes que celles du plan de masse.
2. En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas « vacuum : air » puis cliquez sur OK
3. Pour créer les couches 2 et 4 mêmes étapes de la création les couches 1 et 3, mais le matériau dans ce cas « Epoxy resin ».

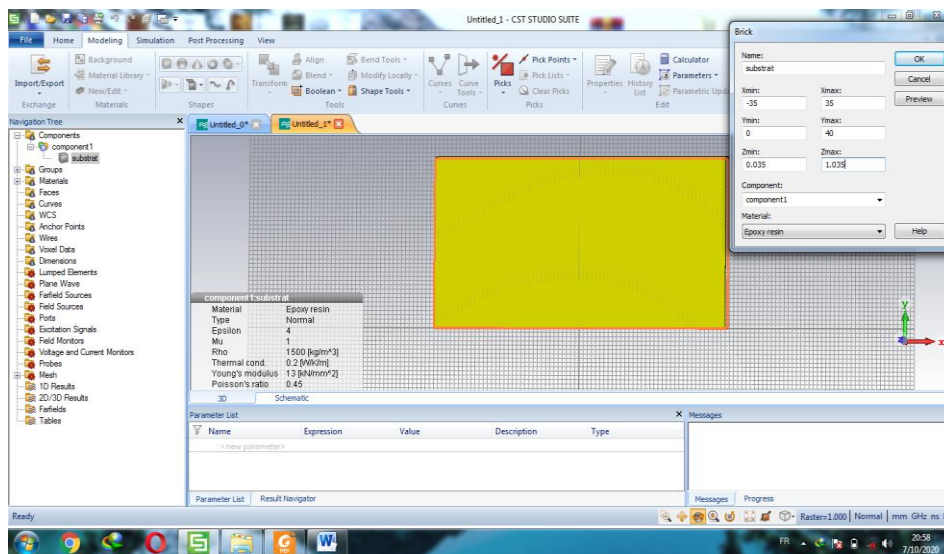


Figure III-6 : Créer des substrats diélectriques.

III.3.3. Créer des trous dans le substrat

Pour créer les trous il faut :

1. Activez l'outil de *cylinder* en cliquant sur l'icône correspondante dans la barre d'outils de l'objet.
2. En utilisant la boîte de dialogue on introduit les valeurs numériques et choisi le matériau dans ce cas (vacuum : vide).
3. Une nouvelle boîte de dialogue s'ouvre et on choisit (cut away highlighted shape), et cliquez sur OK.

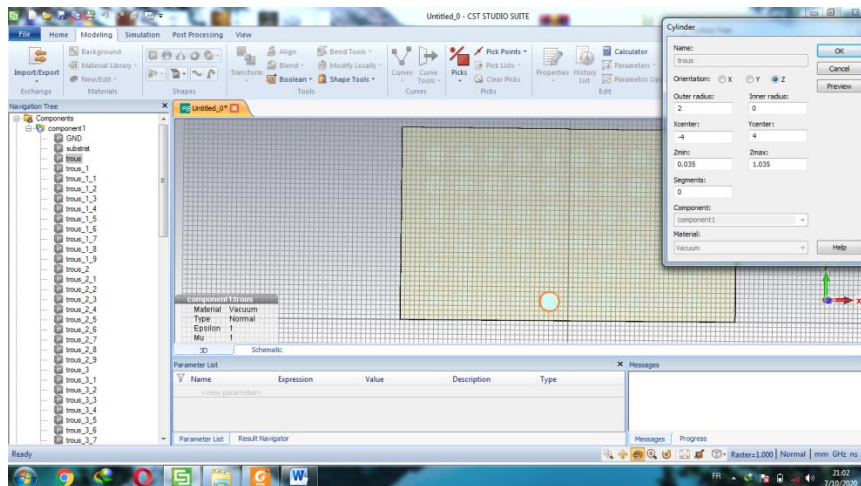



Figure.III-7 : Créer Un Trou.

III.3.4. Créer un patch

Pour créer les 02 éléments du réseau patches il faut :

1. Choisir dans la barre d'outils l'icône  correspondante et les mêmes étapes du plan de masse ;
2. En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas (PEC) et cliquez sur OK ;
3. On va refaire ces étapes pour le deuxième élément du réseau.

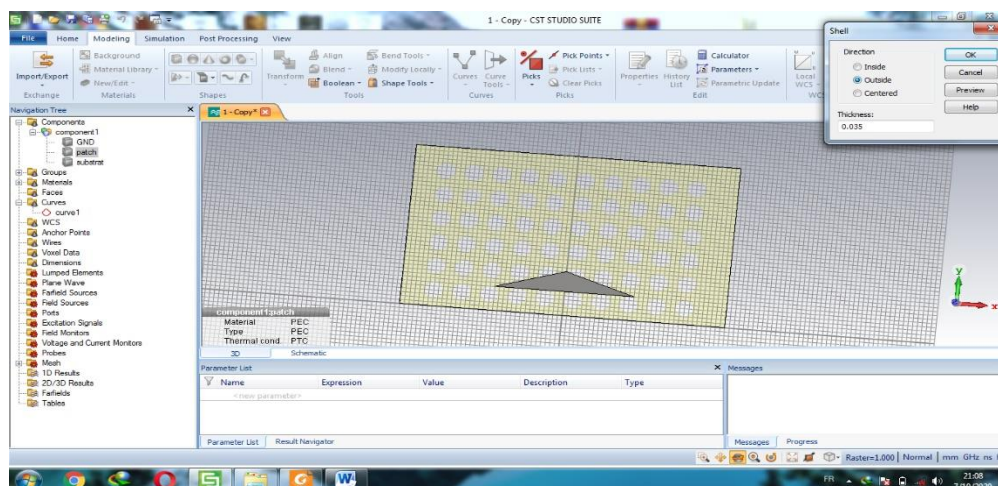


Figure III.8 : Créer le premier élément du réseau.

III.3.5. Créer une encoche de patch

Pour créer les 02 encoches de patch il faut :

1. Choisir dans la barre d'outils l'icône correspondante et les mêmes étapes du plan de masse ;
2. En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas (PEC) et clique sur OK ;
3. On clique sur le patch, ensuite sur la barre d'outils on clique sur et choisir « subtract », après une autre clique sur l'encoche qu'on a créé puis sur Entrée ;
4. Les mêmes étapes pour la deuxième encoche ;
5. On va refaire ces étapes pour le deuxième élément ;

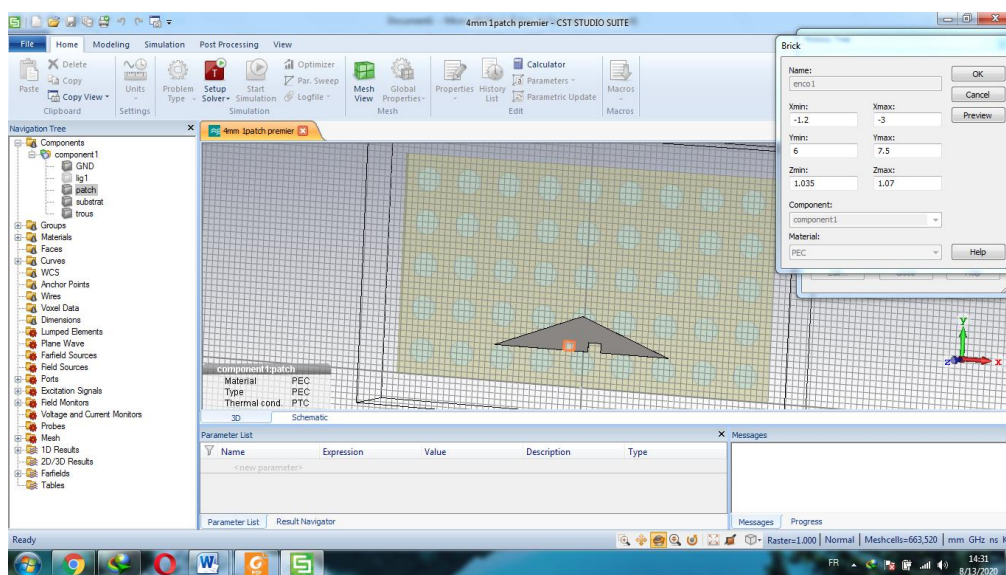


Figure III.9 : Créer les encoches des éléments rayonnants.

III.3.6. Créer la ligne microbande

Pour créer la ligne microbande de patch il faut :

1. Choisir dans la barre d'outils l'icône correspondante et les mêmes étapes du plan de masse ;
2. En utilisant la boîte de dialogue, on va introduire les valeurs numériques et choisir le matériau dans ce cas (PEC) et clique sur OK ;
3. On clique sur le patch, ensuite sur la barre d'outils on clique sur et choisir « add », après une autre clique sur l'encoche que l'on a créé puis sur Entrée ;
4. On va refaire ces étapes pour le deuxième élément ;

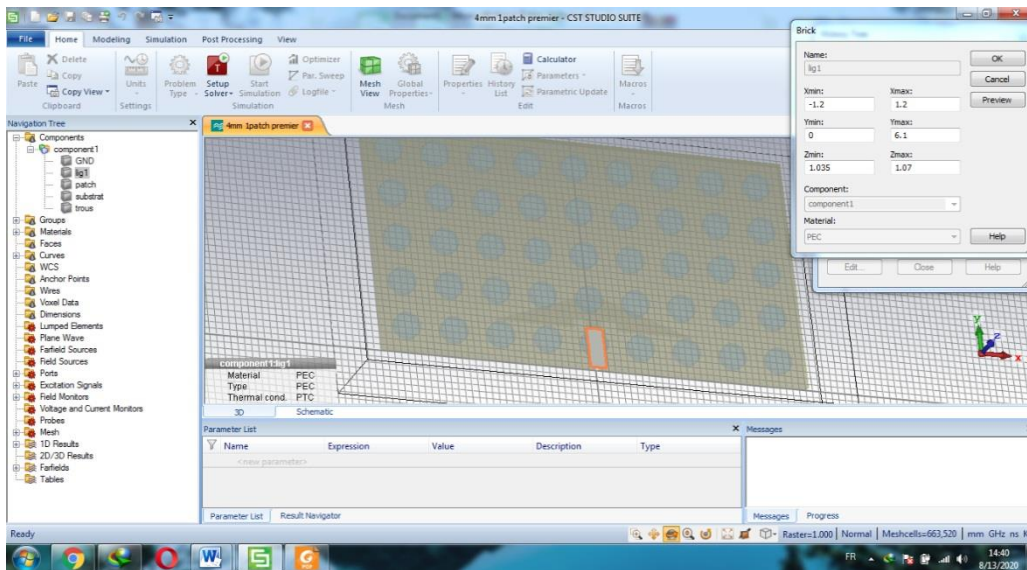


Figure III-10 : Créer les lignes microbandes

III.3.7. Définir le port

1. Activez l'outil de PORT en cliquant sur l'icône correspondante dans la barre d'outils de l'objet ;
2. En utilisant la boîte de dialogue s'ouvre on va introduire l'emplacement de ce port suivant x, y et z.

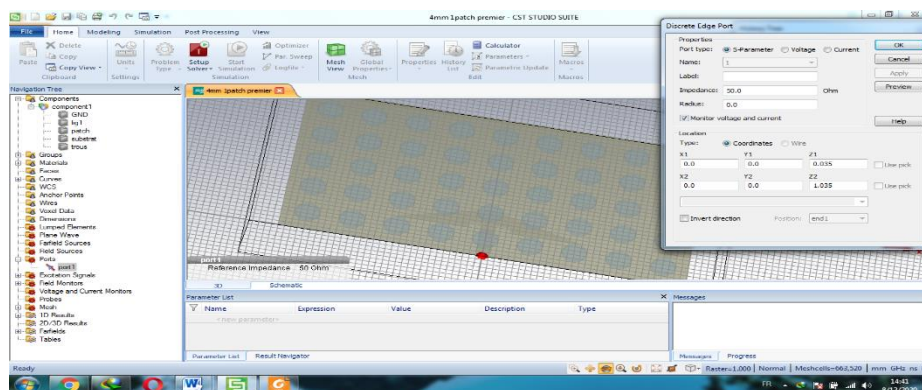


Figure III-11 : Définir le port.

III.3.8. Définir le domaine de fréquence

1. Activez l'outil de fréquence en cliquant sur l'icône correspondante dans la barre d'outils de l'objet ;

2. En utilisant la boîte de dialogue on limite le domaine de fréquence et cliquez sur OK.

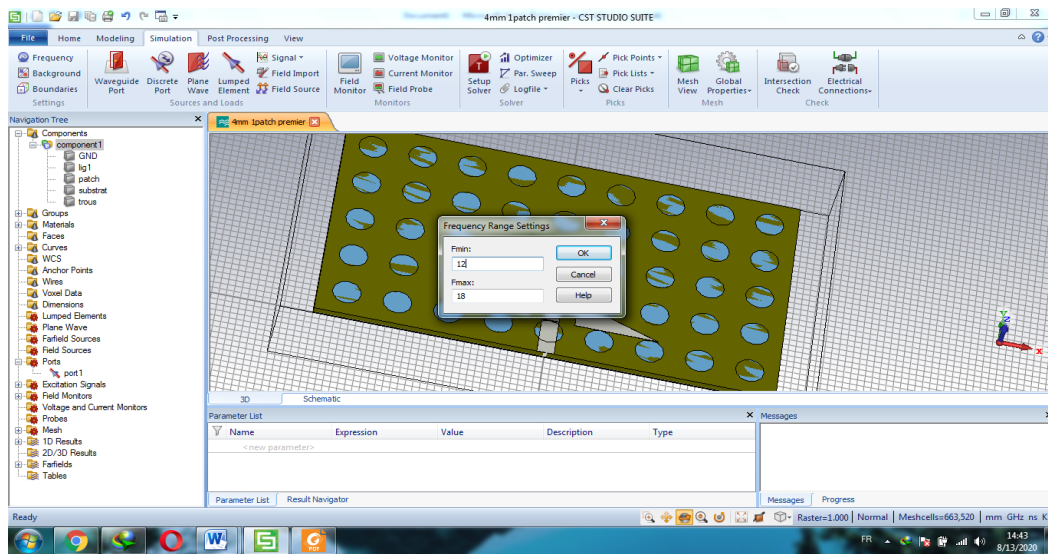


Figure III-12 : Définir le domaine de fréquence.

III.3.9. Définir les conditions au bord

1. Activez l'outil de condition au bord en cliquant sur l'icône correspondante dans la barre d'outils de l'objet ;
2. En utilisant la boîte de dialogue on choisit « open add space » sur toutes les directions dans notre cas et cliquez sur OK.

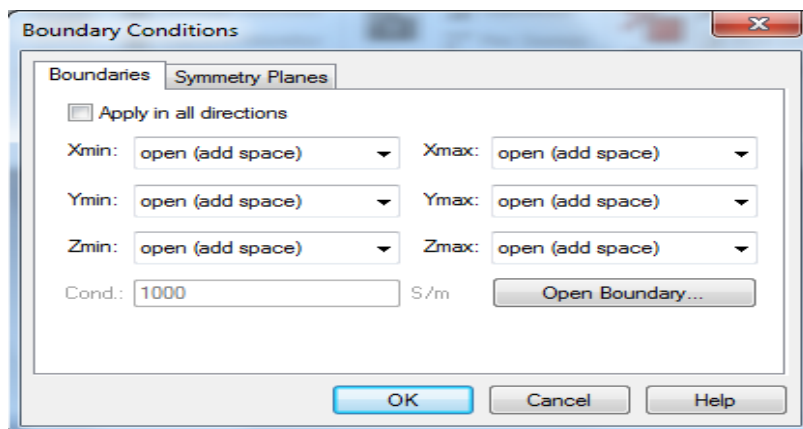


Figure III-13 : Définir les conditions au bord.

III.3.10. La simulation

Pour lancer la simulation il faut :

1. Activez l'outil de simulation en cliquant sur l'icône correspondante dans la barre d'outils de l'objet.
2. En utilisant la boîte de dialogue on peut choisir la précision
3. Cliquez sur <Start>

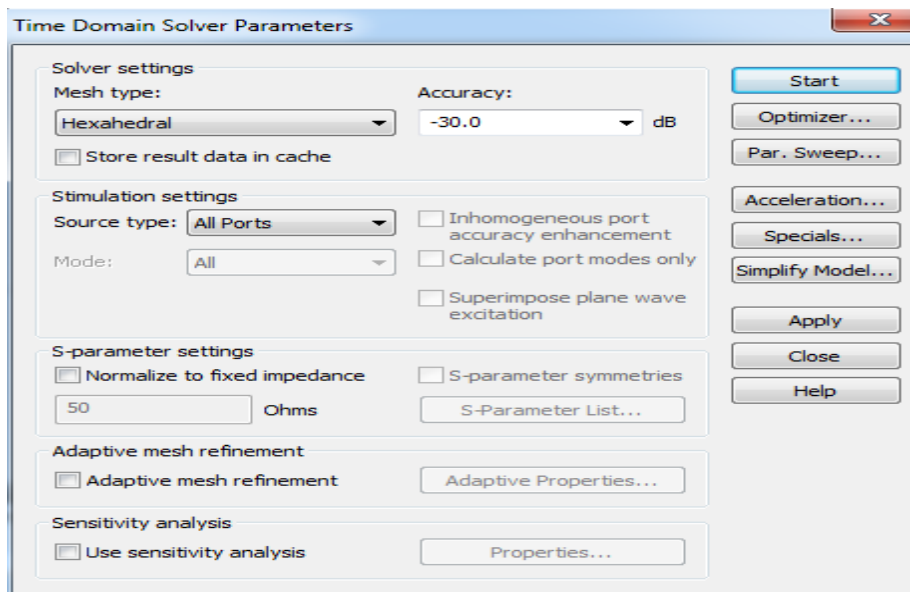


Figure III-14 : Choisir la précision

III.4. Influence des paramètres de l'antenne sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité

III.4.1. Présentation de la structure d'un seul élément

La structure de base que nous avons adoptée pour notre antenne est une structure composée d'un plan de masse, d'un substrat BIE de type 2D qui est constitué de deux matériaux différents : substrat comme une couche diélectrique d'une permittivité de $\epsilon_{r1}=4$ « Epoxy resine », d'épaisseur $h_1=1$ mm contenant des trous d'une permittivité de $\epsilon_{r2}=1$ « vacuum », et même épaisseur $h_2=1$ mm, la base et la hauteur d'élément rayonnant sont $L_p=30$ mm, $H=5.668$ mm et les dimensions du substrat $a=36$ mm, $b=64$ mm. Cette antenne est alimentée par une ligne microbande.

<i>Dimensions paramétriques</i>	<i>Valeur (en mm)</i>
La base de patch, B_p	30
La hauteur de patch, H_p	5.668
Longueur ligne alimentation, L_l	6
Largueur ligne alimentation, W_l	2.4
Largueur de l'encoche 01 En_1	1.8
Largueur de l'encoche 02 En_2	2.2
Largueur substrat, W_s	64
Longueur substrat, L_s	36
Hauteur de la couche, $\epsilon_{r1}=4$	1
Hauteur des trous, $\epsilon_{r2}=1$	1

Tableau III.1 : Dimensions de l'antenne patch triangulaire

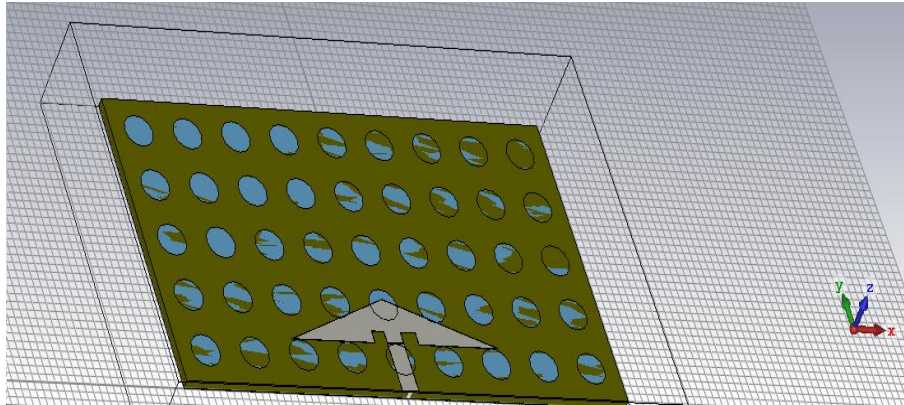


Figure III-15 : *La structure d'antenne 1 patch.*

III.4.2. Structure d'antenne réseau à deux patches triangulaires

En utilisant les mêmes dimensions citées précédemment et un espacement de $\lambda/2$ entre les deux patches, un réseau d'antenne à deux patches triangulaires est conçu. Nous optant pour deux méthodes d'alimentation, la première est une alimentation série utilisant un transformateur quart d'onde et la deuxième est une alimentation parallèle par le biais d'un réseau d'alimentation sous forme d'une jonction **T** (diviseur de puissance) excité par une source **50 Ω**. Figure.III.16 montre la géométrie des antennes proposées.

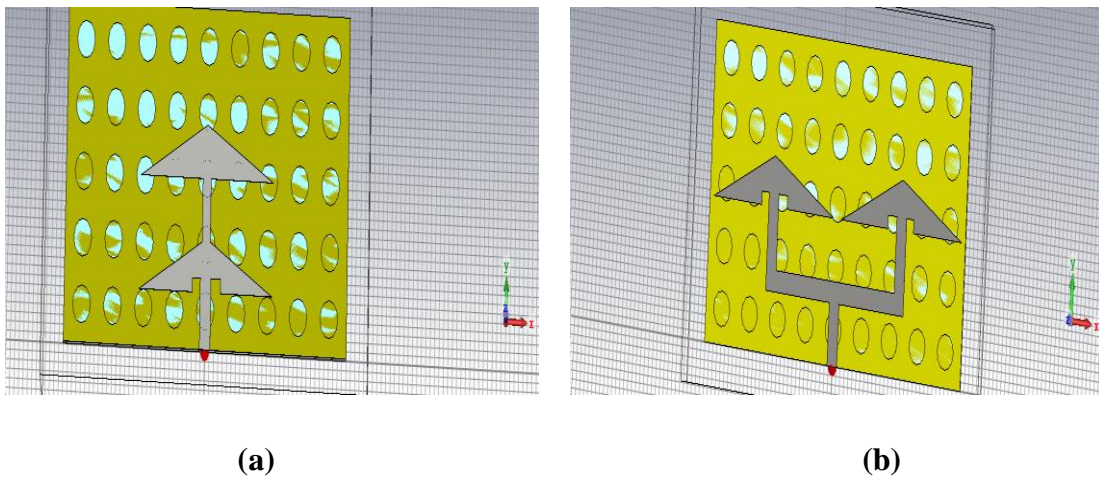


Figure III.16 : *Antenne réseau de 2 patches rectangulaires alimentés : a) en série et b) en parallèle*

III.4.3. Influence des paramètres de l'antenne sur ses caractéristiques

Dans cette partie on étudie l'effet des paramètres de l'antenne sur la variation de la directivité, la fréquence de résonance et de la bande passante.

Premièrement on compare un réseau d'antenne à 2 patches (pour une alimentation série et parallèle) avec une antenne 1 patch, ensuite on compare une structure à substrat simple avec une structure avec substrat à BIE pour un seul élément (patch), après l'influence des paramètres géométriques (forme de réseau de trous, épaisseurs des substrats, la longueur de base du patch L_p et la hauteur de patch H) et la permittivité du substrat et les trous sur la directivité, la fréquence de résonance et la bande passante pour un réseau d'antenne à 2 patches et avec un substrat à BIE.

III.4.4. Comparaisons entre un réseau d'antenne à deux éléments (pour une alimentation série et parallèle) et une antenne d'un seul élément :

Les résultats sont obtenus en cliquant sur l'icône  dans l'arbre navigation.

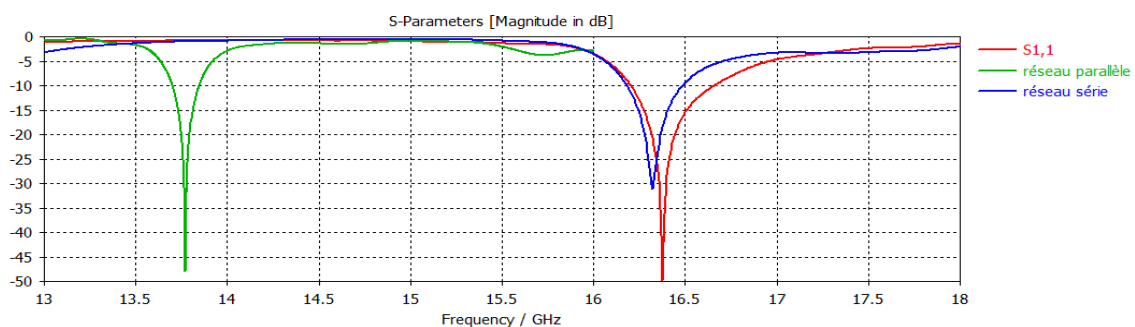
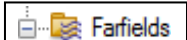


Figure III-17 : Coefficient de réflexion S_{11} pour : un réseau alimenté en série, un réseau alimenté en parallèle et une antenne d'un seul élément.

Les résultats de la directivité sont obtenus en cliquant sur l'icône  dans l'arbre navigation.

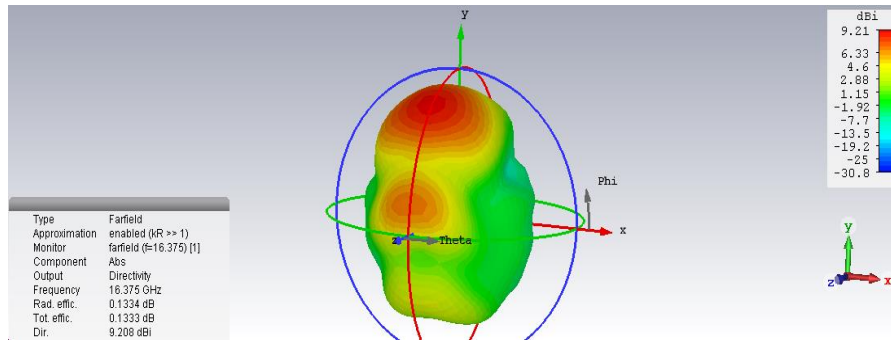


Figure III-18 : Directivité en 3D d'une antenne 1 patch triangulaire.

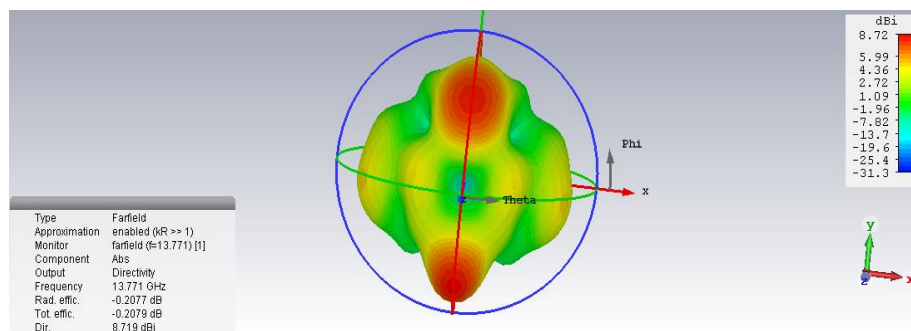


Figure III-19 : Directivité en 3D pour un réseau d'antennes patches à 2 éléments triangulaires alimentés en parallèle.

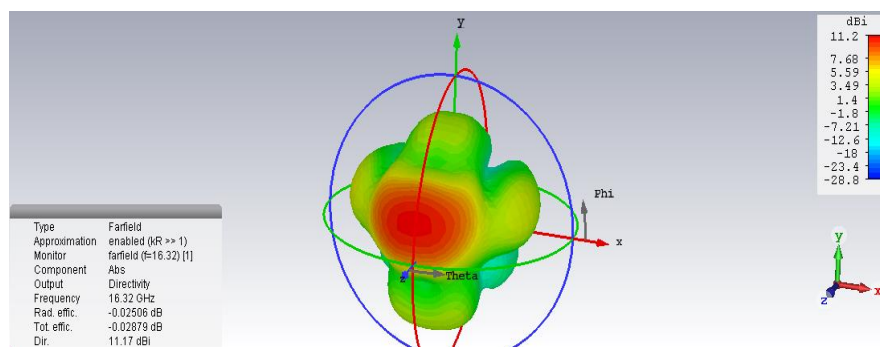


Figure III-20 : Directivité en 3D pour un réseau d'antennes patches à 2 éléments triangulaires alimentés en série.

Cas	Fr	BP	Directivité
1 patch	16.375	0.45	9.21
Réseau parallèle	13.771	0.144	8.72
Réseau série	16.32	0.301	11.2

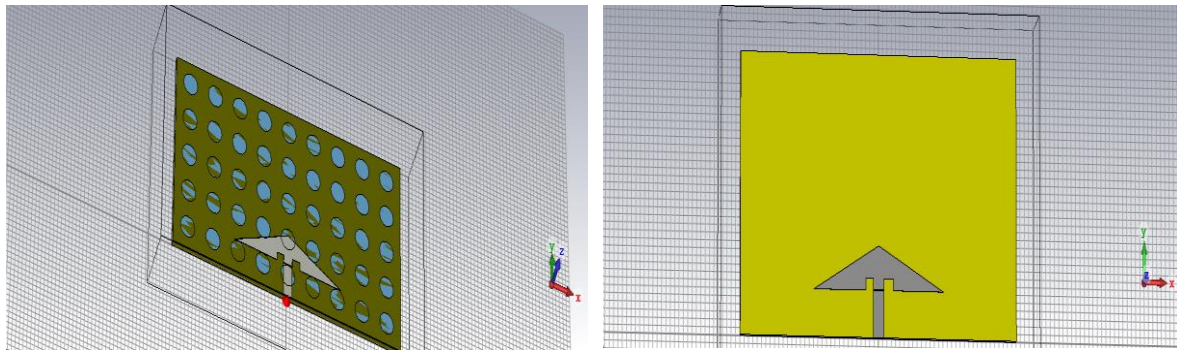
Tableau III-2 : Les résultats pour les différentes structures d'antennes.

A partir des figures (III-17, III-18, III-19, III-20) du coefficient de réflexion S_{11} et de la directivité d'une antenne constituée d'un seul élément patch et d'un réseau à 2 éléments rayonnants avec les 02 types d'alimentations : série et parallèle, et les résultats indiqués dans le tableau III-2 des fréquences de résonances et les bandes passantes et la directivité des 03 structures, et on remarque que :

- La fréquence de résonance pour un réseau a diminué par rapport à un seul élément et la fréquence de résonance pour un réseau en parallèle est moins de celle d'un réseau en série ;
- La bande passante pour un seul élément est plus large par rapport à un réseau ;
- La directivité pour un réseau à alimentation série est améliorée par rapport à une antenne à un seul élément et à un réseau en parallèle.

III.4.5. Comparaisons entre une antenne à un substrat à BIE et un substrat normal

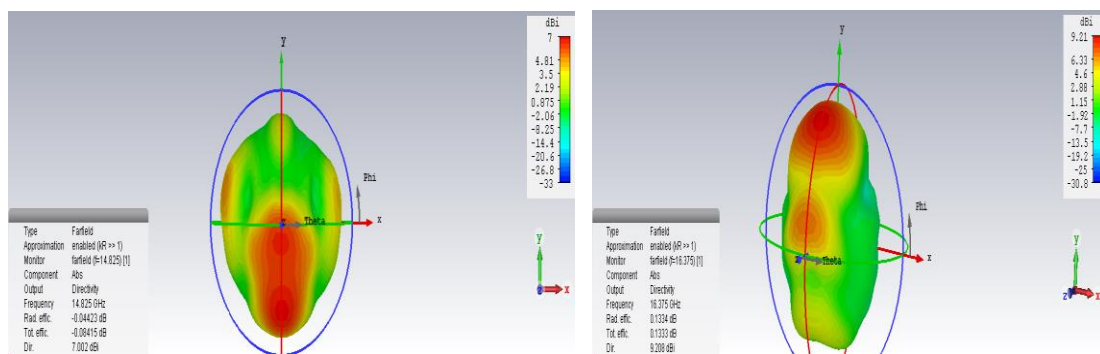
On étudie la variation de la directivité et le coefficient de réflexion S_{11} de deux antennes patches triangulaires à substrat BIE 2D , pour une longueur de base du patch $L_p=30$ mm, et une hauteur de $H=5.668$ mm: le premier à substrat à BIE, la permittivité du substrat qui est constitué des trous de vide : le substrat de permittivité $\epsilon_{r1}=4$, d'épaisseur $h1=1$ mm et les trous « vaccum » de permittivité $\epsilon_{r2}=1$, d'épaisseur 1 mm aussi, et le deuxième à substrat normal de matière « époxy résine » de permittivité $\epsilon_{r1}=4$ et d'épaisseur $h2=1$ mm, avec les mêmes dimensions que la première.



(a)

(b)

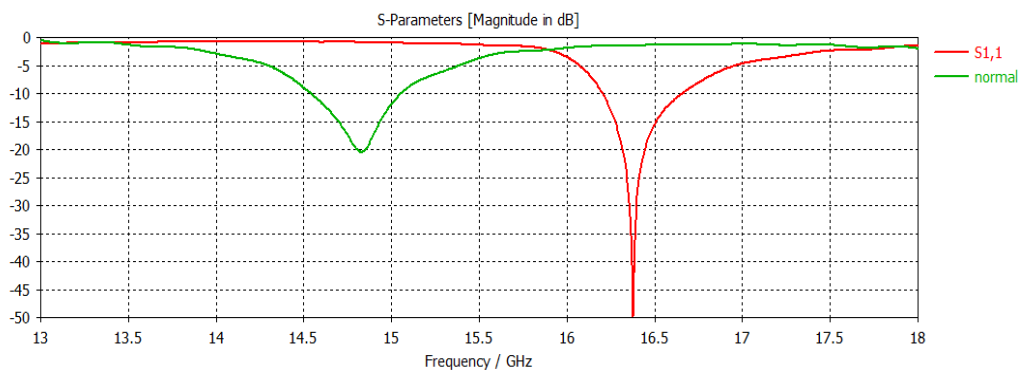
Figure III-21 : Structure des antennes : a) à substrat normal b) à substrat à BIE.



(a)

(b)

Figure III-22 : La directivité en 3D : a) Substrat normal b) Substrat à BIE



III-23 : Le coefficient de réflexion S_{11} : Substrat normal et Substrat à BIE

Substrat	Fr	BP	Directivité
BIE	16.375	0.45	9.21
Normal	14.825	0.51	7

Tableau III-3 : Les résultats pour différents types de substrats

D’après les figures III-22 et III-23 et le tableau III-3, on remarque que :

Pour la directivité, la fréquence de résonance, et la bande passante pour une antenne à substrat à BIE sont plus importantes que celles d’une antenne à substrat simple.

III.4.6. L’effet de la forme du Réseau des trous (Carré, Triangulaire, Hexagonal) :

Considérons une antenne micro-ruban sur un substrat BIE. On étudie la variation de la fréquence de résonance, la bande passante, et la directivité en fonction du réseau des trous du substrat, pour une longueur de base du patch $L_p=30$ mm, et une hauteur de $H=5.668$ mm, la permittivité du substrat $\epsilon_{r1}=4$, $\epsilon_{r2}=1$ (l’air), la longueur de substrat $a=36$ mm et la largeur de substrat $b=64$ mm et la hauteur de substrat $h=1$ mm et le diamètre des trous dans le substrat $D=4$ mm.

a) La fréquence de résonance et la bande passante :

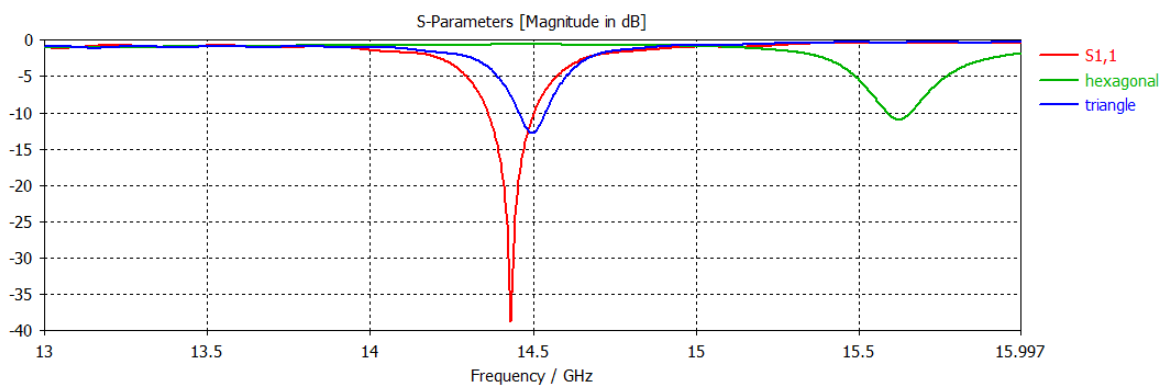


Figure III-24 : Coefficient de réflexion S11 pour trois formes du réseau des trous du substrat BIE : Carré, Triangulaire et Hexagonal.

formes du réseau des trous	Fr	BP
Carré	14.43	0.142
Triangle	14.496	0.81
Hexagonal	15.622	0.75

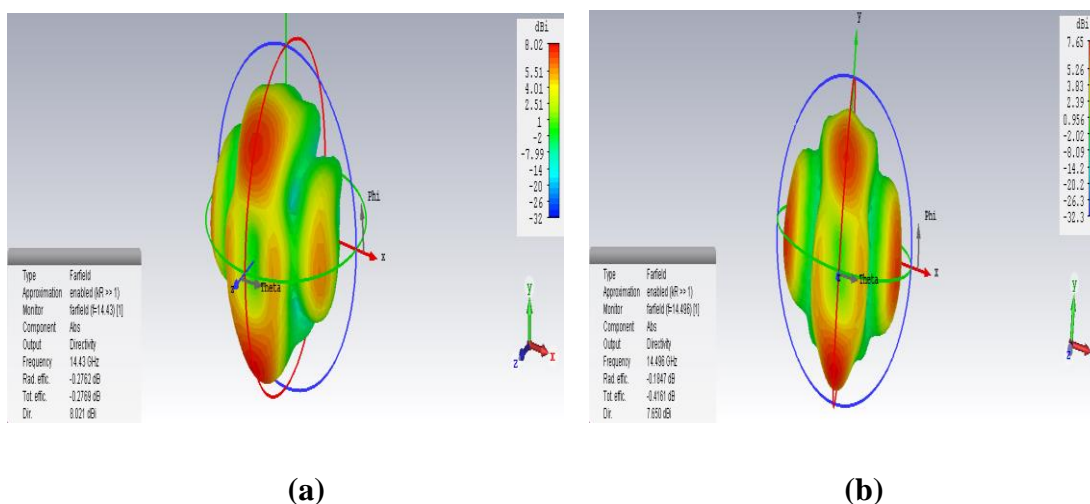
Tableau III-4 : La fréquence de résonance et la bande passante pour trois formes du réseau des trous du substrat BIE : Carre, Triangulaire, Hexagonal.

A partir du Tableau III-4 : et la Figure III-23 qui représente les caractéristiques de l'antenne en fonction de la fréquence, pour trois différentes formes du réseau des trous du substrat cristal photonique.

On remarque, un décalage entre les trois courbes, la fréquence de résonance prend la valeur minimale pour le réseau hexagonal, alors pour la forme du réseau hexagonal la fréquence de résonance est la plus grande.

La grande valeur de la bande passante on la trouve pour le réseau carré et la plus petite pour le réseau hexagonal.

b) La Directivité :



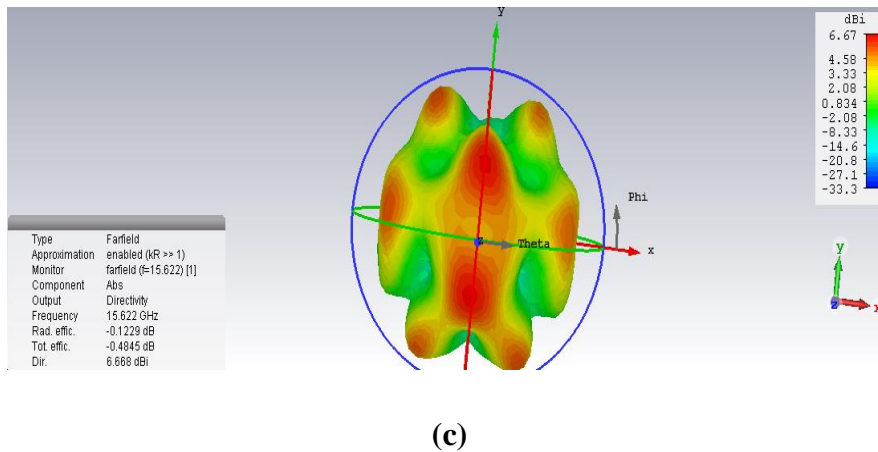


Figure III-25 : La Directivité En 3D : a) Réseau Carré b) Réseau Triangulaire c) Réseau Hexagonal

Cas	Directivité
Réseau carré	8.02
Réseau triangulaire	7.65
Réseau hexagonal	6.67

Tableau III-5 : La directivité pour trois formes du réseau des trous du substrat BIE : Carré, Triangulaire, Hexagonal.

A partir du Tableau III-5 et la Figure III-24 : On remarque que le changement du réseau a un effet sur la directivité de l'antenne, dans notre exemple la meilleure directivité c'est celle du réseau carré.

III.4.7. L'effet Du Diamètre Des Trous

Considérons une antenne micro-ruban sur un substrat BIE. On étudie la variation de la fréquence de résonance, la bande passante, et la directivité en fonction du diamètre des trous du substrat, pour une longueur de base du patch $L_p=30$ mm, et une hauteur de $H=5.668$ mm, la permittivité du substrat $\epsilon_{r1}=4$, $\epsilon_{r2}=1$ (l'air), la longueur du substrat est $a=36$ mm et sa largeur $b=64$ mm et la hauteur de substrat.

a) La fréquence de résonance et la bande passante :

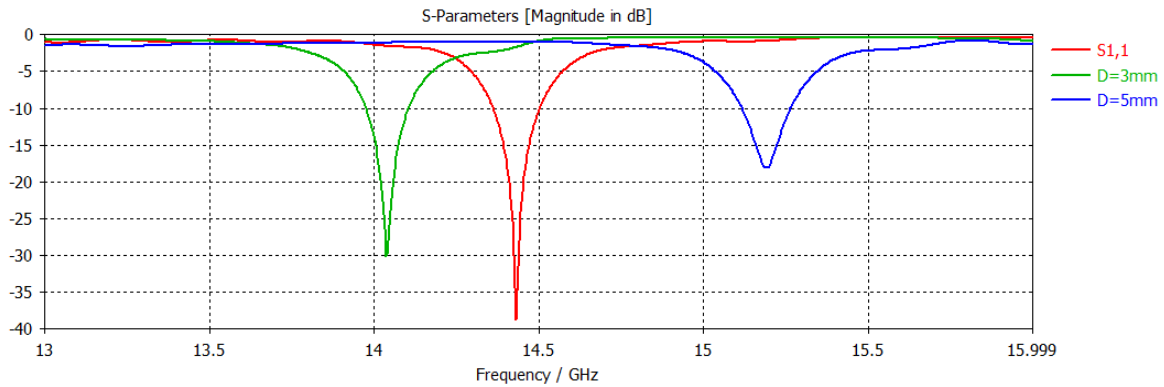


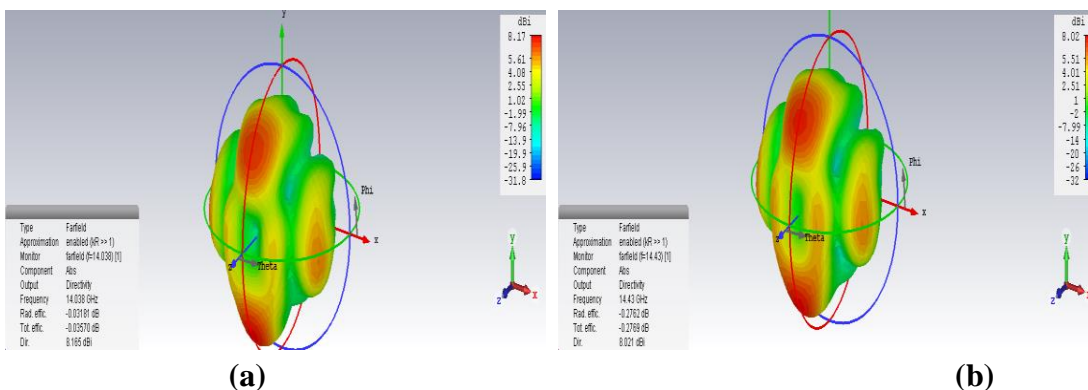
Figure III-26 : Coefficient de réflexion S11 pour différents diamètres des trous

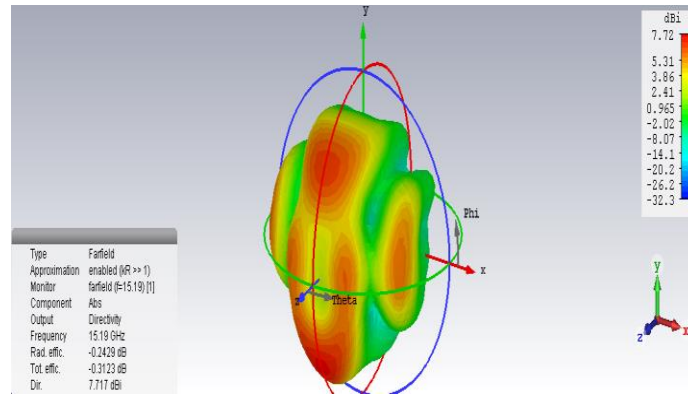
Cas	Fr	BP
D=3	14.038	0.129
D= 4	14.43	0.142
D= 5	15.19	0.148

Tableau III-6 : La Fréquence de résonance et la bande passante pour différents diamètres D.

A partir du Tableau III-6 et la Figure III-26 : qui représente les coefficients de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour les différents diamètres des trous du substrat BIE, on remarque que l’augmentation du diamètre des trous entraîne une augmentation de la fréquence de résonance, d’autre façon si on augmente la surface du diélectrique (ϵ_{r2}) qui est l’air la fréquence de résonance augmente. Il y a une relation proportionnelle entre le diamètre des trous et la bande passante.

b). La Directivité :





(c)

Figure III-27 : La Directivité En 3D De Différents Diamètre Des Trous a) D=3mm) D= 4mm C) D= 5mm

Cas	Directivité
D=3	8.17
D= 4	8.02
D= 5	7.72

Tableau III-7 : La directivité pour différents diamètres des trous

A partir du Tableau IV 7 et la Figure IV-27 pour différents diamètres des trous, on remarque qu’il y a une relation proportionnelle entre le diamètre des trous R et la directivité.

III.4.8. Effet de la variation la hauteur du patch triangulaire H

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction des différentes valeurs de la hauteur du patch triangulaire à bande interdite photonique 2D, tel que la largeur du patch $L_p= 30$ mm, la permittivité du substrat $\epsilon_{r1}=4$, la permittivité du trous $\epsilon_{r2}=1$ (l’air), la longueur de substrat est $\lambda=36$ mm et sa largeur $b=64$ mm et la hauteur de substrat $h=1$ mm diamètre des trous dans le substrat $D=4$ mm.

a) Fréquence de résonance et la bande passante

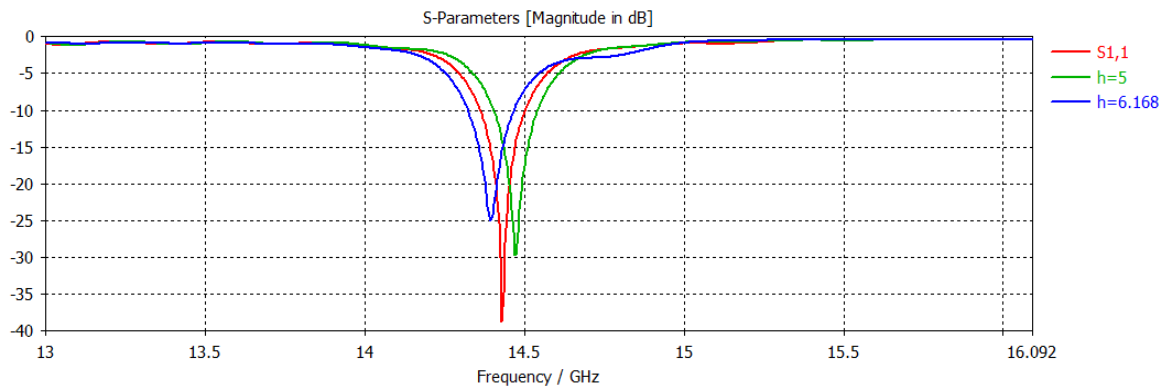


Figure III-28 : Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la hauteur du patch triangulaire pour une alimentation parallèle.

Cas	Fr	BP
H=5mm	14.475	0.138
H=5.668mm	14.43	0.142
H=6.168mm	14.395	0.147

Tableau III-8 : Variation de la fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la longueur du patch rectangulaire.

D'après la *Figure III-28* et *Tableau III-8*, qui représente la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la variation de la longueur de patch, on observe que :

La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de la hauteur du patch (inversement proportionnelle).

b) La Directivité :

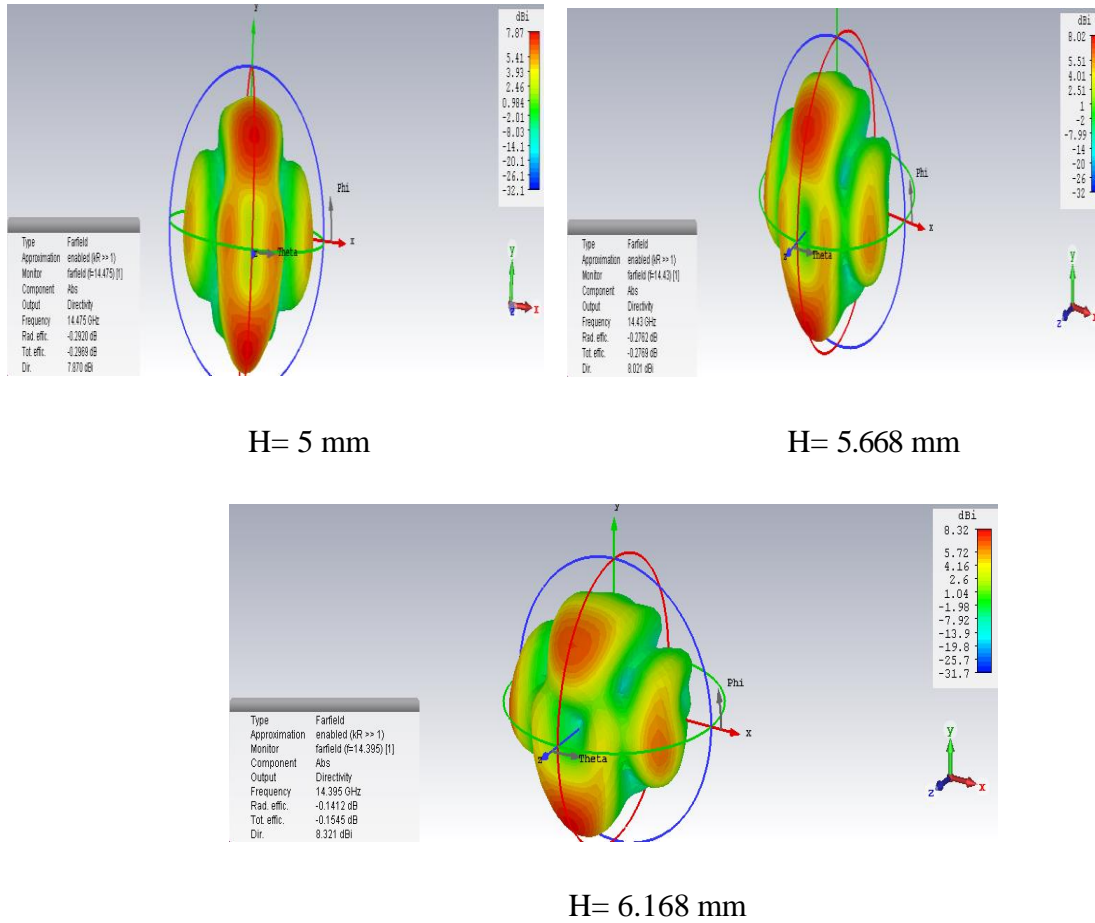


Figure III-29 : La directivité en 3D pour une variation de la longueur du patch.

On déduit la directivité sur le Tableau III-9.

Cas	Directivité
H=5	7.87
H= 5.668	8.02
H= 6.168	8.32

Tableau III-9 : Variation de la directivité en fonction de la longueur du patch.

D'après Tableau III-9 et Figure III-29 pour différentes valeurs de hauteur du patch, on remarque que la directivité augmente avec l'augmentation de la hauteur.

III.4.9. Effet de l'épaisseur du substrat h

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la variation de l'épaisseur du substrat h d'un réseau d'antenne à 02 patch triangulaires tel que la largeur du patch $L_p= 30$ mm, et une hauteur de $H=5.668$ mm, la permittivité du substrat $\epsilon_{r1}=4$, permittivité de trous $\epsilon_{r2}=1$ (l'air), la longueur de substrat est $a=36$ mm et sa largeur $b=64$ mm et le diamètre des trous dans le substrat $D=4$ mm.

a) La fréquence de résonance et la bande passante

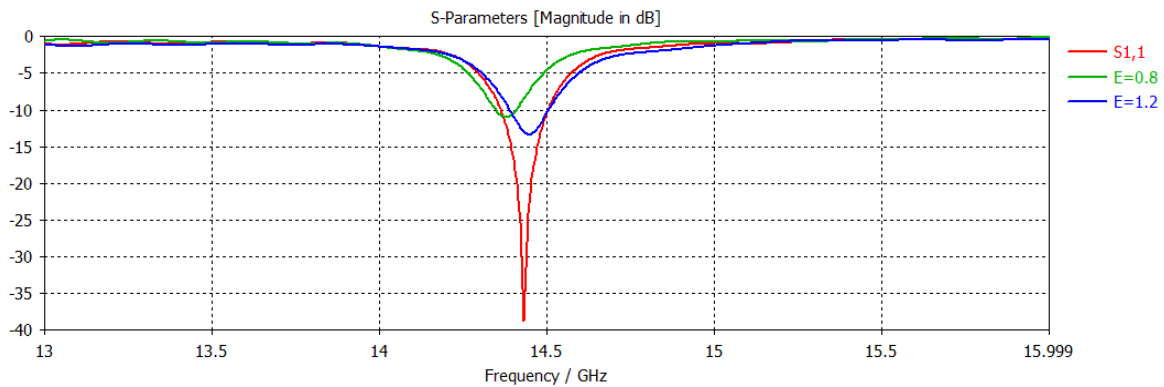


Figure III-30 : Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat h .

Cas	Fr	BP
$h=0.8$	14.377	0.061
$h= 1$	14.43	0.142
$h= 1.2$	14.446	0.116

Tableau III-10 : Fréquence de résonance et bande passante pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat h .

A partir du Tableau III-10 et la *Figure III-30* qui représente les coefficients de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence pour les différentes épaisseurs de substrat h , on remarque que :

- La fréquence de résonance augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat h ;
- La bande passante change pour la variation de l'épaisseur du substrat mais ce changement n'est pas uniforme ;
- On remarque aussi une grande influence sur l'adaptation.

b) La directivité :

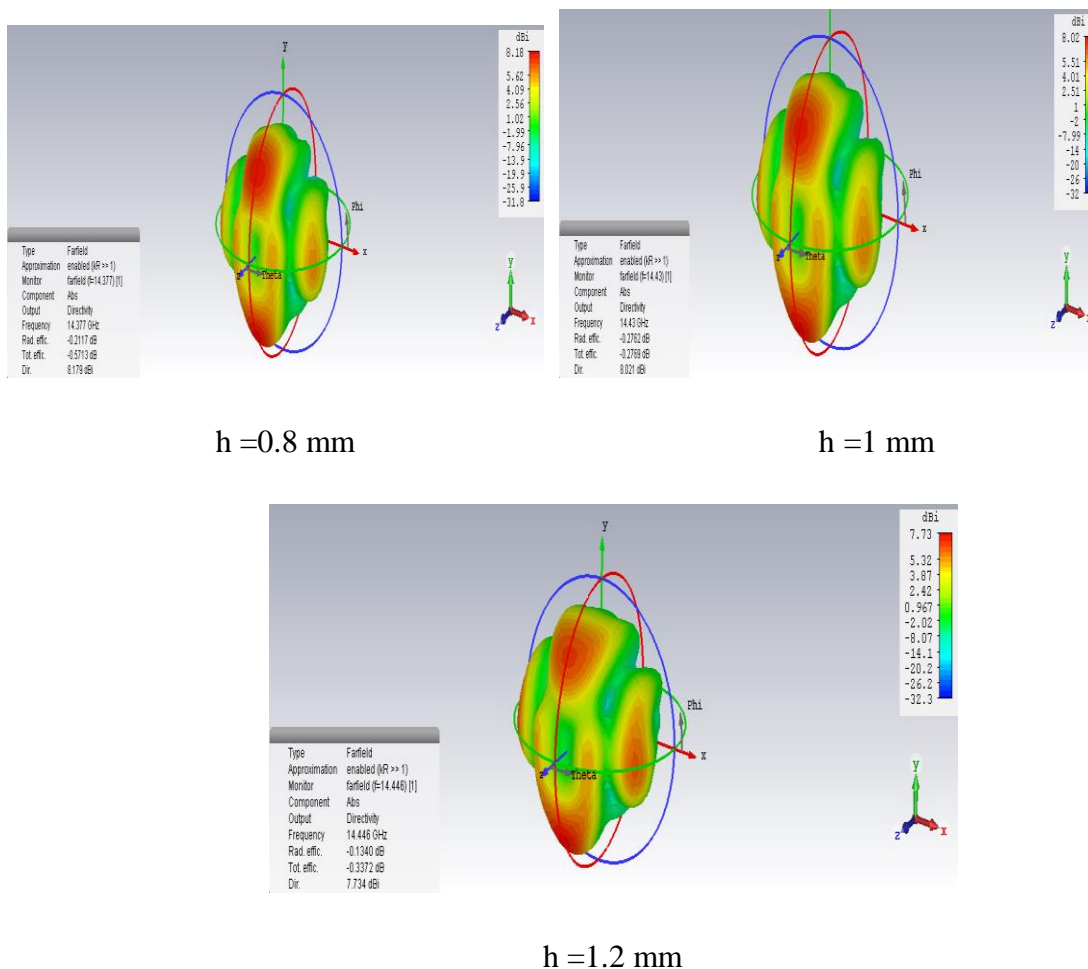


Figure III-31 : La directivité en 3D pour une variation de l'épaisseur h .

À partir de *Figure III-31* on déduit la directivité sur le Tableau III-11 :

Cas	Directivité
h=0.8	8.18
h= 1	8.02
h= 1.2	7.73

Tableau III-11 : Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur des couches du substrat du patch h(mm).

A partir du Tableau III-11 et la *Figure III-31* pour différentes valeurs de l'épaisseur du substrat à BIE (**h**), on note que la directivité dépend de l'épaisseur du substrat **h**, tel qu'elle a diminué pour l'augmentation de l'épaisseur du substrat.

III.4.10. Effet de la variation de la permittivité ϵ_{r1}

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la permittivité ϵ_{r1} d'un réseau d'antenne à 02 patch triangulaires tel que la largeur du patch $L_p= 30$ mm, et une hauteur de $H=5.668$ mm, permittivité de trous $\epsilon_{r2} =1$ (l'air), la longueur de substrat est $a=36$ mm, sa largeur $b=64$ mm, son épaisseur $h=1$ mm et le diamètre des trous dans le substrat $D=4$ mm.

a) Fréquence de résonance et la bande passante

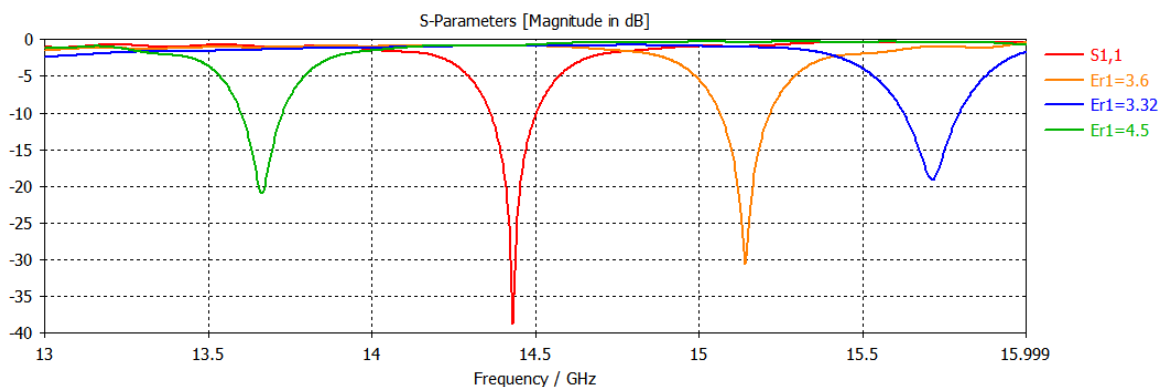


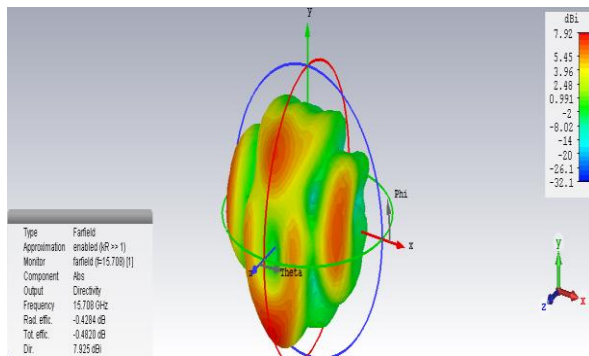
Figure III- 32 : Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r1}) .

Cas	Fr	BP
$\epsilon_{r1}=3.32$	15.708	0.17
$\epsilon_{r1}=3.6$	15.142	0.154
$\epsilon_{r1}=4$	14.43	0.142
$\epsilon_{r1}=4.5$	13.663	0.127

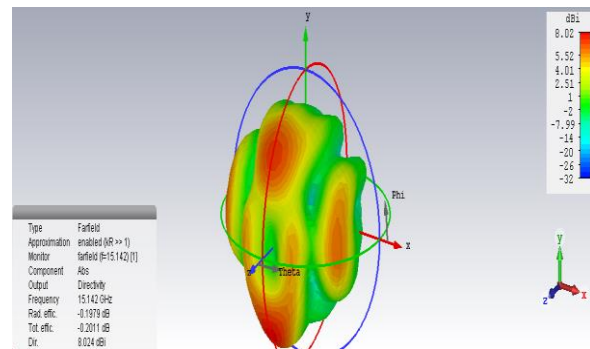
Tableau III-12 : La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r1}).

D’après le Tableau III-12 et la *Figure III-32* : pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r1} on remarque : l’augmentation de la permittivité ϵ_{r1} entraîne une décroissance de la fréquence de résonance et la bande passante.

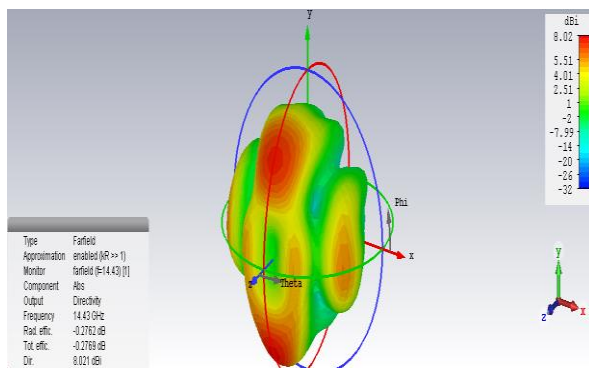
b) La Directivité :



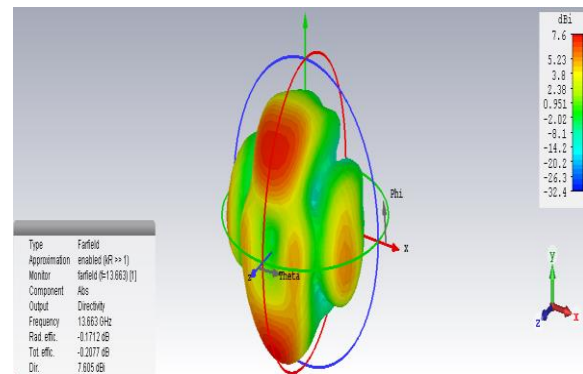
$\epsilon_{r1} = 3.32$



$\epsilon_{r1} = 3.6$



$\epsilon_{r1} = 4$



$\epsilon_{r1} = 4.5$

Figure III-33 : La directivité en 3D pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r1} .

On déduit : le Tableau III-13.

Cas	Directivité
$\epsilon_{r1} = 3.32$	7.92
$\epsilon_{r1} = 3.6$	8.02
$\epsilon_{r1} = 4$	8.02
$\epsilon_{r1} = 4.5$	7.6

Tableau III-13 : Variation de la directivité pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r1} .

A partir du Tableau III-13 et la Figure III-33 : pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r1} , on remarque que la directivité diminue avec l'augmentation de la permittivité ϵ_{r1} .

III.4.11. Effet de la variation de la permittivité ϵ_{r2}

On étudie la variation de la fréquence de résonance et la bande passante en fonction de la permittivité ϵ_{r2} d'un réseau d'antenne à 02 patch triangulaires tel que la largeur du patch $L_p = 30$ mm, et une hauteur de $H = 5.668$ mm, permittivité de trous $\epsilon_{r1} = 4$ (époxy resine), la longueur de substrat est $a = 36$ mm, sa largeur $b = 64$ mm, son épaisseur $E_p = 1$ mm et le diamètre des trous dans le substrat $D = 4$ mm.

a) Fréquence de résonance et la bande passante

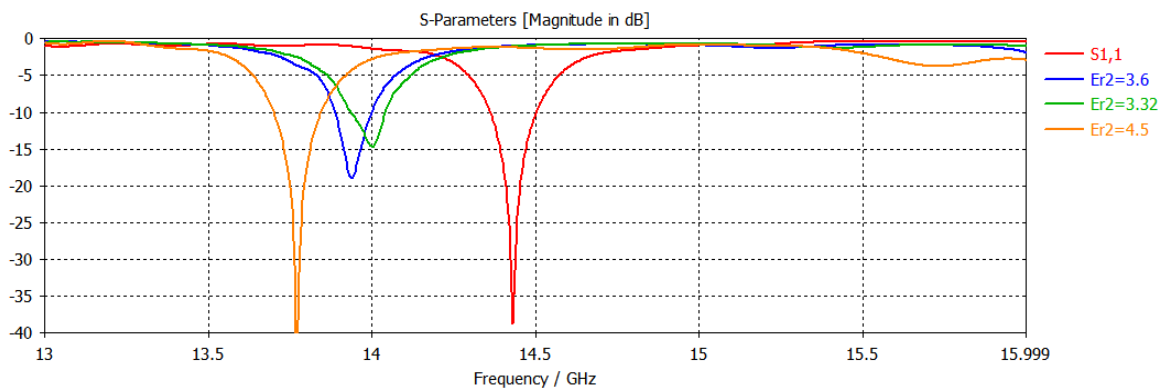


Figure III- 34 : Coefficient de réflexion S_{11} pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r2}).

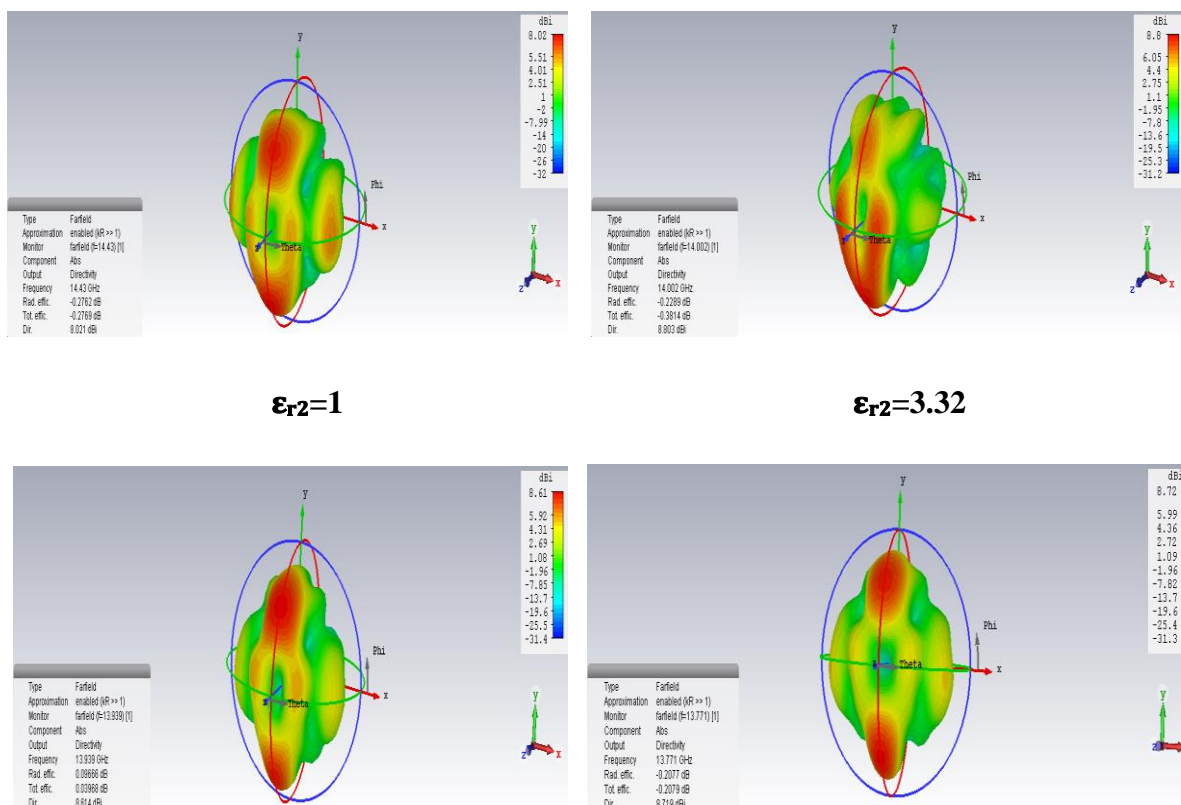
Cas	Fr	BP
$\epsilon_{r2}=1$	14.43	0.142
$\epsilon_{r2}=3.32$	14.002	0.106
$\epsilon_{r2}= 3.6$	13.939	0.112
$\epsilon_{r2}= 4.5$	13.771	0.144

Tableau III-14 : La fréquence de résonance et la bande passante pour différentes valeurs de la permittivité (ϵ_{r2}).

D’après le Tableau III-14 et la Figure III-34 : pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r2} , on remarque que :

- La fréquence de résonance diminue avec l’augmentation de la permittivité ϵ_{r2} ;
- La bande passante augmente avec l’augmentation de permittivité ϵ_{r2} .

b) La directivité :



$$\epsilon_{r2}=3.6$$

$$\epsilon_{r2}=4.5$$

Figure III-35 : La directivité en 3D pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r2} .

On déduit la directivité sur le Tableau III-15.

Cas	Directivité
$\epsilon_{r2} = 1$	8.02
$\epsilon_{r2} = 3.32$	8.8
$\epsilon_{r2} = 3.6$	8.61
$\epsilon_{r2} = 4.5$	8.72

Tableau III-15 : La directivité en fonction de la permittivité ϵ_{r2} .

A partir du Tableau III-15 et la Figure III-35 : pour différentes valeurs de la permittivité ϵ_{r2} du substrat on note que :

La directivité dépend de la permittivité ϵ_{r2} et elle diminue avec l'augmentation de la permittivité ϵ_{r2} .

IV. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié un réseau d'antenne patch à 2 éléments de forme triangulaires avec un substrat BIE bidimensionnelle (2D), et nous avons étudié l'influence des paramètres de ce réseau d'antennes (géométriques et physiques) sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité.

Les paramètres que nous avons étudiés sont : la forme du réseau et le diamètre des trous, les dimensions du patch, la permittivité des deux matériaux du substrat BIE, l'épaisseur du substrat.

Nous avons utilisé pour notre travail l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel (CST) qui intègre la simulation, la visualisation, et aussi il est facile à utiliser dans l'environnement (3D) avec une bonne précision.

Nous avons montré que la directivité d'une antenne à substrat à BIE est plus importante comparée à celle d'une antenne à substrat simple.

À partir des résultats :

➤ **Pour la fréquence de résonance :**

- ❖ La fréquence de résonance augmente pour un substrat BIE par rapport à un substrat simple.
- ❖ La fréquence de résonance pour un réseau à deux éléments est inférieure à celle d'un seul élément.
- ❖ La fréquence de résonance pour un réseau d'antennes avec une alimentation série est supérieur à celle du cas de l'alimentation parallèle.
- ❖ La fréquence de résonance augmente avec la diminution de la hauteur du patch.
- ❖ La fréquence de résonance augmente légèrement pour l'augmentation de l'épaisseur du substrat h .
- ❖ La fréquence de résonance décroît pour l'augmentation de la permittivité ϵ_{r1} de la permittivité ϵ_{r2} (relation inversement proportionnelle).

➤ **Pour la bande passante :**


- ❖ La bande passante est plus large pour une antenne à un substrat simple par rapport à celle d'un substrat à BIE.
- ❖ La bande passante pour un seul élément est plus large par rapport à un réseau.
- ❖ La bande passante pour un réseau d'antennes avec une alimentation série est importante par rapport à celle d'alimentation parallèle.
- ❖ La bande passante augmente pour l'augmentation de la hauteur du patch (relation proportionnelle).
- ❖ La bande passante varie pour la variation de l'épaisseur du substrat h mais cette variation n'est pas uniforme.
- ❖ La bande passante diminue pour l'augmentation de la permittivité ϵ_{r1} (relation inversement proportionnelle).
- ❖ La bande passante augmente pour l'augmentation de la permittivité ϵ_{r2} (relation proportionnelle).

➤ **Pour la directivité :**

- ❖ La directivité est plus importante pour une antenne à un substrat BIE que celle d'une antenne à un substrat simple.
- ❖ La directivité pour un réseau à deux éléments est améliorée par rapport à une antenne à un seul élément.
- ❖ Les résultats de la directivité pour un réseau d'antennes avec une alimentation série est meilleurs par rapport à celle d'une alimentation parallèle.
- ❖ La directivité augmente pour l'augmentation de la hauteur du patch (relation proportionnelle).
- ❖ La directivité diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat h et la permittivité ϵ_{r1} (relation inversement proportionnelle).
- ❖ La directivité varie pour la variation de la permittivité des trous ϵ_{r2} mais cette variation n'est pas uniforme

Bibliographie

- [1] CST MICROWAVE STUDIO Web page
<http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>.
- [2] L Douchet, M Sauzeix, S Tisserant, « Electronique MP », 2007.
- [3] CST 1998-2010 CST – Computer Simulation Technology AG All rights reserved.



CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif essentiel de notre travail était d'étudier un réseau d'antennes patches à deux éléments de forme triangulaires à substrats BIE (2D) opérant dans la bande Ku, selon la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité, en utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel CST basé sur la méthode d'intégration finie.

Les paramètres que nous avons étudié dans ce travail sont : le matériau du substrat (matériau à BIE ou diélectrique simple), les types d'alimentation d'un réseau d'antennes patches (série et parallèle), les dimensions des patches, l'épaisseur du substrat, la forme de réseau de trous du substrat, le diamètre des trous D , la permittivité des matériaux du substrat à BIE ϵ_{r1} et ϵ_{r2} .

Dans le premier chapitre nous avons présenté brièvement le réseau d'antennes imprimées, où on a cité quelques applications de ce type d'antennes, ainsi leur caractéristiques, le choix des paramètres et substrat, les avantages, les inconvénients et leurs applications, on s'est intéressé par la suite aux techniques utilisées pour leurs alimentation.

Dans le deuxième chapitre nous présentons dans un contexte général la structure à Bande Interdite Electromagnétique (BIE). Débutant par un historique, une définition des matériaux à BIE et leurs caractéristiques, une description pour les matériaux BIE et leurs structures, aussi leurs domaines d'application.

Dans le troisième et le dernier chapitre, nous avons donné une simple présentation du logiciels *CST* et présenté comment créer, simuler, et analyser une antenne micro-ruban en utilisant l'environnement de conception CST MICROWAVE STUDIO. Après nous avons étudié un réseau d'antennes patches à 2 éléments de forme triangulaire avec un substrat BIE opérant dans la bande Ku [12 GHZ-18 GHZ], où les résultats obtenus sont :

- Le nombre d'élément (patch) dans le réseau et la méthode d'alimentation sont deux facteurs importants qui influent directement sur les performances de l'antenne.
- Les caractéristiques d'un réseau d'antennes patchs sont liées directement à ses paramètres géométriques et physiques.
- L'adaptation et la bande passante d'antenne BIE à réseau carré et d'épaisseur de trous $D= 4$ mm est très amélioré par rapport aux autres cas.
- La fréquence de résonance est plus importante pour une antenne à substrat BIE par rapport à celle d'un substrat simple.

Conclusion générale

- La bande passante est plus large pour une antenne à substrat simple par rapport à celle d'un substrat à BIE.
- La bande passante pour un seul élément est plus large par rapport à un réseau.
- La fréquence de résonance pour un réseau d'antennes est inférieure à celle d'un seul élément.
- La fréquence de résonance pour un réseau d'antennes avec une alimentation parallèle présente des résultats meilleurs que ceux d'une alimentation série.

Pour un réseau d'antennes BIE (à deux éléments) alimentées en parallèle les résultats obtenus sont :

- La fréquence de résonance et la bande passante augmentent avec l'augmentation des épaisseurs du substrat (h).
- La fréquence de résonance diminue avec l'augmentation de la hauteur du patch, par contre la bande passante augmente.
- La fréquence de résonance et la bande passante augmentent avec la décroissance de la permittivité du substrat (ϵ_{r1}).
- La fréquence de résonance augmente et la bande passante diminue avec la décroissance de la permittivité des trous (ϵ_{r2}).
- La bande passante change avec la variation de l'épaisseur de la couche du substrat h mais cette variation n'est pas uniforme.
- La directivité est importante pour un substrat BIE par rapport à un substrat normal.
- La directivité pour un réseau d'antennes est améliorée par rapport à celle d'un seul élément ;
- Les résultats de la directivité d'un réseau d'antennes avec une alimentation série est améliorée par rapport à l'alimentation parallèle.
- La directivité dépend des dimensions du patch.
- La directivité varie proportionnellement avec l'épaisseur de la couche du substrat h ;
- La directivité est inversement proportionnelle à la permittivité du substrat à BIE (ϵ_{r1}) et elle varie avec la variation de la permittivité des trous (ϵ_r), **mais** cette variation n'est pas uniforme.