

Institut d'aéronautique et des  
études spéciales

Option : CNS/ATM



| Encadreur : Mme AZINE.H



---

## Réseau D'antenne Patch Rectangulaire A Bande Interdite Electromagnétique (BIE)

---

Par Foura Sohaib



| Soutenu devant le jury composé de :

- A
- B
- C

**Année universitaire : 2020 /2021**

**Remercîment :**

*J'adresse mes remerciement, en premier lieu, à mon bon dieu pour la volonté, la santé, le courage et la patience qui m'avoit donné pour mener ce travail à terme.*

*Puis, je tiens à remercier ma promotrice de thèse, madame AZINE HOURIA, pour la Confiance qu'elle m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail, pour ses multiples Conseils et pour toutes les heures qu'il a consacrées à diriger cette recherche. J'aimerais Également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande disponibilité et son respect sans faille Des délais serrés de relecture des documents que je lui ai adressés. Enfin, j'ai été extrêmement Sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail.*

*Je remercie très sincèrement monsieur le professeur ..... de m'avoit fait l'honneur d'accepter de présider le jury de cette thèse.*

*J'exprime également mes remerciements aux membres de jury messieurs ; ..... et ..... pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.*

*Je remercie chaleureusement mes parents qui m'ont soutenu tout au long de mes études, parfois au prix de quelques sacrifices, et sans qui je n'aurais pas pu atteindre ce niveau.*

*Enfin, j'exprime ma profonde reconnaissance à mes sœurs, ma famille, mes amis et tous ceux qui ont contribué à réaliser ce travail.*

*Dédicace : Je dédie ce travail à :*

*Papa*

*Toute l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers un être très cher. Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour. Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin. Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez fait preuve, de l'encouragement et le soutien que vous ne cessez de manifester, j'espère que vous y trouverez les fruits de votre semence et le témoignage de ma grande fierté de vous avoir comme père. J'implore Dieu, tout puissant, de vous accorder une bonne santé, une longue vie et beaucoup de bonheur.*

*Maman*

*« To the world You might be just a person but to me you are more than a world »*

*Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, vos sacrifices innombrables et votre dévouement firent pour moi un encouragement. Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvé de tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée. Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.*

*Mes sœurs et leurs maries*

*En signe de l'affection et du grand amour que je vous porte, les mots sont insuffisants pour exprimer ma profonde estime. Je vous dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection et de mon attachement indéfectible. Que Dieu vous accorde santé, succès et félicité pour faire de vous un couple uni et heureux à jamais. Que Dieu vous protège.*

*Mes grands-parents paternel et Mes grand-père maternel*

*Puisse Dieu vous avoir en sa sainte miséricorde et que ce travail soit une prière pour votre âme.*

*Ma grand-mère maternelle*

*Je vous dédie cette thèse pour vos attentions particulières, vos prières et votre amour inconditionnel. Merci pour tout et que Dieu vous donne bonne santé et longue vie parmi nous.*

*A mes tantes et oncles paternels et leurs conjoints A mes tantes et oncles maternels et leurs conjoints.*

*A mes chères amies et à tous ceux qui j'ai omis involontairement de citer.*



# Table de matière

## Table des matières

Table des matières .....	4
1 CHAPITRE I les réseaux d'antennes imprimées .....	2
1.1 Introduction : .....	3
1.2 METHODES D'ANALYSE.....	3
1.2.1 LE MODELE ELECTROMAGNETIQUE .....	3
1.3 Définition d'une antenne : .....	4
1.4 DESCRIPTION DES ANTENNES PATCHES .....	5
1.5 Les matériaux diélectriques utilisés .....	9
1.6 Caractéristique des matériaux diélectriques du substrat : .....	10
1.7 Les paramètres géométriques du l'antenne imprimée.....	11
1.8 Caractéristiques des antennes imprimées : .....	11
1.9 Techniques d'alimentation : .....	15
1.10 Avantages et limitations des antennes patch .....	20
1.11 Techniques d'élargissement de la bande passante.....	20
1.12 Applications des antennes imprimées : .....	21
1.13 Réseau d'antenne.....	21
1.13.1 Réseaux d'antenne imprimée : .....	22
1.13.2 Association d'antennes en réseau : .....	23
1.14 Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne imprimé : .....	23
1.14.1 Alimentation parallèle : .....	24
1.14.2 Alimentation série : .....	24
1.15 Réseau bidimensionnels : .....	25
1.16 Conclusion .....	26
1.17 Bibliographies .....	27
2 CHAPITRE II Généralités sur les structures BIE .....	28
2.1 Introduction : .....	29
2.2 Préambule : .....	29
2.3 Définition de base de matériaux à bande interdite électromagnétique : .....	30
2.4 Principe de fonctionnement d'une antenne BIE : .....	30
2.5 Les surfaces partiellement réfléchissantes : .....	31
2.6 Description des matériaux BIE diélectriques : .....	36

2.6.1	Réseaux unidimensionnels : .....	36
2.6.2	Réseau bidimensionnel : .....	37
2.6.3	Réseaux tridimensionnels : .....	38
2.7	Description des structures BIE métalliques : .....	39
2.8	Caractéristiques et performances de l'antenne à résonateur BIE : .....	40
2.9	Domaines d'application [17]: .....	41
2.9.1	Dans le domaine de l'optique les fibres optiques : .....	41
2.9.2	Les micro- résonateurs : .....	42
	L'usage des défauts ponctuels et linéaires permet de générer des résonateurs microscopiques et des guides d'ondes correspondantes, la mise en œuvre des résonateurs microscopiques est obtenue en introduisant des points dans la structure cristalline électromagnétiques.....	42
2.9.3	Les guides d'ondes : .....	42
	L'idée de construire des guides d'ondes à été évoquée en 1994 et les premières réalisations remontent à 1999, les guides linéiques présentent beaucoup de pertes, on trouve un autre type de guide que nous appelons « guide avec virage » filtres et multiplexeurs : un type important peut être génère avec des cristaux électromagnétiques.....	42
2.9.4	Dans le domaine micro-onde : .....	42
2.10	Conclusion : .....	43
2.11	Bibliographies .....	44
3	CHAPITRE III Résultats & discussions.....	46
3.1	Introduction : .....	47
3.2	Logiciels de Simulation Electromagnétique .....	47
3.3	Procédure de simulation .....	47
3.3.1	Interface du HFSS .....	48
3.3.2	Le processus de HFSS.....	49
3.4	logiciel de simulation HFSS : .....	49
3.5	simulation .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.5.1	les différentes étapes de simulation : .....	50
3.5.2	Présentation de la structure d'un seul élément.....	51
3.5.3	Antenne patch BIE avec encoche .....	66
3.6	Conclusion : .....	76



## Tables des figures :

### Chapitre : 1

<b>figure 1. 1:</b> différents types d'antennes.....	4
<b>figure 1. 2:</b> Présentation d'une antenne patch.....	6
<b>figure 1. 3:</b> Diverses géométries du conducteur métallique.....	7
<b>figure 1. 4:</b> différentes formes d'antenne micro ruban [8].....	7
<b>figure 1. 5:</b> Présentation d'une antenne imprimée [27].....	8
<b>figure 1. 6:</b> représentation en quadripôle.....	12
<b>figure 1. 7:</b> bande passante et coefficient de réflexion.....	14
<b>figure 1. 8:</b> alimentation par ligne micro ruban.....	17
<b>figure 1. 9:</b> alimentation par sonde coaxiale.....	18
<b>figure 1. 10:</b> alimentation par couplage par fente.....	19
<b>figure 1. 11:</b> alimentation par couplage de proximité.....	19
<b>figure 1. 12:</b> Différents types de réseaux : (a) linéaire (b) bidimensionnels.....	22
<b>figure 1. 13:</b> alimentation parallèle d'un réseau linéaire.....	24
<b>figure 1. 14:</b> alimentation série d'un réseau linéaire.....	25
<b>figure 1. 15:</b> Alimentation parallèle d'un réseau plan.....	25
<b>figure 1. 16:</b> Alimentation série d'un réseau plan.....	26

### Chapitre : 2

<b>figure 2. 1:</b> Exemple de réseaux périodiques 1D, 2D, et 3D.....	30
<b>figure 2. 2:</b> Réflexion des ondes dans la cavité résonante formée par un plan de masse et une surface PRS.31	
<b>figure 2. 3:</b> Motif élémentaire métallisé sur les deux faces.....	32
<b>figure 2. 4:</b> Phase du coefficient de réflexion à profil croissant du motif élémentaire métallisé sur les deux faces (a), directivité de l'antenne proposée et celle de l'antenne classique (b).....	33
<b>figure 2. 5:</b> Structure d'antenne utilisant des métallisations inductives et capacitives.....	34
<b>figure 2. 6:</b> Gain de l'antenne avec et sans méta-surfaces.....	34
<b>figure 2. 7:</b> modèle de circuit équivalent.....	35
<b>figure 2. 8:</b> Structure périodique proposée dans la référence, (a) l'interface de la PRS proposée, (b) motif élémentaire, (c) circuit équivalent du motif élémentaire.....	35
<b>figure 2. 9:</b> Exemples De Structures Périodiques 1D, 2D et 3D.....	36
<b>figure 2. 10:</b> Structure 1D et Son Diagramme De Dispersion.....	37
<b>figure 2. 11:</b> Exemples De Différents Réseaux 2D.....	37
<b>figure 2. 12:</b> Bandes Interdites En Fonction Du Réseau Et Du Type De Polarisation.....	38
<b>figure 2. 13:</b> 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).....	38
<b>figure 2. 14:</b> Exemples de Surfaces Sélectives en Fréquence (SSF).....	40
<b>figure 2. 15:</b> Diagramme de rayonnement et directivité d'une antenne à résonateur BIE.....	41
<b>figure 2. 16:</b> photographie d'une fibre à trous, de diamètre de cœur (au centre) de $1\mu\text{m}$ .....	41



## Chapitre : 3

<b>figure 3. 1:</b> logo des principaux logiciels de simulation .	47
<b>figure 3. 2:</b> L'interface HFSS .	48
<b>figure 3. 3:</b> Le processus HFSS .	49
<b>figure 3. 4:</b> simulation dun reseau d'antenne patch BIE.	50
<b>figure 3. 5:</b> les différentes étapes de simulation	51
<b>figure 3. 6:</b> définitions fonctionnelles d'une antenne imprimée rectangulaire.	51
<b>figure 3. 7:</b> structure d'antenne rectangulaire sans encoches.	52
<b>figure 3. 8:</b> antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation au milieu sous HFSS.	54
<b>figure 3. 9:</b> directivité d'antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation au milieu.	54
<b>figure 3. 10:</b> gain d'antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation au milieu.	54
<b>figure 3. 11:</b> S11 d'antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation au milieu.	54
<b>figure 3. 12:</b> antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation à droite.	55
<b>figure 3. 13:</b> directivité d'antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation à droite.	55
<b>figure 3. 14:</b> gain d'antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation à droite.	55
<b>figure 3. 15:</b> S11 d'antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation à droite.	56
<b>figure 3. 16:</b> structure d'antenne patch avec encoches.	56
<b>figure 3. 17:</b> antenne patch avec encoche et 1 couche de substrat.	57
<b>figure 3. 18:</b> directivité d'antenne patch avec encoche et 1 couche de substrat.	57
<b>figure 3. 19:</b> gain d'antenne patch avec encoche et 1 couche de substrat.	57
<b>figure 3. 20:</b> S11 d'antenne patch avec encoche et 1 couche de substrat.	57
<b>figure 3. 21:</b> antenne patch avec encoche et 2 couches de substrats.	59
<b>figure 3. 22:</b> directivité d'antenne patch avec encoche et 2 couches de substrats.	59
<b>figure 3. 23:</b> gain d'antenne patch avec encoche et 2 couches de substrats.	59
<b>figure 3. 24:</b> S11 d'antenne patch avec encoche et 2 couches de substrats	59
<b>figure 3. 25:</b> antenne patch avec encoche et 3 couches de substrats.	60
<b>figure 3. 26:</b> directivité d'antenne patch avec encoche et 3 couches de substrats	60
<b>figure 3. 27:</b> gain d'antenne patch avec encoche et 3 couches de substrats.	60
<b>figure 3. 28:</b> s11 d'antenne patch avec encoche et 3 couches de substrats .	60
<b>figure 3. 29:</b> antenne patch avec encoche et 4 couches de substrats.	61
<b>figure 3. 30:</b> directivité d'antenne patch avec encoche et 4 couches de substrats	62
<b>figure 3. 31:</b> gain d'antenne patch avec encoche et 4 couches de substrats.	62
<b>figure 3. 32:</b> s11 d'antenne patch avec encoche et 4 couches de substrats.	62
<b>figure 3. 33:</b> antenne patch avec encoche et 5 couches de substrats.	63
<b>figure 3. 34:</b> directivité d'antenne patch avec encoche et 5 couches de substrats.	63
<b>figure 3. 35:</b> gain d'antenne patch avec encoche et 5 couches de substrats.	63
<b>figure 3. 36:</b> S11 d'antenne patch avec encoche et 5 couches de substrats .	63
<b>figure 3. 37:</b> antenne patch avec encoche et 6 couches de substrats.	64
<b>figure 3. 38:</b> directivité d'antenne patch avec encoche et 6 couches de substrats.	64
<b>figure 3. 39:</b> gain d'antenne patch avec encoche et 6 couches de substrats.	64
<b>figure 3. 40:</b> s11 d'antenne patch avec encoche et 6 couches de substrats.	64
<b>figure 3. 41:</b> les différentes étapes de simulation dun reseau d'antenne patch BIE	66

<b>figure 3. 42:</b> réseaux d'antenne patch bie et 1 couche de substrats.....	67
<b>figure 3. 43:</b> directivité du réseau d'antenne patch bie et 1 couche de substrats .	67
<b>figure 3. 44:</b> gain du réseau d'antenne patch bie et 1 couche de substrats.....	67
<b>figure 3. 45:</b> S11 du réseau d'antenne patch bie et 1 couche de substrats.....	68
<b>figure 3. 46:</b> réseaux d'antenne patch bie et 2 couches de substrats. ....	68
<b>figure 3. 47:</b> directivité du réseau d'antenne patch bie et 2 couches de substrats.....	69
<b>figure 3. 48:</b> gain du réseau d'antenne patch bie et 2 couches de substrats .....	69
<b>figure 3. 49:</b> S11 du réseau d'antenne patch bie et 2 couches de substrats. ....	69
<b>figure 3. 50:</b> réseaux d'antenne patch bie et 3 couches de substrats. ....	70
<b>figure 3. 51:</b> directivité réseaux d'antenne patch bie et 3 couches de substrats. ....	70
<b>figure 3. 52:</b> gain du réseau d'antenne patch bie et 3 couches de substrats .	70
<b>figure 3. 53:</b> S11 réseaux d'antenne patch bie et 3 couches de substrats. ....	70
<b>figure 3. 54:</b> réseaux d'antenne patch bie et 4 couches de substrats. ....	71
<b>figure 3. 55:</b> directivité du réseau d'antenne patch bie et 4 couches de substrats.....	71
<b>figure 3. 56:</b> gain du réseau d'antenne patch bie et 4 couches de substrats. ....	71
<b>figure 3. 57:</b> S11 du réseau d'antenne patch bie et 4 couches de substrats. ....	72
<b>figure 3. 58:</b> réseaux d'antenne patch bie et 5 couches de substrats. ....	72
<b>figure 3. 59:</b> directivité du réseau d'antenne patch bie et 5 couches de substrats .....	73
<b>figure 3. 60:</b> gain du réseau d'antenne patch bie et 5 couches de substrats. ....	73
<b>figure 3. 61:</b> directivité du réseau d'antenne patch bie et 5 couches de substrats.....	73
<b>figure 3. 62:</b> réseaux d'antenne patch bie et 6 couches de substrats. ....	74
<b>figure 3. 63:</b> directivité du réseau d'antenne patch bie et 6 couches de substrats .....	74
<b>figure 3. 64:</b> gain du réseau d'antenne patch bie et 6 couches de substrats. ....	74
<b>figure 3. 65:</b> S11 du réseau d'antenne patch bie et 6 couches de substrats. ....	74

### *Liste des tableaux :*

<b>tableau 1. 1:</b> Différents types d'alimentation d'une antenne patch.....	17
<b>tableau 1. 2:</b> Avantages et inconvénients des méthodes d'amélioration de la bande passante d'un monopole large bande [66]. ....	21
<b>Tableau 3. 1:</b> Dimensions de l'antenne micro-ruban rectangulaire à substrat normal.....	53
<b>Tableau 3. 2:</b> Dimension paramétrique. ....	53
<b>Tableau 3. 3:</b> les resultats pour les differentes structures d'antennes . ....	58
<b>Tableau 3. 4:</b> les résultats pour les différentes structures d'antenne. ....	65
<b>Tableau 3. 5:</b> les résultats pour les différentes structures d'un réseau d'antenne patch BIE. ....	75

## **Résumé :**

*L'objectif principal de notre travail est l'étude d'un réseau d'antenne micro ruban (patch) rectangulaire à bande interdite électromagnétique (BIE).*

*Nous étudions l'influence des paramètres géométriques de l'antenne sur la fréquence de résonance et la bande passante et sur la directivité. Les paramètres que nous avons étudiés : les permittivités du substrat, la longueur et la largeur du patch, la hauteur de substrat du patch, les couches de substrat.*

*En utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel HFSS.*

**Mots clés:** réseau d'antenne patch, BIE, encoche, substrat.

## **ABSTRACT**

*The main objective of our work is the study of a rectangular microstrip (patch) antenna array electromagnetic bandgap (BIE).*

*We study the influence of the geometrical parameters of the antenna on the resonance frequency and the bandwidth and on the directivity. The parameters we studied: substrate permittivities, length and width of the patch, substrate height of the patch.*

*Using the frequency domain electromagnetic simulation tool HFSS.*

**Key words:** patch antenna array, BIE, notch, substrate.

## **ملخص :**

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة مجموعة هوائي مدقق مستطيل الشكل ذو طبقات عازلة كهرومغناطيسي قمنا بدراسة تأثير المعايير الأساسية للهوائي على التردد الرنان وعرض النطاق الترددي والاتجاهية، المعايير التي قمنا بدرستها هي: سماحي الطبقة العازلة، وطول وعرض الهوائي، وارتفاع الطبقة العازلة وذلك باستعمال برنامج HFSS.

**الكلمات الرئيسية:** مجموعة هوائي مدقق، طبقات عازلة كهرومغناطيسي، المادة المتفاعلة الشق الركيزة.



## *Introduction générale*

Le domaine des télécommunications connaît actuellement une croissance sans précédent. Le rythme de cette expansion ne devrait pas fléchir pendant de nombreuses années. En effet, l'émergence de nouvelles technologies assure le renouvellement des produits et étoffe les services proposés aux clients toujours plus exigeants. Dans un système de communication, l'antenne est un composant à part entière qui nécessite une étude. Tout en cherchant à optimiser les performances radioélectriques d'une antenne, on doit l'adapter aux applications les plus récentes.

Pendant les deux dernières décennies les antennes micro ruban ont évolué comme une activité innovatrice majeure dans le domaine des antennes. Jusqu'au début des années 1990, les technologies micro ruban étaient employées spécialement pour les applications militaires. Depuis, on constate un changement rapide vers les applications commerciales. Un grand nombre de produits destinés aux technologies sans fil sont apparus sur le marché. Les antennes micro ruban ont quelques particularités qui les rendent idéales pour plusieurs applications commerciales. Basées sur la technologie des circuits imprimés, elles sont très peu dispendieuses à produire. La production en grande quantité est facile. Leur profil plat leur permet d'être montées dans le même boîtier que le produit qu'elles servent. Souvent elles peuvent être intégrées sur la plaque qui contient le circuit radiofréquence ou micro-onde.

# 1 **CHAPITRE I** *les réseaux d'antennes imprimées*

## **1.1 Introduction :**

Dans un système de communication l'antenne est un composant à part entière qui nécessite une étude, tout en cherchant à optimiser ces performances radioélectriques, il est donc nécessaire de concevoir des antennes bien adaptées

Depuis les années soixante-dix, on constate un essor considérable des micros antennes ou antennes plaques, favorisé par le progrès de la technologie microélectronique dans le domaine de la miniaturisation et de l'intégration électronique.

Dans les applications aéronautique, aérospatiales et militaires où les antennes de masse, de faible poids, de faible coût, élevées et faciles à utiliser, sont essentielles.

De nos jours, avec l'essor des télécommunications, ces limitations se retrouvent dans les applications sans fil commerciales. Pour répondre à ces exigences, un réseau d'antennes imprimées a été suggéré et vise à améliorer la bande passante et de bonnes capacités directionnelles pour les hauts débits. Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord la position du réseau d'antennes, la définition et la description des imprimés, ainsi que leurs caractéristiques. Ensuite, nous décrirons leurs avantages et inconvénients en termes de différentes techniques d'approvisionnement de réseau.

Cependant, des méthodes utilisées pour l'augmentation de l'épaisseur du substrat, la diminution de la permittivité relative, permettent d'améliorer le rendement de l'antenne jusqu'à 90% en réduisant les ondes de surface et permettent également d'augmenter la bande passante jusqu'à 35% [14]. Toutefois, en augmentant l'épaisseur du substrat, on crée des ondes de surface qui représentent des pertes et diminuent par conséquent le rendement de l'antenne. Ces ondes de surfaces peuvent être éliminées tout en maintenant une large bande passante par l'introduction de fentes sur l'élément rayonnant

Il est évident que les études menées sur les antennes microbandes soient orientées pour mieux perfectionner leurs avantages et de remédier à leurs inconvénients.

## **1.2 METHODES D'ANALYSE**

Depuis l'avènement des antennes microbandes, plusieurs méthodes d'analyse ont été utilisées, allant des modèles analytiques simples jusqu'aux méthodes numériques rigoureuses.

### **1.2.1 LE MODELE ELECTROMAGNETIQUE**

Les méthodes électromagnétiques consistent à résoudre directement les équations de Maxwell dans l'espace [13, 15-17]. Ces méthodes numériques sont des processus qui transforment un

problème continu en un problème discret constitué d'un assemblage discret d'éléments comportant chacun un nombre fini d'inconnues.

La méthode des différences finies et la méthode des moments sont parmi les méthodes électromagnétiques les plus utilisées.

### 1.2.1.1 LA METHODE DES DIFFERENCES FINIES

Parmi les méthodes de résolution numérique, nous avons la méthode des différences finies qui résout les équations de champs en des points discrets, définis d'une façon ordonnée dans le domaine complet de la structure. Elle résout directement les équations de Maxwell sous leur forme différentielle en remplaçant les opérateurs différentiels par des opérateurs de différence, réalisant ainsi une approximation par discrétisation [11, 22].

### 1.2.1.2 LA METHODE DES MOMENTS

La méthode des moments est une technique numérique qui permet de résoudre efficacement le système d'équations intégrales en le transformant en un système matriciel [2, 4, 6, 11, 13, 17-25].

## 1.3 Définition d'une antenne :

Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la sortie d'une énergie électromagnétique rayonné venue d'un générateur qui la transforme d'une énergie électrique d'un signal guidé ; une antenne de réception assure la transmission d'une onde électromagnétique provenant de l'espace environnant vers un appareil récepteur sous forme d'une énergie, l'antenne donc est un transducteur réciproque. Sous forme de plusieurs types

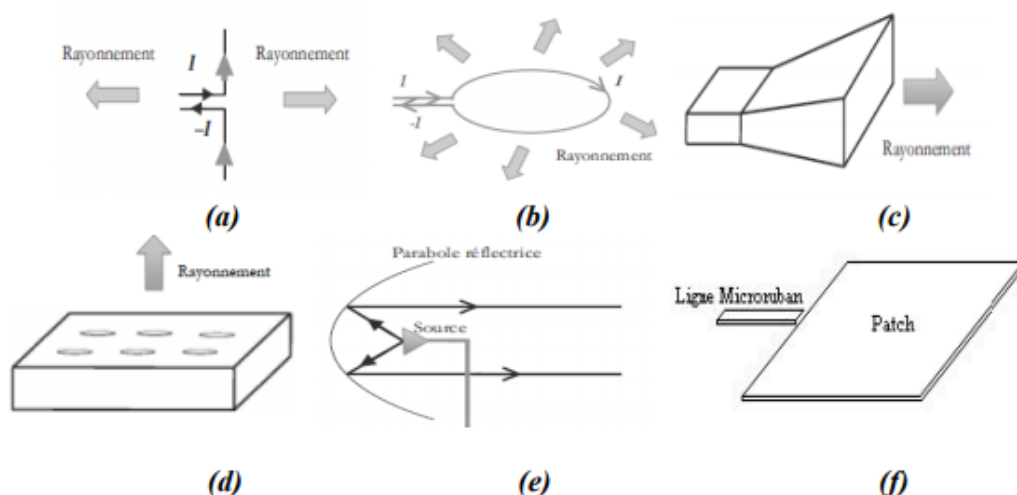


Figure 1. 1:différents types d'antennes.



Antenne dipolaire (Fig. I.1.a): elle est constituée de deux fils alignés alimentés par une ligne bifilaire, elle est souvent utilisée aux basses fréquences.

Boucle magnétique (Fig. I.1.b): elle est constituée d'un conducteur circulaire alimenté par un générateur à travers une ligne bifilaire.

Antenne cornet (Fig. I.1.c) c'est un guide d'onde rectangulaire dont la section est variable ce qui permet de passer graduellement l'onde guidée vers l'espace libre.

Elle est très utilisée en haute fréquence.

Antenne fente (Fig. I.1.d): c'est un guide d'onde rectangulaire qui contient des fentes sur sa paroi métallique, le rayonnement s'effectue alors perpendiculairement au plan troué du guide.

Antenne à réflecteur parabolique (Fig. I.1.e): elle est constituée d'une source d'émission associée à une partie métallique réfléchissante, souvent de forme parabolique.

Antenne patch (Fig. I.1.f): c'est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents. Elle est constituée d'un diélectrique. Possédant un plan de masse métallique sur une face, et l'élément rayonnant sur l'autre face.

## **1.4 DESCRIPTION DES ANTENNES PATCHES**

### **1.4.1.1 Les antennes imprimées :**

Avant, tout ce qui était technologie micro-ruban était réservée qu'aux applications militaires mais en arrivant au années 1990 le micro strip ont subi des changements et améliorations en matière d'antenne, puis y'a pas si longtemps ont connu des innovations liées au commerce et de nombreux produits issus de la technologie sans fil ont surgi sur le marché [3].

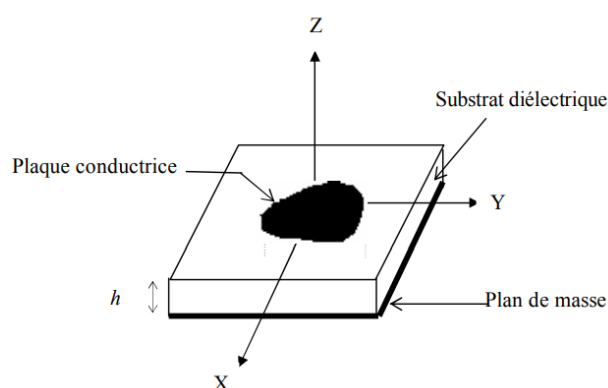
Tout d'abord la technologie des circuits imprimés soutient les antennes micro-ruban pour qu'elle soit parfaite pour des multiples applications commerciales à moindre coût et puis ça forme géométrique plate aide à l'installation dans le même boîtier où elles s'alimentent ou bien sur des plaques portant le circuit radio fréquence ou microonde [3].

Dans sa structure de base, une antenne patch est constituée d'un fin conducteur métallique (habituellement de 17,5 à 35  $\mu\text{m}$  d'épaisseur en hyperfréquence) de forme arbitraire, appelé élément rayonnant, déposé sur un substrat diélectrique dont la face inférieure est entièrement métallisée pour réaliser un plan de masse. Il est fait d'un conducteur parfait (cuivre  $\delta=5.8 \cdot 10^7\text{S/m}$ )

(Argent  $\delta=6.2 \cdot 10^7\text{S/m}$ ), (Or  $\delta=4.1 \cdot 10^7\text{S/m}$ ).

Les antennes imprimées emploient habituellement une seule couche de substrat pour le domaine des micro-ondes et des ondes millimétriques. Et pour les formes géométriques quelconques ces antennes imprimées sont installés sur un substrat diélectrique et un plan de masse [4.5]. On note plusieurs formes géométriques de ces éléments rayonnants : carré, rectangulaire, circulaire, elliptique, ou bien plus complexe. Avec des dimensions est de l'ordre  $\lambda/2$  à  $\lambda$ .

Et pour satisfaire les exigences particulières des antennes on peut construire des formes spéciales plus pointues [5].



**Figure 1. 2:**Présentation d'une antenne patch.

Dans la pratique, les formes des éléments rayonnants les plus souvent utilisées, de dimensions réduites (de l'ordre de  $\lambda_0/2$  à  $\lambda_0$ ), sont le carré, le rectangle, le disque et l'anneau. Des géométries plus élaborées sont toutefois employées pour répondre à des contraintes spécifiques sur l'antenne. Le substrat diélectrique de faible épaisseur ( $h \ll \lambda_0$ ) sert de support à l'antenne, mais surtout influe directement sur ses performances. On préférera des matériaux de faible permittivité ( $\epsilon_r < 3$ ), évitant ainsi le confinement des champs à l'intérieur de la cavité, et de faibles pertes diélectriques ( $\delta < 2 \cdot 10^{-3}$ ) favorisant un meilleur rendement de l'aérien [1, 6, 14, 26].

Les antennes imprimées emploient habituellement une seule couche de substrat pour le domaine des micro-ondes et des ondes millimétriques. Et pour les formes géométriques quelconques ces antennes imprimées sont installés sur un substrat diélectrique et un plan de masse [4.5].

On note plusieurs formes géométriques de ces éléments rayonnants : carré, rectangulaire, circulaire, elliptique, ou bien plus complexe. Avec des dimensions est de l'ordre  $\lambda/2$  à  $\lambda$ .

Et pour satisfaire les exigences particulières des antennes on peut construire des formes spéciales plus pointues [5].

A cause de la forme et dimension des antennes imprimées elles rependent de façon diable à l'exigence des systèmes et facile à s'intègre sur les mobiles (avion, voiture mobile, téléphone portable ...etc.), elles ont des atouts devant les antennes classiques (cornet et dipôle filaire), car la technologie de ces antennes imprimées prend la source de celle des circuits imprimées [6].

L'élément rayonnant peut être sous différents formes, rectangulaire, à bande mince (dipôle), circulaire, elliptique, triangulaire ou toute autre configuration [7].

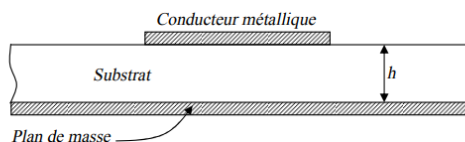


Figure I.4. Constitution d'une antenne imprimée

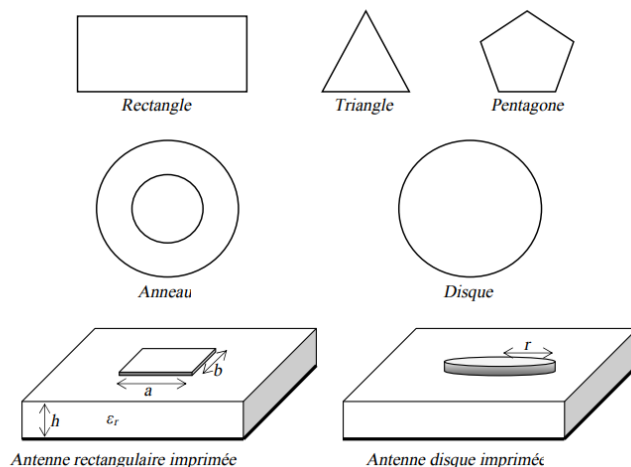


Figure 1. 3: Diverses géométries du conducteur métallique.

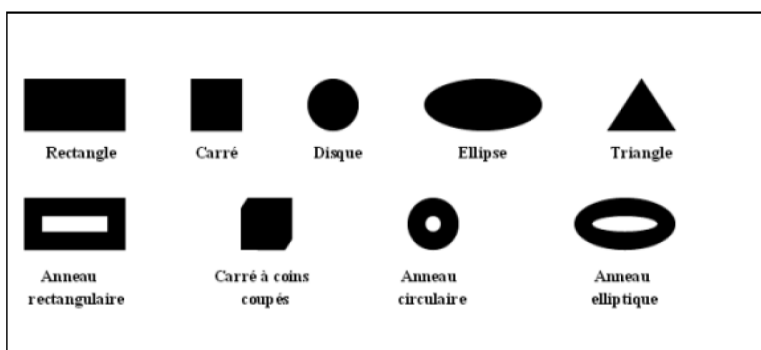


Figure 1. 4: différentes formes d'antenne micro ruban [8].

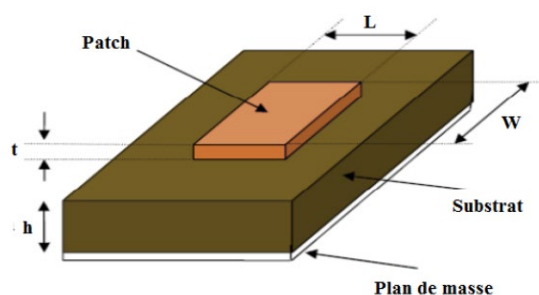
Et puis ces différentes formes du patch nous donnent une fiabilité et facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant, car la réalisation de

réseaux d'antennes et l'adaptation dépend de la présentation d'une large bande passante et peu d'espace à occuper et c'est le cas sur les dipôles micro rubans qui sont très demandés [8].

A cause de la forme et dimension des antennes imprimées elles dépendent de façon drastique à l'exigence des systèmes et facile à s'intégrer sur les mobiles (avion, voiture mobile, téléphone portable ...etc.), elles ont des atouts devant les antennes classiques (cornet et dipôle filaire), car la technologie de ces antennes imprimées prend la source de celle des circuits imprimés [6].

#### 1.4.1.2 Structure d'une antenne imprimée

La structure de base est rappelée sur la figure II.1 :



**Figure 1. 5:**Présentation d'une antenne imprimée [27].

L : Longueur du patch,

T : épaisseur du patch.

W : Largeur du patch,

H : épaisseur du substrat.

Dans sa structure de base (figure II.1), une antenne imprimée est constituée d'un conducteur métallique de forme arbitraire, déposé sur un substrat diélectrique au-dessus d'un plan de masse. Pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne, il faut:

- ❖ réduire les pertes par l'effet joule,
- ❖ améliorer la bande passante de l'antenne,
- ❖ la face inférieure est entièrement métallisée pour réaliser un plan de masse.

Le patch doit être relié au reste du circuit à l'aide d'une ligne de transmission de type micro ruban. Cette ligne va également permettre d'adapter l'impédance de l'antenne au reste du circuit pour éviter un phénomène de réflexion. La forme du patch conducteur peut être variée, mais elle influence sur les modes qui sont susceptibles de s'exciter dans l'antenne et donc sur la nature du rayonnement.

En pratique, on trouve essentiellement des rectangles, des disques, et plus rarement des anneaux ou des triangles. Leurs dimensions sont faibles (de l'ordre de  $\lambda / 2$  à  $\lambda$ ).

### **1.5 Les matériaux diélectriques utilisés**

Le substrat joue un rôle double dans la technologie micro ruban. 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 ( $\delta < 10^{-3}$ ) 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.

#### **1.5.1.1 CRITERES 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:

- (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.

En hyperfréquences, les caractéristiques principales d'un substrat sont :

- ❖ L'épaisseur  $h$ .
- ❖ La constante diélectrique  $\epsilon_r$
- ❖ Le coefficient de dilatation thermique (en ppm/°C).
- ❖ Le facteur de dissipation (tangente delta).
- ❖ La conductivité thermique (en W/m. °K).

## **1.6 Caractéristique des matériaux diélectriques du substrat :**

Les matériaux diélectriques se divisent en différentes catégories :

### **1.6.1.1 Les matériaux céramiques :**

- Les matériaux céramiques: Couramment employés pour les circuits micro rubans, dont le plus répandu est sans doute l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) avec une permittivité relative autour de 10. D'un point de vue mécanique, ces substrats disposent généralement d'excellentes qualités de surface et de rigidité, mais sont cassants et donc fragiles. Leurs permittivités sont pour la plupart élevées et ils présentent de faibles pertes ( $\delta < 10^{-3}$ ).

- **Les matériaux semi-conducteurs:** De type Arséniure de Gallium (GaAs) ou Silicium (Si) permettent couramment la fabrication des circuits M.M.I.C. La surface disponible, généralement réduite pour réaliser des antennes, destinées à des applications dans le domaine millimétrique.

**Les matériaux ferrimagnétiques:** sont constitués d'éléments métalliques tels que le fer (surtout), le Nickel et le Cobalt qui leur permettent de prendre une forte aimantation, et à faibles pertes diélectriques.

**Les matériaux synthétiques:** La plupart de ces matériaux possèdent d'excellentes propriétés électriques, une permittivité proche de 2 avec de faibles pertes ( $\tan \delta \approx 0,003$ ).

**Les matériaux Photoniques :** les cristaux photoniques sont des nanostructures périodiques diélectriques ou métal-diélectrique qui affectent la propagation des ondes électromagnétiques et en micro-ondes ces cristaux photoniques sont parfois appelés matériaux à bande électromagnétique interdite et qu'ils sont des centres d'intérêt au chercheur car il s'agit de concevoir une antenne imprimée sur une cavité constituée par ces 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 micro-ondes et de l'optique.

**Les matériaux TMM(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 ( $\tan \delta < 0,0018$ ) pour des permittivités respectivement égales à 3.25 ; 4.5 ; 6.5 ; 9.8 rigides et moins cassants que la céramique ils conservent leur dimensions et leur permittivités à des températures élevées .

**Les matériaux RO3000 :** par ajout de poudre céramique au Téflon ils sont fabriqués qui leur permettent la stabilité en température et en fréquence et ils peuvent être utilisés à haute fréquence ( $> 30\text{GHz}$ ).

**1.6.1.2 Les matériaux composites :** Ce type de matériaux et un assemblage de qualités radioélectriques et mécanique d'un substrat, par ajout de la fibre de verre ou de la poudre de céramique aux matériaux plastiques.

## 1.7 Les paramètres géométriques de l'antenne imprimée

### 1.7.1.1 Largeur du patch

La largeur du patch a un effet mineur sur les fréquences de résonance et sur le diagramme de rayonnement de l'antenne. Par contre, elle joue un rôle pour l'impédance d'entrée (sur le bord) de l'antenne (équation II.1) et la bande passante à ses résonances :

$$R_{IN} = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W}\right)^2 \quad (\text{II.1})$$

Pour permettre un bon rendement de l'antenne, une largeur W pratique est :

$$W = \frac{c}{2f_{01}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{II.2})$$

Où le terme  $f_{01}$  représente la fréquence de résonance fondamentale de l'antenne. En contrepartie, le diagramme de rayonnement est légèrement dégradé car il apparaît plusieurs lobes secondaires. Avec : c la vitesse de la lumière (3.108 m/s).

### 1.7.1.2 Longueur du patch

La longueur du patch détermine les fréquences de résonance de l'antenne. Il ne faut surtout pas oublier de retrancher deux fois la longueur  $\Delta L$  qui correspond au débordement des champs (éd II. 3).

$$L = \frac{\lambda_{g \text{ dielectric}}}{2} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_{01} \sqrt{\epsilon_{r \text{ eff}}}} - 2\Delta L \quad (\text{II.3})$$

La longueur L doit être légèrement inférieure que la longueur d'ondes dans le diélectrique. A cette fréquence d'opération,  $\lambda$  dépend du constant diélectrique efficace ( $\epsilon_{\text{eff}}$ ). L'effet de débordement du champ fait électriquement, le patch semble plus grand que sa dimension physique. Il y a donc une augmentation de  $\Delta L$  (éq II.4) de chaque côté de patch.

$$\Delta L = 0.421h \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{L}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{L}{h} + 0.8\right)} \quad (\text{II.4})$$

Donc la dimension effective du patch sera :

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (\text{II.5})$$

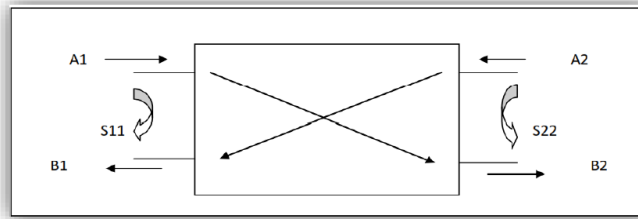
## 1.8 Caractéristiques des antennes imprimées :

L'antenne peut être caractérisé par différentes paramètre qui sont met en relief par certain application dans la communication sans fil [9] :

### 1.8.1.1 Représentation en quadripôles :

Avec A1 A2, B1B2 sont des ondes de puissance :

Et par la figure en dessous



**Figure 1. 6:**représentation en quadripôle.

On obtient :

$$B1 = S11A1 + S12A2$$

$$B2 = S21A1 + S22A2$$

Sachant que :

S11 : le coefficient qui correspond à la réflexion en entrée des quadripôles lorsque A2=0.

S12 : le coefficient qui représente la transmission de la puissance entrante en sortie vers l'entrée lorsque A1=0.

S21 : est le gain de quadripôle lorsque A2=0.

S22 : la réflexion en sortie du quadripôle lorsque A1=0[9].

### 1.8.1.2 Le coefficient de réflexion S11 :

Ce coefficient est le paramètre que l'on se base pour optimiser l'antenne car il met en évidence le transfert de l'énergie par l'antenne.

Lorsque le coefficient S11 connaît une forte atténuation à une fréquence donnée appelée fréquence de résonance alors il y a un max de transfert de puissance entre le générateur et la charge [9].

### 1.8.1.3 Directivité et gain :

#### Directivité :

Caractérise la concentration du rayonnement dans une direction donnée

La directivité  $(\theta, \varphi)$  est le rapport entre la densité de puissance surfacique  $\mu(r, \theta, \varphi)$  rayonné par l'antenne dans cette direction à la distance  $r$  et la densité de puissance qui serait rayonnée par une antenne isotrope rayonnant la même puissance  $P_{ant}$ .

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\mu(r, \theta, \varphi)}{\mu_{iso}(r)} = \frac{\mu(r, \theta, \varphi)}{\frac{P(\theta, \varphi)}{P_{ant} / 4\pi r^2}}$$



La directivité n'a pas d'unité, on l'exprime en décibels :

$$D(\theta, \varphi) \text{ dB} = 20 \log D(\theta, \varphi)$$

Avec :  $\mu(r, \theta, \varphi)$  est la puissance rayonnée par unité de surface ( $\text{W/m}^2$ )

Et  $\mu_{iso}(r) = P_{ant} / 4 \pi r^2$  en supposant qu'il n'y a pas de pertes sur l'antenne isotrope [10].

**Gain :**

Le gain est le résultat de deux effets. La directivité et l'efficacité  $\eta$  [4].

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi)$$

Avec l'efficacité de l'antenne est un chiffre compris entre 0 et 1 qui reflète les pertes présentés sur l'antenne.

(Plus  $\eta$  est proche de 1, plus la puissance injectée dans l'antenne est rayonnée donc plus l'antenne est efficace.)

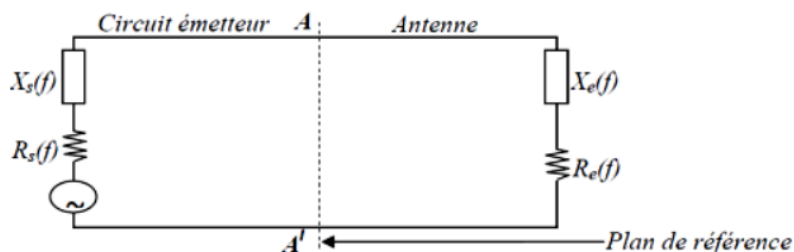
**1.8.1.4 Rendement de l'antenne**

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

$$\eta = \frac{P_r}{P_f}$$

**1.8.1.5 L'impédance de l'entrée :**

En ce qui concerne l'émission et conformément à la théorie des circuits linéaires, l'antenne peut être représentée par un dipôle d'impédance d'entrée complexe  $Z_e(f) = R_e(f) + jX_e(f)$  chargeant à la sortie du circuit émetteur, modélisé par une source d'impédance interne :  $Z_s(f) = R_s(f) + jX_s(f)$  (Figure II.3). Précisons que  $f$  est la fréquence de résonance de l'antenne.



L'impédance vue de la part de la ligne d'alimentation au niveau de l'antenne est l'impédance d'entrée de l'antenne :

$$Z_{in} = Z_0 \left( \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \right)$$

$Z_0$  : impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

Et comme  $S_{11}$  est en fonction de la fréquence on constate que l'impédance de l'entrée varie aussi avec la fréquence [9].

#### 1.8.1.6 Fréquence de résonance $f_r$ :

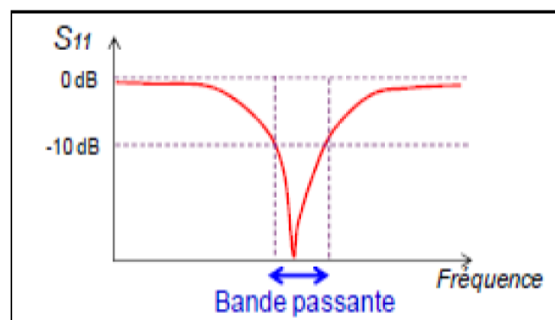
La fréquence de résonance dépend des dimensions propres des antennes et aussi des différents éléments ajoutés [11].

#### 1.8.1.7 Bande passante et facteur de qualité :

- **Bande passante :**

On appelle une bande passante la bande de fréquence du transfert d'énergie est maximal soit de l'alimentation vers l'antenne ou de l'antenne vers le récepteur et on peut aussi déduire la bande passante du coefficient de réflexion sauf si le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande. (Y'a pas de condition précise s'il s'agit de la limite du coefficient de réflexion).

Exemple d'un coefficient de réflexion inférieur à -10dB ou -15dB sur la bande passante.



**Figure 1. 7:** bande passante et coefficient de réflexion.

#### 1.8.1.8 Le facteur de qualité :

Le facteur de qualité a pour but de la miniaturisation est de réduire la taille de l'antenne tout en gardant les caractéristique électromagnétique optimale (bande passante, et le gain) d'autre terme il représente les quantités de résistance présente lors de résonance [12].

$$Q = \frac{f_{Res}}{BW}, \quad \frac{1}{Q} = \frac{R_{ant}}{2\pi f_{Res} L_{ant}}$$

Avec :

$R_{ant}$  : résistance de l'antenne.

Q : facteur de qualité du circuit RLC.

BW : bande passante à 3db.

FRes : la fréquence de résonance.

Lant : longueur d'antenne.

### **1.8.1.9 Rendement de l'antenne :**

Le rendement d'une antenne est le rapport entre la puissance totale rayonnée et la puissance fournie (d'alimentation) [9].

$$HR = \frac{Pr}{Pf} = \frac{\text{puissance totale rayonnée}}{\text{puissance fournie}}$$

On le note  $\eta_R$  pour ne pas le confondre avec  $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ .

### **1.8.1.10 Ouverture :**

Appelée aussi ouverture à mi- puissance est l'angle défini sur un diagramme en 2D où le gain (ou la directivité) vaut  $G_{db} \geq G_{max}, db-3$  ou bien  $G = G_{max} / 2$  si in travaille pas en dB [9].

## **1.9 Techniques d'alimentation :**

### **1.9.1.1 DIFFERENTES METHODES D'ALIMENTATION**

Un point important dans la conception des antennes imprimées est l'alimentation, elle détermine les modes excités que l'adaptation.

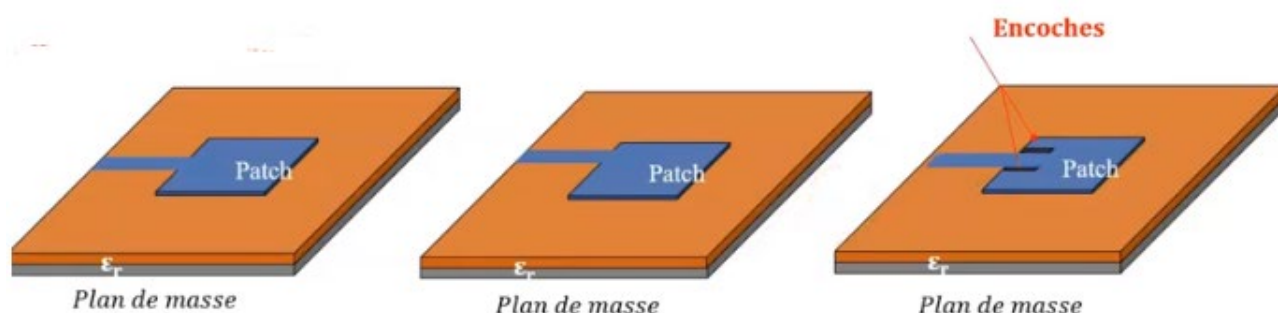
Les différentes méthodes d'alimentation des antennes patches peuvent être regroupées en deux grandes catégories [14]: les alimentations par contact (par sonde ou ligne micro ruban) et les alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente). La technique utilisée peut modifier de façon importante le fonctionnement de l'antenne, les avantages et les inconvénients des principales méthodes de base rencontrées dans la littérature sont présentés dans le tableau suivant [26]:

	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Sonde coaxiale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Pas des pertes par rayonnement de ligne. -Sélection possible d'un mode privilégié</li> <li>. -Obtention de l'impédance d'entrée par positionnement de la sonde</li> <li>-Prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats de faible hauteur</li> <li>-Technique de perçage simple jusqu' à 10Ghz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rayonnement parasite de la sonde de type mono polaire.</li> <li>-Partie salique ramenée par l'âme du connecteur à prendre en compte.</li> <li>-Technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique.</li> <li>-Rapidement cher et compliqué industriellement pour exciter chaque élément d'un réseau à forte directivité.</li> </ul>
<b>Ligne microstrip</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Procédé technologique plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation.</li> <li>-Adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rayonnement parasite de la discontinuité ligne aérienne.</li> <li>-Rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique</li> <li>- Structure figée après gravure</li> </ul>
<b>Ligne microstrip CO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Procédé technologique plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique</li> <li>- Structure figée après gravure</li> <li>-Paramétrage du positionnement relatif de la ligne nécessaire pour adapter l'antenne.</li> </ul>
<b>L M en sandwich</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Dessin du circuit d'alimentation modifiable par rapport aux aériens</li> <li>-Bande passante plus large par augmentation de la hauteur (<math>h_1+h_2&gt;h_1</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deux couches de substrat requises.</li> <li>-Difficulté pour l'intégration de dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur.</li> </ul>
<b>Ligne à fente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procédé technologique simple.</li> <li>- facilités pour intégrer des dispositifs actifs et dissiper la chaleur résultante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rayonnement arrière parasite possible de la fente</li> <li>- Transition fente</li> <li>-ligne de transmission</li> </ul>
<b>Guide d'onde coplanaire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mêmes avantages que le cas de la ligne à fente.</li> <li>- Faible rayonnement arrière</li> <li>-Transitions simples pour l'intégration des dispositifs actifs et de circuit MMIC.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Génération de modes de propagation parasites sur les guides d'onde coplanaires.</li> </ul>
<b>Couplage par fente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Réalisation du circuit de distribution et de l'aérien indépendante.</li> <li>-Séparation électromagnétique des deux couches.</li> <li>-Possibilité d'élargir la bande en associant la résonance de l'élément rayonnant à celle de la fente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Technologie plus coûteuse et complexe (positionnement des deux couches, quatre faces de métallisation)</li> <li>-Intégration sur un support mécanique nécessitant des précautions</li> <li>-Rayonnement arrière parasite de la fente lorsque celle-ci résonne au voisinage de l'élément.</li> </ul>

Couplage par fente d'une ligne encastrée	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Même avantages que le cas du couplage par fente</li> <li>- Rayonnement n'arrière nul</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Technologie très coûteuse</li> <li>-Apparition possible de modes parasites microstrip de propagation entre le ruban conducteur et le plan de masse de la fente</li> </ul>
--	---	--

**Tableau 1. 1:** Différents types d'alimentation d'une antenne patch.

**1.9.1.1.1 Alimentation par ligne micro ruban :**

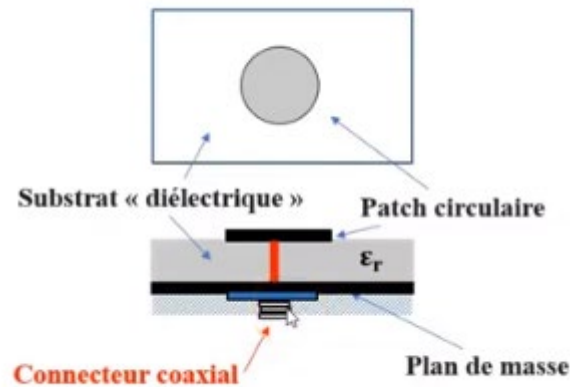


**Figure 1. 8:** alimentation par ligne micro ruban.

Comme le montre les figures, quelque configuration en ajoutant une ligne micro ruban, cette ligne peut s'ajouter de plusieurs manières soit au milieu soit un petit peu décalé, soit au milieu et en ajoutant des encoches (des petites ouvertures à fin de jouer sur l'adaptation), certainement cette technique est la moins coûteuse et très simple et très aisée à faire, avec une modélisation possible mais avec quelques inconvénients, le plus majeur est lorsqu'on veut travailler avec des surfaces qui ne sont pas planes également avec une bande passante très faible 5%, et l'apparition de l'élément parasite.

**1.9.1.1.2 Alimentation par sonde coaxiale :**

La sonde coaxiale est réalisée par le contact direct de l'élément rayonnant au conducteur central.

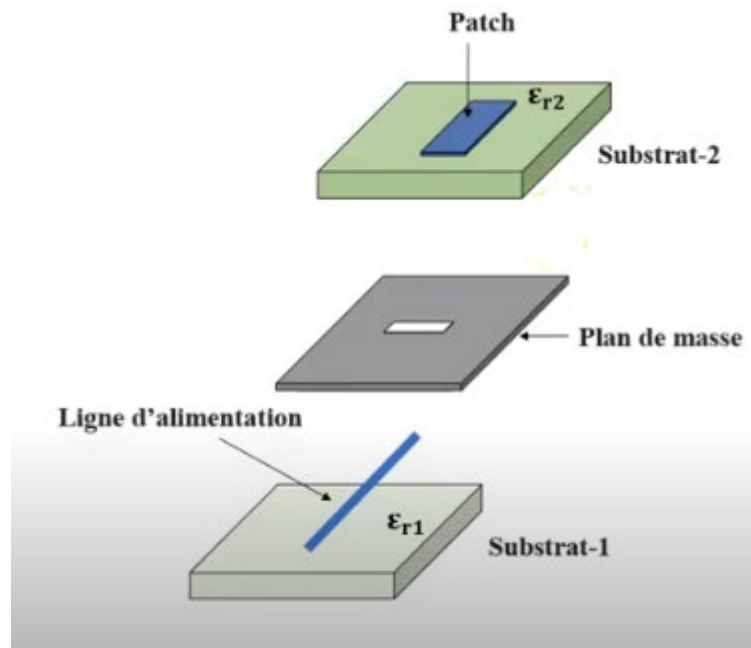


**Figure 1. 9:** alimentation par sonde coaxiale.

Et le conducteur externe est relié au plan de masse en déplaçant le point d'alimentation sur le patch, l'adaptation d'impédance sera réalisable, l'avantage est que le rayonnement parasite est réduit mais en revanche il y a quelques problèmes de réalisation tels que le perçage de substrat de soudure et peu de souplesse en formation.

#### **1.9.1.1.3 Alimentation par couplage par fente :**

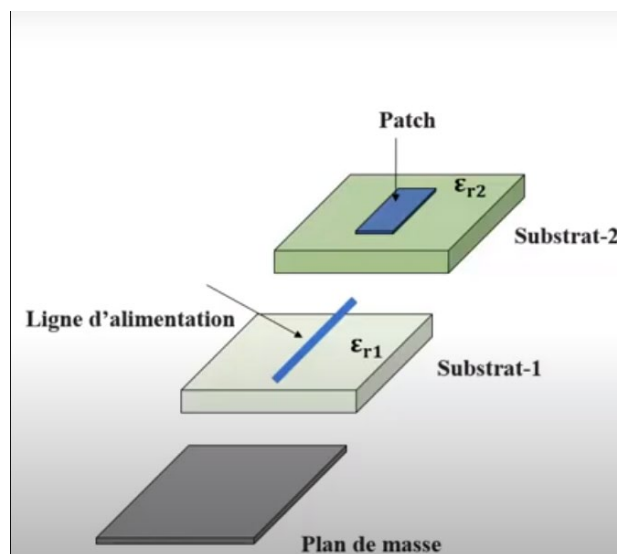
Un couplage électromagnétique est en séparant les deux substrats l'un portant l'élément rayonnant et l'autre la ligne micro ruban par un plan de masse réalisé avec une petite fente introduite à travers toute fois sa présence quelques inconvénients comme étant une technologie relativement complexe est qu'on a un rayonnement en arrière (-15/20db) mais en revanche il y'a pas de rayonnement parasite en avant (réduit) avec une modélisation facile et une pureté (excitation symétrique) de polarisation avec nombre de degrés liberté très important .



**Figure 1. 10:**alimentation par couplage par fente.

**1.9.1.1.4 Alimentation par couplage de proximité :**

Il est moins répandu mais il utilise un couplage direct d'une ligne micro ruban situé entre l'élément plan de masse et il est toujours positionné entre deux couches de substrat de permittivité différente, c'est une technique qui présente un certain nombre d'avantage c'est-à-dire le rayonnant parasite est réduit la bande passante est relativement élevé (max 136°) avec une modélisation facile par conséquent l'inconvénient majeur est une technologie complexe en terme d'alignement.



**Figure 1. 11:**alimentation par couplage de proximité.

### **1.10 Avantages et limitations des antennes patch**

Les antennes Microstrip présentent de nombreux avantages comparés aux antennes micro-ondes classiques (cornet, dipôle, filaire ...) [15,16]. et leurs applications couvrent le large domaine de fréquence : 100 MHz à 100 GHz. Certains avantages sont les suivants :

- Faible poids, encombrement réduit, configurations conformes possibles.
- Antennes multi bandes, multi polarisations possibles.
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- Faible volume et épaisseur réduite ;
- Faible coût de fabrication, production en masse possible.
- Compatibilité avec des circuits intégrés (antennes actives) [17];
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.

Toutefois, les antennes micro ruban ont également des limitations que ne présentent pas les antennes traditionnelles :

- Largeur de bande étroite, souvent associée avec les problèmes de tolérances (géométriques et physiques) ;
- Faible gain (6 dB). ;
- La plupart des antennes rayonnent uniquement dans le demi-plan
- Faible rendement ;
- Faible puissance d'émission ; Supportent uniquement des faibles puissances (100 W).
- Pureté de polarisation difficile à obtenir ;
- Faible bande passante (1 à 5%) [18] ;
- Pertes de rayonnement par ondes de surfaces

Ces limitations sont connues depuis plusieurs années et des progrès considérables ont été réalisés depuis pour améliorer les performances des antennes patch. Notamment, leur bande passante peut être augmentée jusqu'à 70 % en utilisant une configuration multicouche et leur gain peut s'accroître de 30 % en mettant en réseau plusieurs antennes.

### **1.11 Techniques d'élargissement de la bande passante**

Différentes techniques ont été envisagées pour élargir la bande passante et stabiliser le diagramme de rayonnement. Pour augmenter la bande passante du monopole, on peut citer l'utilisation d'un court-circuit, le décalage de l'alimentation, l'utilisation des encoches et la technique de l'évasement symétrique. Toutes ces méthodes se basent sur le même effet physique, à savoir le fait d'ajouter des modes supplémentaires à la structure. Des méthodes existent aussi pour stabiliser le diagramme de rayonnement du monopole carré, par exemple :

- ❖ ajouter un second élément rayonnant, identique au précédent, perpendiculaire à l'élément rayonnant principal.
- ❖ une méthode consistant à utiliser trois monopoles rectangulaires pliés, espacés de 120°.



Méthodes	Avantages	Inconvénients
<b>Court-circuit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Diminution de 50% de la taille</li> <li>❖ Fort courant sur le court-circuit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Diminution de l'efficacité à bande passante identique.</li> <li>❖ Instabilité du diagramme de rayonnement.</li> </ul>
<b>Décalage de l'alimentation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ 129% de bande passante contre 68% pour le monopole initial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Instabilité du diagramme de rayonnement.</li> </ul>
<b>Encoches</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ 169% de bande passante contre 68% pour le monopole initial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Instabilité du diagramme de rayonnement.</li> </ul>
<b>Evasement symétrique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ 129% de bande passante contre 68% pour le monopole initial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Instabilité du diagramme de rayonnement</li> </ul>
<b>Monopole croisé</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Stabilité du diagramme de rayonnement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Difficulté de fabrication. 111% de bande passante.</li> <li>❖ 169% pour monopole à évasement symétrique.</li> </ul>
<b>Monopole à 3 plaques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Stabilité du diagramme de rayonnement.</li> <li>❖ 129% de bande passante contre 68% pour le monopole initial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Difficulté de fabrication.</li> </ul>

**Tableau 1. 2:**Avantages et inconvénients des méthodes d'amélioration de la bande passante d'un monopole large bande [66].

Le tableau ci-dessus récapitule les avantages et les inconvénients des différentes méthodes permettant d'élargir la bande passante d'un monopole (exemple : rectangulaire).

### 1.12 Applications des antennes imprimées :

Le problème principal des concepteurs des systèmes de télécommunication est de remplacer les anciens modèles des antennes (classique) par des antennes patchs avec les mêmes prouesses en répondant aux aspirations des marchés industriels, on trouve divers applications qui parviennent la possibilité de ce passage :

- Télécommunication satellitaires
- Commande et contrôle
- Télémétrie par missile
- Equipement portatifs
- Eléments d'alimentations dans les antennes complexes
- Antennes d'émission utilisée en médecine
- Récepteur satellite de navigation

### 1.13 Réseau d'antenne

Un réseau d'antenne est un ensemble d'antennes séparées et alimentées de façon synchrone. C'est-à-dire que le déphasage du courant entre deux paires d'antennes est fixe.

Un réseau peut comporter des éléments qui sont alimentés par le champ produit par le reste des éléments (antennes YAGI-UDA) et non pas alimentés directement par une source (éléments parasites).

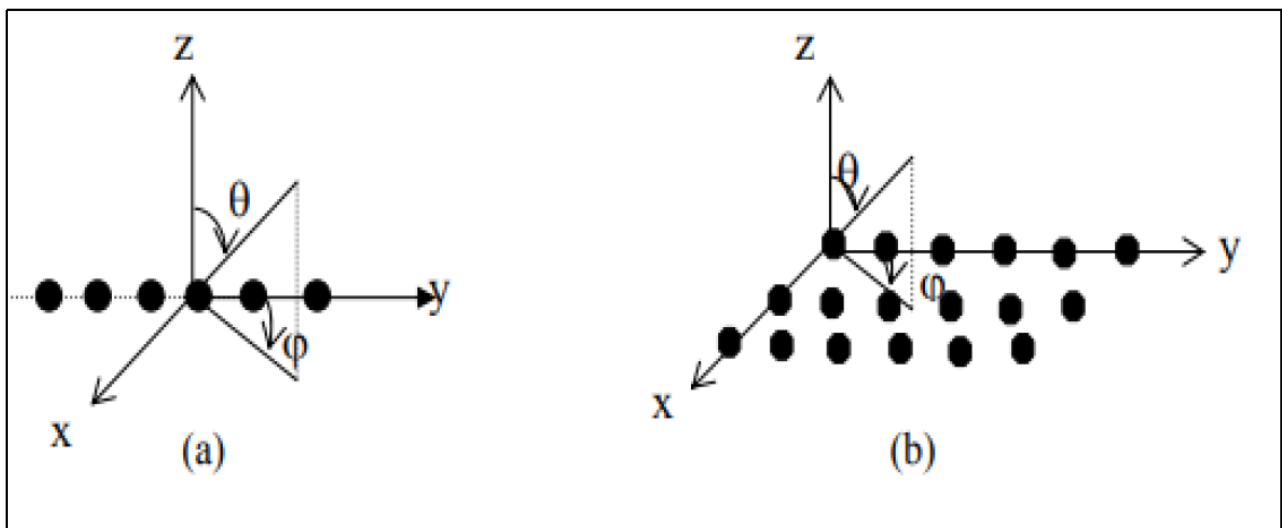
La somme vectorielle des champs produits par chacun des éléments est les champs électromagnétique produit .en choisissant correctement l'espace entre les éléments et la phase du courant qui circule dans chacun, l'interférence et l'interférence constructive dans certains directions peuvent modifier la directivité du réseau [1].

### 1.13.1 Réseaux d'antenne imprimée :

Pour répondre aux contraintes de rayonnement imposé l'antenne plaque unitaire devient souvent insuffisante.

Alors on fait appel à des éléments rayonnants relier en chaines les uns aux autres par des tançons de lignes microbandes répondant au de nom d'un réseau d'antenne imprimée. Les antennes élémentaires fonctionnent aux mêmes fréquences et sont disposés périodiquement selon une ou plusieurs directions [2].

Les applications radars, radios mobiles ou spatial et nombreuse d'autres exemples sont actuellement utilisés par des réseaux d'antennes et ces derniers sont sous formes de différentes géométries réseaux linéaires et réseaux planaires (bidimensionnels) [2].



**Figure 1. 12:**Différents types de réseaux : (a) linéaire (b) bidimensionnels.

Le champ total rayonné par le réseau est déterminé par l'addition des vecteurs champs rayonnés par les différent éléments la forme du rayonnement global doit prendre en considération les paramètres suivants :

- La géométrie du réseau : linéaire, plan .... ;
- L'espacement relatif entre chaque élément ;
- L'amplitude de l'excitation de chaque élément ;
- La phase appliquée ci chaque excitation ;
- Le diagramme de rayonnement propre à chaque élément ;

### **1.13.2 Association d'antennes en réseau :**

Un réseau d'antenne est un regroupement de plusieurs pavés rayonnants élémentaires excité par un dispositif appelé réseau d'alimentation, est constitué d'un répartiteur (ou distributeur) de puissance, qui équilibre l'amplitude à chaque source et qui imposent une phase particulière à chaque élément par un ensemble de déphaseurs, qui réalise ce dernier la fonction de balayage électrique lorsque la phase varie avec le temps (loi d'illumination ou d'alimentation).

Le dispositif mécanique utilisé par les paraboles habituelles pour la fonction de dépointage devient donc obsolètes.

Du fait de l'absence d'inertie aussi on remarque la diminution remarquable du coût globale du système, grâce à l'emplacement spatiale de chaque élément et des phases et amplitudes appliquées on peut amener des diagrammes de rayonnement particulier .en affectant une synthèse de réseau, on peut Agir sur la directivité des lobes de rayonnement [13].

### **1.14 Technique d'alimentation d'un réseau d'antenne imprimé :**

Le réseau d'alimentation d'antenne visera à atteindre d différentes sources tout en respectant la loi de pondération, la technique la plus simple consiste à fournir des particules de rayonnement à l'aide de lignes micro rubans.

Le réseau d'excitation peut être d'une variété d'architectures si nécessaire, le principe de distribution d'énergie est réalisé à l'aide de ligne micro ruban et d'un transformateur d'impédance quart d'onde [3,14].

Les déphasages dans les circuits de puissance peuvent être formés comme des supraconducteurs toutes les structures d'alimentation sont supposées être homogène du point de vue de la distribution d'énergie.

Il est essentiel de considérer que les signaux émis par les sources ont les mêmes fréquences dans le temps.

Les circuits d'excitation peuvent avoir plusieurs architectures il existe deux types :

- Alimentation en série.
- Alimentation en parallèle.

Le choix du type d'alimentation dépend de différents paramètres :

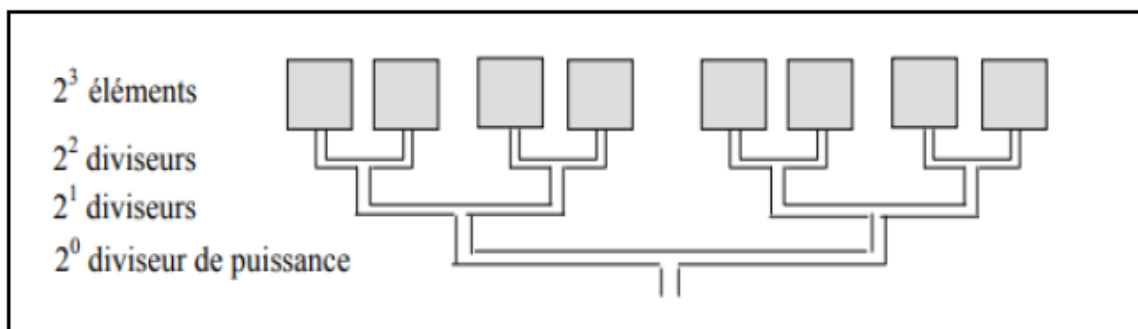
- + La loi de pondération souhaitée, en amplitude et / ou en phase ;
- + La bande passante souhaitée ;

Les réseaux en série auront des mesures de bande passante plus faibles où la loi de pondération sera plus fréquentielle que dans le cas d'une alimentation parallèle.

#### 1.14.1 Alimentation parallèle :

Un réseau parallèle, qui serait plus en comblant qu'un réseau série, en outre il convient de noter qu'un réseau parallèle à une longueur de ligne plus élevée et un grand nombre de coudes ce qui entraîne plus de pertes dans le domaine millimétrique une autre option importante dans la conception d'antenne est le substrat diélectrique, si la structure du réseau comporte  $2n$  particules rayonnées elle peut être fournie en parallèle par  $n$  phases de  $(2^m-1)$  de puissance à chaque  $m$  étage.

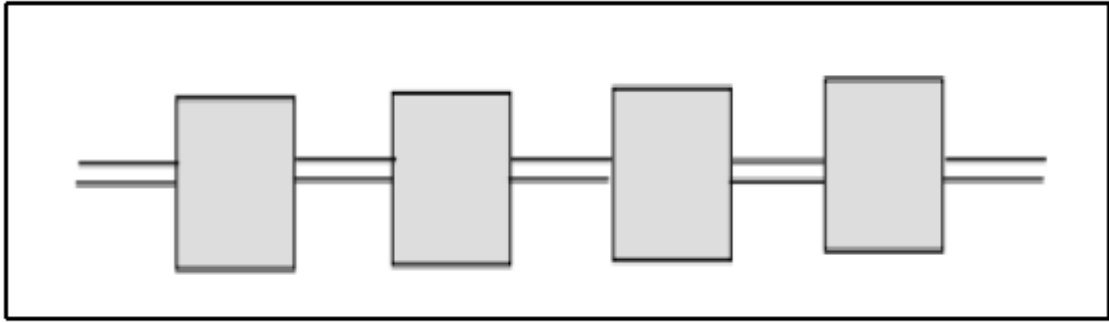
Pour que cette source d'alimentation soit totalement adaptable elle doit utiliser un répartiteur de type Wilkinson.



**Figure 1. 13:**alimentation parallèle d'un réseau linéaire.

#### 1.14.2 Alimentation série :

Comme la figure nous montre nous avons une ligne connectée en série d'élément rayonnant, chaque ligne à une entrée de déphaseur, orthogonalement reliée à une instruction commune. La distance des connexions des lignes sur la ligne principale doit être uniforme et les signaux doivent atteindre le déphaseur pour ne pas provoquer d'erreur de phase.



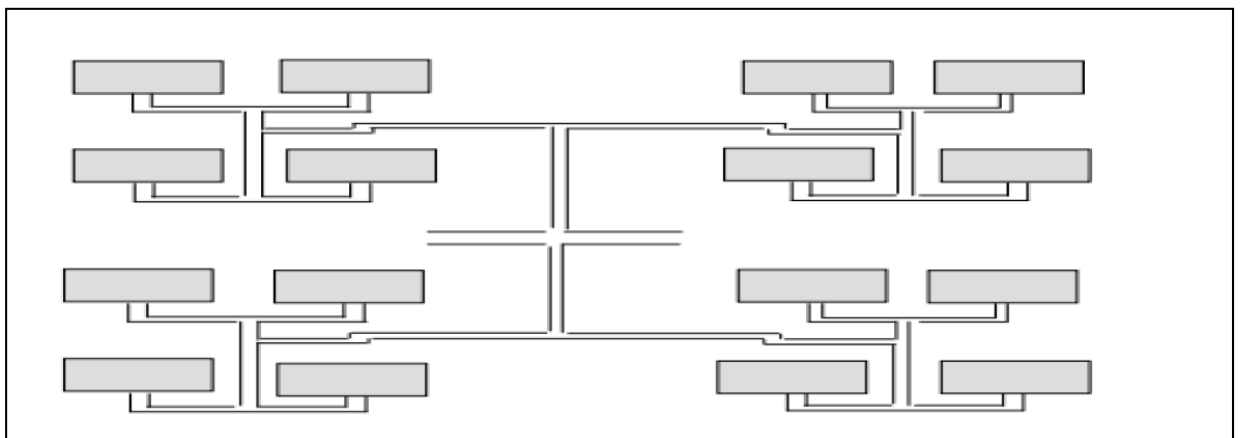
**Figure 1. 14:**alimentation série d'un réseau linéaire.

**1.15 Réseau bidimensionnels :**

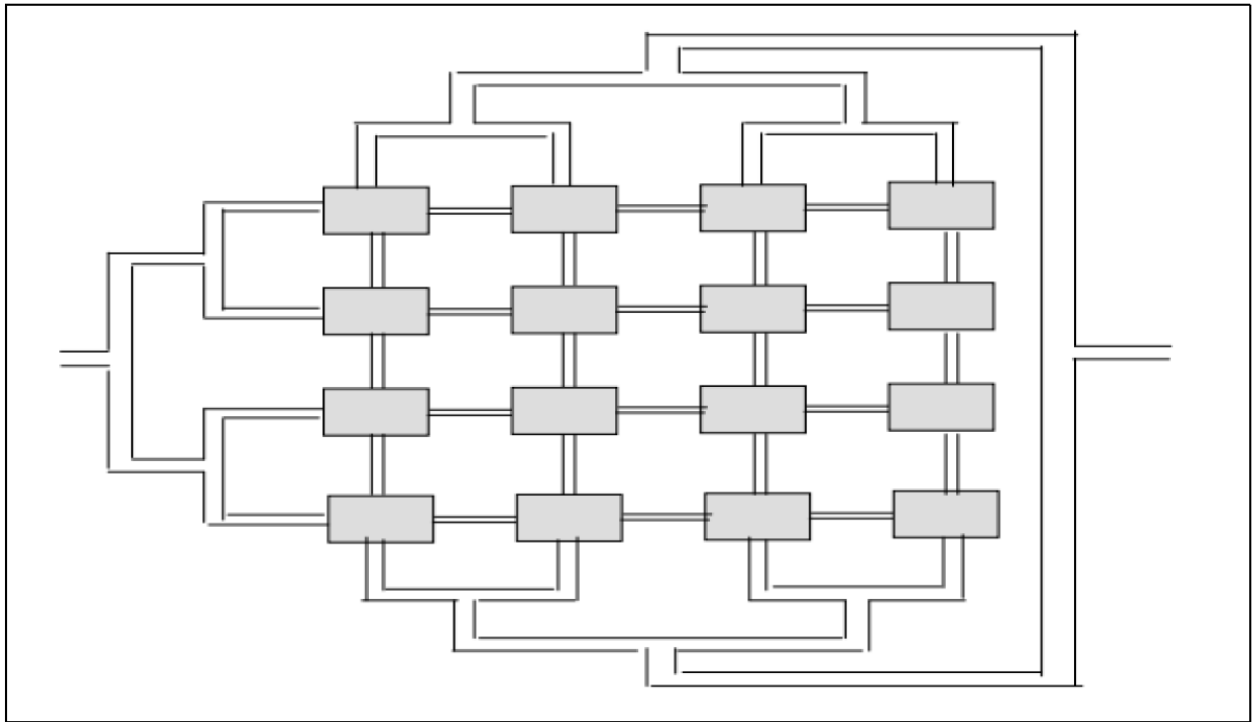
Les réseaux bidimensionnels d'antennes furent très utilisés il y'a quelque décennies pour faire des émissions directionnelles dirigées horizontalement en ondes courtes, ces communications servaient à communiquer avec d'autres ou avec des navires en mer bien entendu, avec l'utilisation des satellites de communication.

La communication commerciale par des ondes courtes et les énormes réseaux d'antennes nécessaires sont disparus et nous n'en parlerons pas.

D'autres termes les réseaux linéaires permettent de suivre le diagramme de rayonnement d'un plan traversant les sources du réseau. Pour obtenir l'effet du treillis dans tous les espaces en particulier dans le plans E et H, des réseaux bidimensionnels sont nécessaires. Ils peuvent être obtenus en mode sans résonance sur un réseau linéaire avec une alimentation série ou parallèle [3,14].



**Figure 1. 15:**Alimentation parallèle d'un réseau plan.



**Figure 1. 16:**Alimentation série d'un réseau plan.

### **1.16 Conclusion**

Nous avons essayé à travers ce chapitre de présenter brièvement, le cœur de la théorie de l'antenne imprimée nécessitera tout ingénieur ou chercheurs intéressés par cette antenne la gamme d'antenne imprimées a été brièvement présentée ou citée certaines applications de ce type d'antenne ainsi que les caractéristiques le choix du paramètre et du substrat les avantages les inconvénients et les applications de cette antenne, il s'intéresse aux techniques les plus importantes utilisées pour l'alimentation.

Dans le chapitre suivant, nous donnerons une description générale des matériaux de la bande passante d'interdiction électromagnétique.

### **1.17 Bibliographies**

- [1] Electronic Radio and Engineering. F.R. Terman. MacGraw-Hill.
- [2] H. J. Visser, "Array and phased array antenna basics» John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England 2005
- [3] Radio Research Laboratory (U.S.), "Very High-frequency Techniques," McGraw Hill, New York, 1947, pp.1-25, Chap 1.
- [4] J. D. Dyson, "The Equiangular Spiral Antenna," IRE Trans. Antennas & Propagation, vol. AP-7, pp181-187, April 1959.
- [5] R. H. Duhamel, "Dual Polarized Sinuous Antennas," U.S. Patent 4,658,262, April 14, 1987.38
- [6] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", 2005, John Wiley & Sons, INC.
- [7] D. Khedrouche, " Modélisation des antennes microbandes par une analyse tridimensionnelle rigoureuse en utilisant une méthode intégrale," Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 06/ 2009
- [8] D. Aissaoui, " Analyse à l'aide de modèles équivalents d'antennes imprimées alimentées, Université de Sétif. Juin 2011.
- [9] Dr Youssef Daher, "*Antenne – Cours Universitaire*" Université Libanaise, Faculté de Génie, Branche 1
- [10] B. Kadri, F.T. Bendimerad, E. Cambiaggio, "Modelisation of the feed network application to synthesis unequally spaced microstrip antennas arrays", International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications ICEAA 99, pp. 371-374, Torino 13-17 September 1999
- [11] A. Kamil, "*Conception d'une antenne patch ultra-large bande (3.1 Ghz-10.6 Ghz)*", thèse grade du Maître ès sciences (M. SC), Institut National de la recherche scientifique, Université du Québec, 2011
- [12] A. Boyer, "*Antennes support de cours énoncé de travaux dirigés*", Institut Informatique et Réseau, Université Toulouse, Octobre 2011
- [13] K.R. Carver, W.H. James Microstrip antennas technology. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-32, No. 8, 1984, pp. 884-887
- [14] F.T. Bendimerad Synthèse de réseaux non périodiques d'antennes micro rubans à loi d'alimentation uniforme ou prédéterminée. Thèse de Docteur de 1'Université, Université de Nice Sophia Antipolis, France, Juin1989
- [15] O. Barkat and A. Benghalia, "Radiation and Resonant Frequency of Superconducting Annular Ring Microstrip Antenna on Uniaxial Anisotropic Media", Springer, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Volume 30, Number 10, October 2009.
- [16] I. J. Bahl and P. Bhartia, "Microstrip antennas," Dedham, Ma: Artech House 1980.
- [17] D. M. Pozar, "Microstrip antennas," IEEE, Vol. 80, N° .1, pp. 79-91, January 1992
- [18] G. Kumar and K. P. Ray, "Broadband microstrip antennas," Artech House Boston. London 2003
- [19] J.R. James and P. S. Hall, "Broadband microstrip antennas," IEE Electromagnetic 2001

# **2 CHAPITRE II** *Généralités sur les structures BIE*



## **2.1 Introduction :**

Ce chapitre d'introduction de l'aperçu de la structure du BIE, avec son historique, suivi de la définition et des caractéristiques du BIE, d'une description du matériel BIE et d'une autre pour la structure.

Ce matériau a ses propres caractéristiques uniques que nous aborderons dans ce chapitre.

## **2.2 Preamble :**

Chronologiquement, nous avons trouvé des traces de l'utilisation de structures périodique répétitives pour contrôler la propagation d'une onde du XIXème siècle à nos jours avec les travaux de Lord Rayleigh dans en 1887[1].

Lorsque nous altérons successivement des couches de réfractifs diélectrique transparente, un rayon lumineux incident à la surface de ces multicouches peut être vu comme étant complètement réfléchi par des interférences successives [2].

La cause de ce phénomène : sur l'interface de chaque couche est périodique, la lumière est partiellement réfléchi, la propagation de l'onde lumineuse au sein des couches sont annulé par des réflexions successives si l'espacement entre chaque couche est périodique, William Lawrence Bragg a mis au point le miroir de Bragg est le meilleur échantillon de l'exploitation de ce phénomène en une dimension [3,4].

La notion de contrôle des ondes par des structures comme nous venons de le décrire puis nous avons parlé de matériaux qui ont des bandes photoniques, également appelées cristaux photonique, ce principe s'est ensuite rapidement étendu aux longueurs d'onde générant des cristaux électromagnétique qui sont le matériau le plus courant de la gamme de fréquences électromagnétiques [5].

En effet, quelque soit la longueur d'onde les équations de Maxwell suivent à a une loi d'échelle, et les mêmes propriétés peuvent par conséquent être observées.

A présent, met matériaux est le nom de la famille la plus large des matériaux BIE, ces met matériaux ne doivent pas leurs propriétés intéressantes à leur composition chimique mais plus à leur structuration interne, mise à part les structures BIE, les autres types de met matériaux sont classés selon la propriété exotique qui est mise en avant [6].

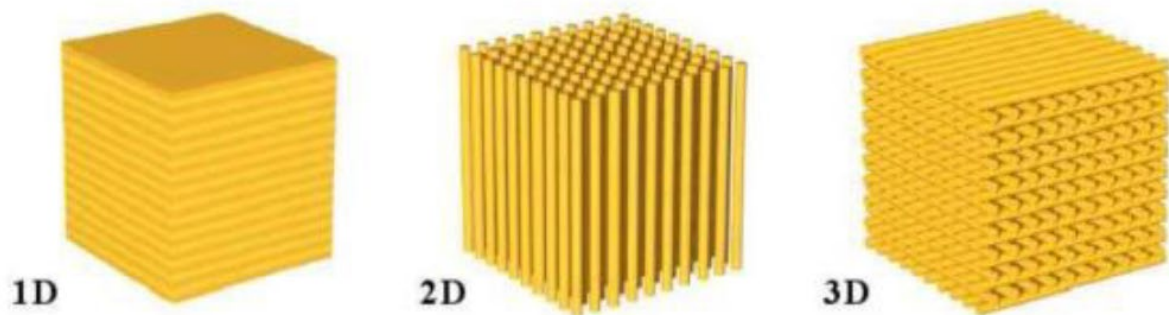
- Les matériaux main gauche : sont des matériaux artificiels qui possèdent des propriétés électromagnétique n'existant pas dans la nature, on les appelé aussi des matériaux à indice de réflexion négatifs.
- Les surfaces à haute impédance : sont des structures à motif périodique fixées ou imprimées sur un plan de masse , elle possèdent des propriétés tres intéressante d'un

point de vue électromagnétique car elles n'autorisent la propagation des ondes électromagnétique le long de leur surface que pour certains bandes de fréquences , ces surfaces appartiennent à la classe des structures à bande interdite photonique (BIP) ou encore cristaux photonique .

- Les matériaux photoniques : sont des structures artificielles formées d'une distribution périodique d'au moins des matériaux pouvant présenter des bandes de fréquences dans lesquelles la propagation des ondes acoustique ou élastique est évanescentes [7].

### **2.3 Définition de base de matériaux à bande interdite électromagnétique :**

On trouve un tres grand nombre de type de matériaux BIE (bande interdite électromagnétique). Construits à partir d'objets primaires, adapté périodiquement dans l'espace [7].

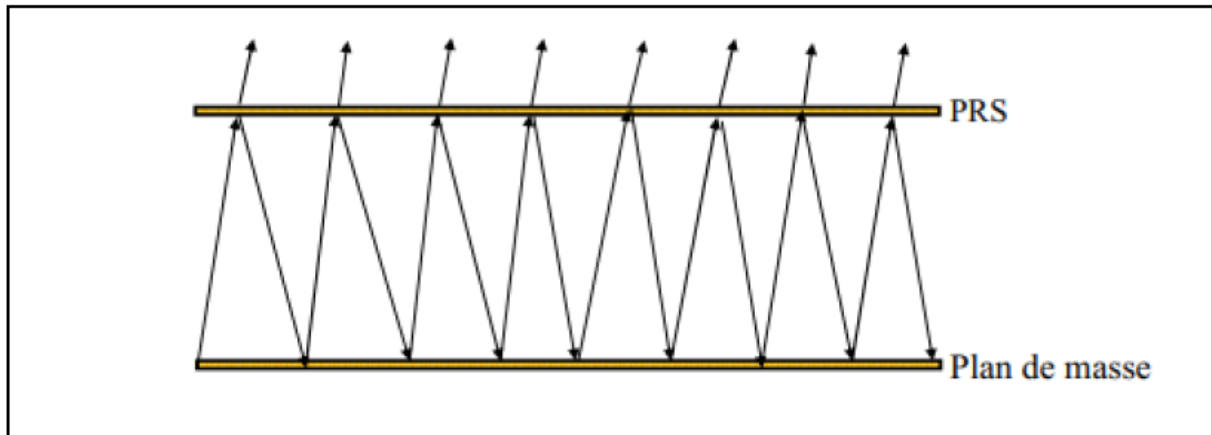


**Figure 2. 1:**Exemple de réseaux périodiques 1D, 2D, et 3D.

### **2.4 Principe de fonctionnement d'une antenne BIE :**

Généralement, une antenne à bande interdite électromagnétiques est construit par un plan de masse avec une source à faible gain et une surface partiellement réfléchissante (SPRS) mise entre les deux une distance d'environ une demi- longueur d'onde, comme le représente la figure jointe l'amélioration du gain de la source primaire ce fait grâce à la résonance de cavité et aux multiples

réflexions des ondes entre la PRS et le plan de masse.



**Figure 2. 2:** Réflexion des ondes dans la cavité résonante formée par un plan de masse et une surface PRS.

La hauteur de cette cavité joue un rôle essentielle sur les performances de ces antennes et dépendent aussi sur les propriétés en réflexion de l'interfaces PRS utilisé [8].

Si la distance entre le plan de masse et la PRS mènent à une interférence constructive et que les ondes émanant de la PRS sont en phase le gain sera au maximum.

En matière de rayonnement, l'antenne BIE réagit comme une ouverture rayonnante avec une distribution gaussienne du champ électromagnétique, avec une forte directivité et une faible bande passante qui dépend du coefficient de qualité de la cavité résonante. [9]

L'ouverture peut être considéré par la formule suivante :

$$A = \frac{10^{D/10} \cdot \lambda^2}{0.8\pi^2}$$

Avec :

A : l'ouverture.

D : la directivité.

$\lambda$  : la longueur d'onde.

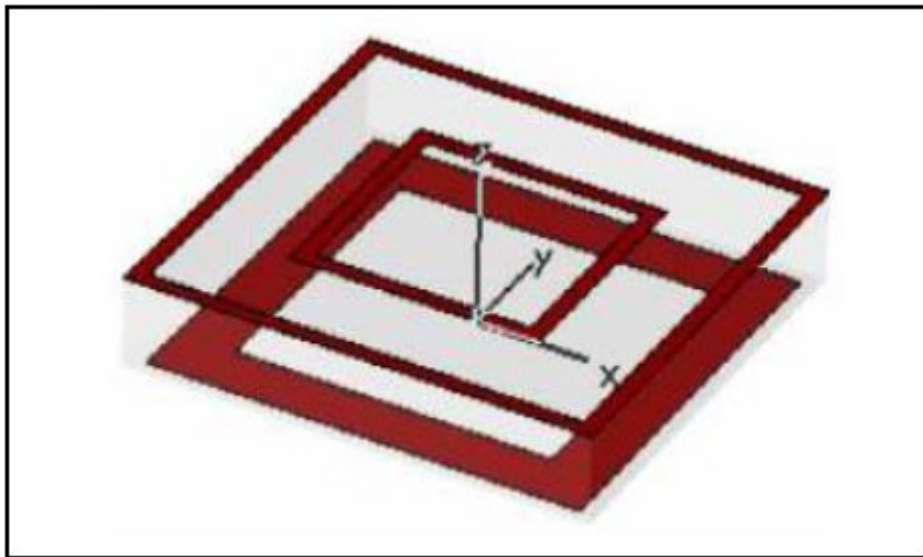
### **2.5 Les surfaces partiellement réfléchissantes :**

Pour augmenter le gain et pour rendre aussi le rayonnement de l'antenne d'excitation au maximum, on utilise les surfaces partiellement réfléchissantes (méta-surface) .le fait qu'il existe une méta-surface avec une configuration de phase croissant sur une large bande, permet également de maintenir la résonance de rayonnement sur toute la bande de fonctionnement.

Les PRS sont des interfaces constituées d'une ou plusieurs couches métallo-électrique cyclique, agencées et optimisées pour avoir les propriétés souhaitées. La réaction de PRS dépend largement de la forme et de la taille du processus de métallisation comme ainsi que les propriétés des matériaux utilisés [10].

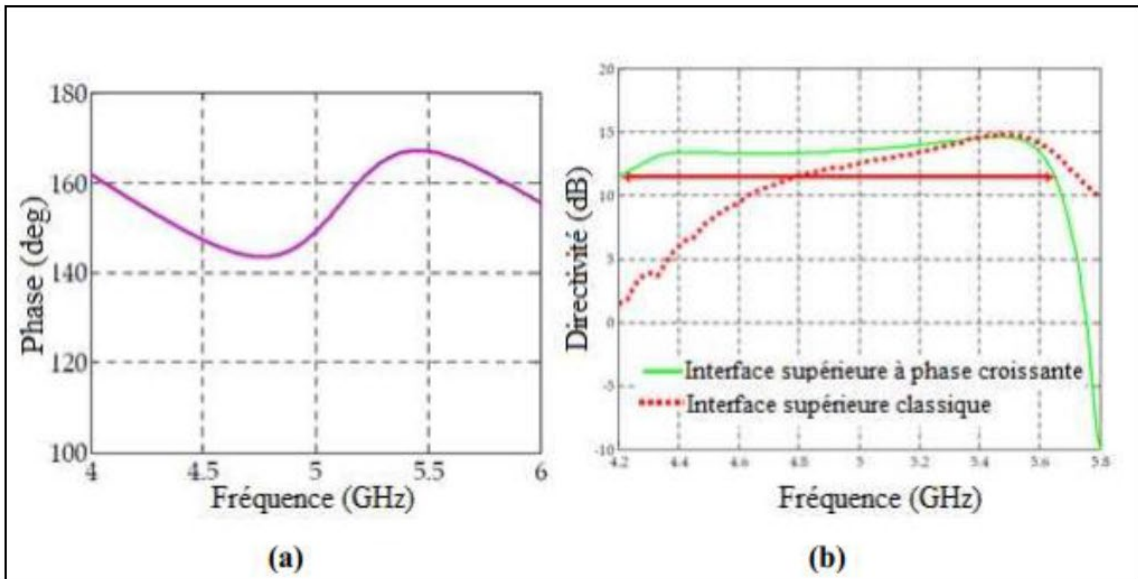
La conception de PRS se fait par simulation d'une structure primaire en considérant que la structure est cyclique et cela nous fait gagner le temps de la puissance de calcul nécessaire pour l'étude de la structure complète [10].

La métallisation duplexe de l'interface PRS lui permet d'obtenir une configuration de phase incrémentale et améliore les performances de l'antenne interne de rayonnement [10].



*Figure 2. 3: Motif élémentaire métallisé sur les deux faces.*

*La figure montre les performances de ce type d'antenne par rapport à l'antenne classique.*



**Figure 2. 4:**Phase du coefficient de réflexion à profil croissant du motif élémentaire métallisé sur les deux faces (a), directivité de l'antenne proposée et celle de l'antenne classique (b).

Il a été démontré que la combinaison de métallisations capacitatives et inductives à ouvertures permet d'élargir la bande passante de rayonnement [11].

Comme on a trouvé cette combinaison a pour améliorer les performances de rayonnement de l'antenne suggérées dans la figure en dessous [12], et comme on peut le voir aussi sur la deuxième figure l'augmentation du gain de plus de 4dBi dans l'antenne proposée est dû à l'ajout des méta-surfaces sur une fréquence de (56Hz – 86 Hz).

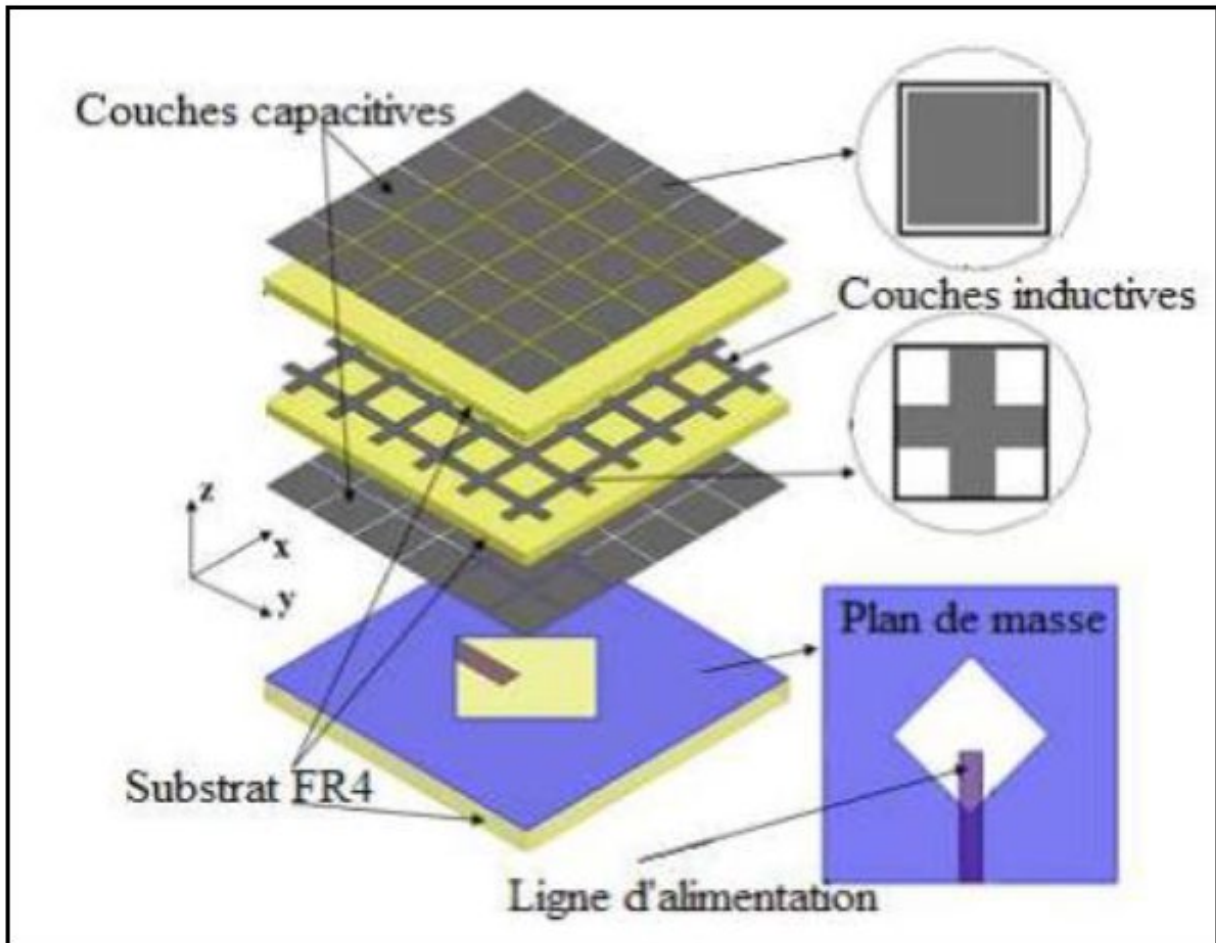


Figure 2. 5: Structure d'antenne utilisant des métallisations inductives et capacitives.

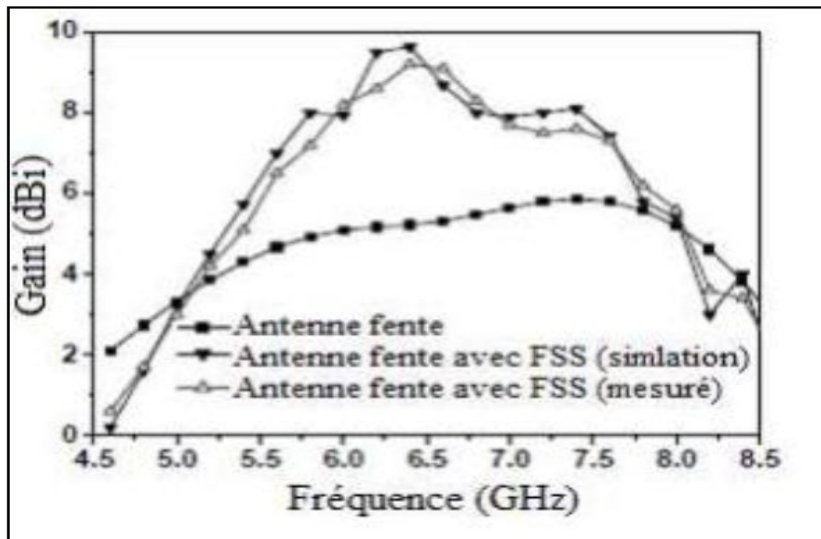
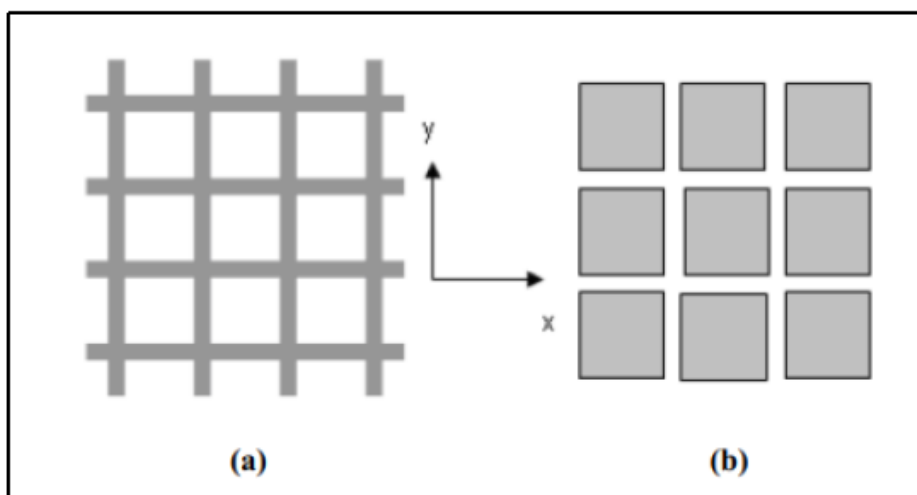


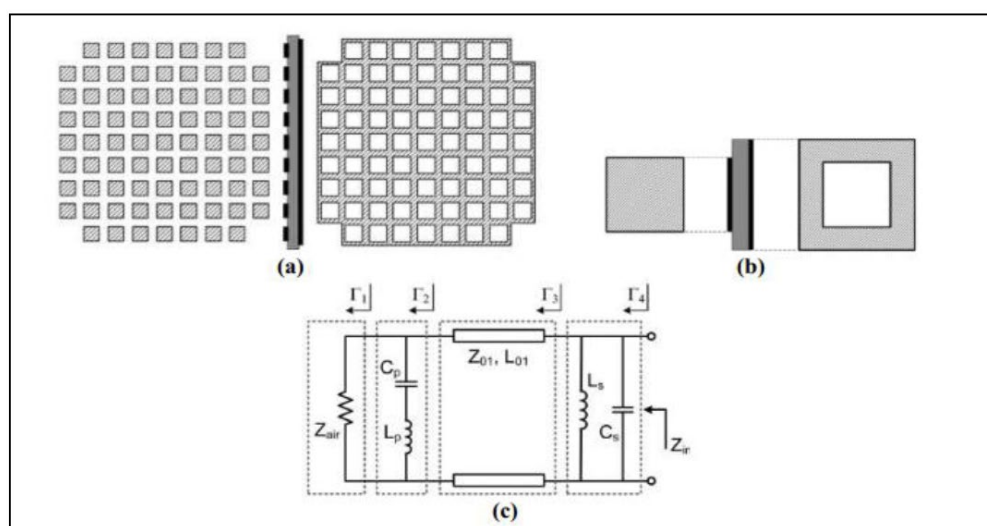
Figure 2. 6: Gain de l'antenne avec et sans méta-surfaces.

Point de réflexion, parmi plusieurs méthodes exploitées pour l'analyse structurale, on peut mentionner le modèle de circuit équivalent comme l'un des plus simples, dans cette méthode diverses m' métallisation du modèle de base structurale périodique sont modélisées comme des composants inductifs capacitifs sur une ligne de transmission cette approche permet la prédiction et la vérification des caractéristiques [11].



**Figure 2. 7:**modèle de circuit équivalent.

Les structures capacitives peuvent être représentées respectivement, par une inductance en série avec une capacité et une inductance en parallèle avec une capacité [9].

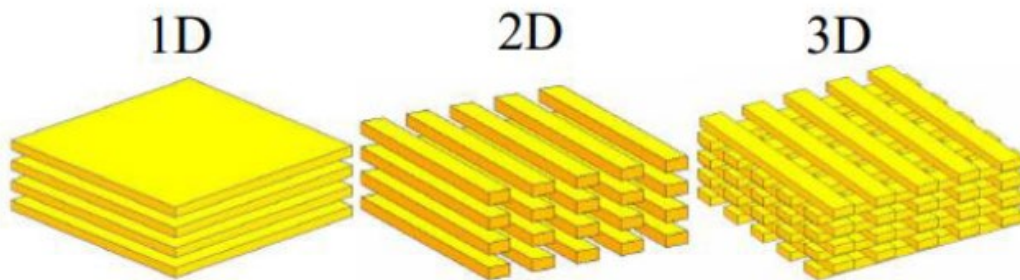


**Figure 2. 8:**Structure périodique proposée dans la référence, (a) l'interface de la PRS proposée, (b) motif élémentaire, (c) circuit équivalent du motif élémentaire.

## 2.6 Description des matériaux BIE diélectriques :

Avec le désir de contrôler les matériaux avec les matériaux BIE et leurs propriétés électromagnétiques, pour les matériaux semi-conducteurs [13].

La composition d'éléments diélectrique ou métallique est par des structures périodiques à (1D, 2D, 3D) directions des matériaux BIE, ils ont la propriété de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques, ces structures peuvent agir comme des filtres fréquentiels ou des filtres spatiaux.



**Figure 2.9:** Exemples de Structures Périodiques 1D, 2D et 3D.

La fréquence des ondes étant un facteur limitant pour ces structures, les chercheurs travaillent dans le domaine de ces matériaux, ils ont tenté de développer des structures BIE isotropes qui conservent leurs propriétés quel que soit l'angle d'occurrence des ondes [13].

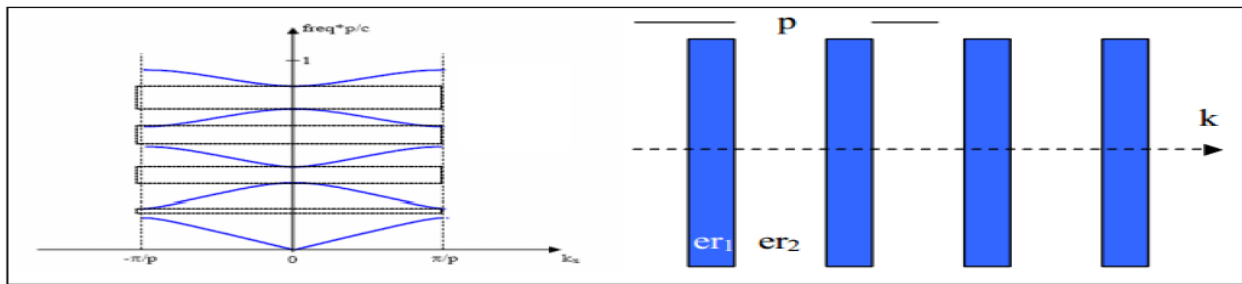
### 2.6.1 Réseaux unidimensionnels :

L'architecture 1D est la plus ancienne bien qu'elle ait été récemment incorporée dans l'architecture BIE.

En effet, ils ont été longuement étudiés et sous forme de miroirs diélectriques ou de filtres optiques.

Elle consiste à empiler plusieurs couches de matériaux avec des intervalles admissibles différents, les bandes interdites sont toutes plus grandes car cet indice est élevé pour une épaisseur de structure égale au quart de la longueur, une fois réalisée, la conception de ce type est plus simple mais les bandes interdites sont donc produites très sensibles à la fréquence des ondes, afin d'obtenir le contrôle de la bande restreinte quel que soit l'angle d'incidence, il est nécessaire d'étendre le cycle aux trois dimensions [13].





**Figure 2. 10:**Structure 1D et Son Diagramme De Dispersion.

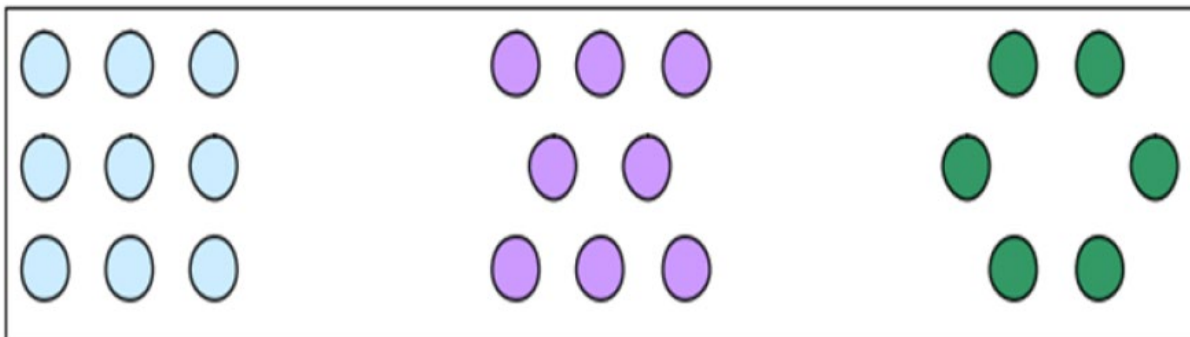
### 2.6.2 Réseau bidimensionnel :

L'architectures 2D sont des cristaux qui ont une structures cyclique dans les deux directions et reste homogène dans la troisième, par conséquent, nous pouvons étudier les ondes électromagnétiques incidentes structurées en 2D à deux polarités distinctes les matériaux TE et TM.

TE (champs électrique parallèle aux barreaux des structures).

TM (champs électrique perpendiculaire aux barreaux).

Le comportement en fréquence n'est pas nécessairement identique en effet, l'apparence de la bande interdite en fonction du contraste doit être plus élevée selon le type de réseau La figure ci-dessous présente 3 types de réseaux (carré triangulaire et hexagonal) [14].

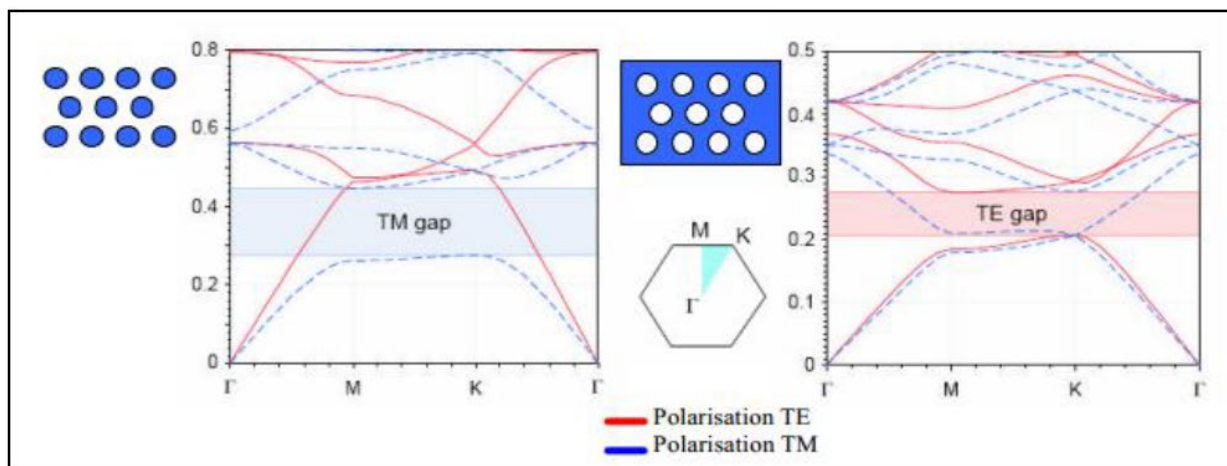


**Figure 2. 11:**Exemples De Différents Réseaux 2D.

Ce sont les paramètres géométriques qui signifient que le pas des réseaux, le diamètre des tiges, le contraste d'indice qui fixent les largeurs et les positions des bandes interdites permmissives.

La figure jointe présente :

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



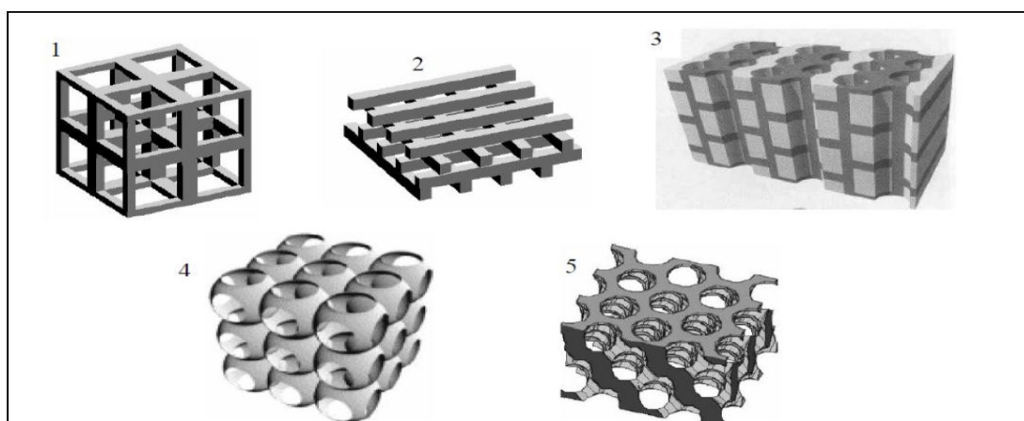
**Figure 2. 12:**Bandes Interdites En Fonction Du Réseau Et Du Type De Polarisation.

Dans les deux cas , nous notons qu'il y'a pas de chevauchement des bandes interdites dans les deux polarités , cependant , lorsque les bandes d'interdiction correspondent d'une manière ou d'une autre à chaque section chevauchant uniformément nous parlerons de bandes d'interdiction complète ; en fait ce n'est pas donc le cas d'une structure tridimensionnelle où théoriquement , on peut obtenir une bande vraiment totalement interdite , c'est-à-dire en l'absence de possibilité de propagation quelles que soient la direction et la polarisation de l'onde incidente[14] .

### 2.6.3 Réseaux tridimensionnels :

L'architecture 3D est la première structure à être étudiée avec la structure 1D ou le réseau de Bragg.

Le but est d'obtenir une structure 3D qui fonctionne sur les mêmes principes qu'un miroir de Bragg mais avec une perturbation purement photonique qui est dans toutes les directions de l'espace, il existe un grand nombre de structures possible [15].



**Figure 2. 13:**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 fait, très peu de structures 3D ont une bande complète HO, CHAN et Soukoulis ont été les premiers à démontrer théoriquement la présence d'une bande complètement interdite dans une symétrie cubique avec la face centrée ou communément nommée structure diamant.

Les deux types de structures BIE 3D produites dans les champs micro-ondes pour des raisons évidentes de moindre contrainte dans le domaine optique sont la Yablonovite et les structures de Tas de bois, ceci est suivi d'un empilement de tiges diélectriques rectangulaires arrondies, deux degrés successifs sont perpendiculaires l'un à l'autre et deux barres parallèles consécutives distantes d'un demi-cycle.

Certaines structures de types Tas de bois étaient dans le domaine hyperfréquence soit avec des tiges d'aluminium soit en silicium grâce à des mailles empilées avec des broches gravé l'un sur l'autre pivotés de 90° à chaque étage avec le respect d'alignement de l'ensemble [15].

Auguste Bravis a mis en place des classifications de différentes familles de cristaux, il a montré qu'ils peuvent être repartis en 7 familles et 14 types de réseaux.

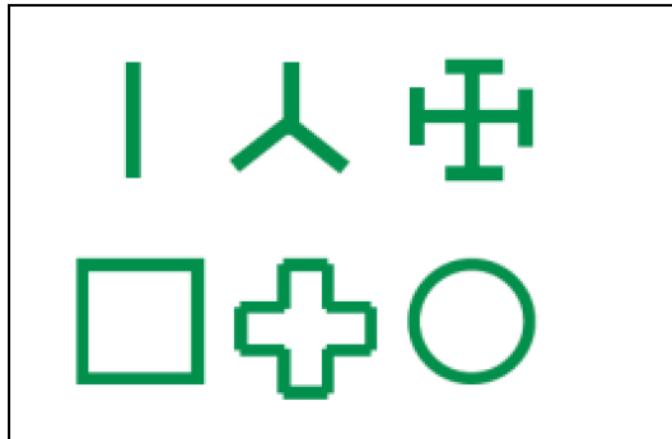
C'est la base de l'architecture tridimensionnelle cubique.

### **2.7 Description des structures BIE métalliques :**

Les matériaux de la première bande ont été fabriqués à partir d'un matériau purement diélectrique pour satisfaire des applications dans le domaine optique ; en effet, sur le terrain, l'utilisation de structures métallique est difficile car il y a de fortes pertes à ces fréquences.

En revanche, en hyperfréquences et en radiofréquences, dans certains cas les pertes sont négligeables en conséquence le métal est un réflecteur presque parfait avec une faible absorption, pour la fréquence d'ordre de gigahertz l'épaisseur de peau d'est-elle très petite par rapport à la longueur d'onde  $\lambda$ .

Bien inférieur à la fréquence optique c'est là depuis une cinquantaine d'années, les premières études d'éléments métalliques avec différents axes périodiques visent à créer des polariseurs et des réflecteurs, ils étaient également autorisés à concevoir des surfaces sélectives en fréquence ou des SSF, mais étaient plus intéressés par les structures avec des motifs 1D ou 2D, la structure métallique BIE, également connue sous le nom de IEM, est une extension de ces réseaux métalliques cycliques en couches de plusieurs dimensions.

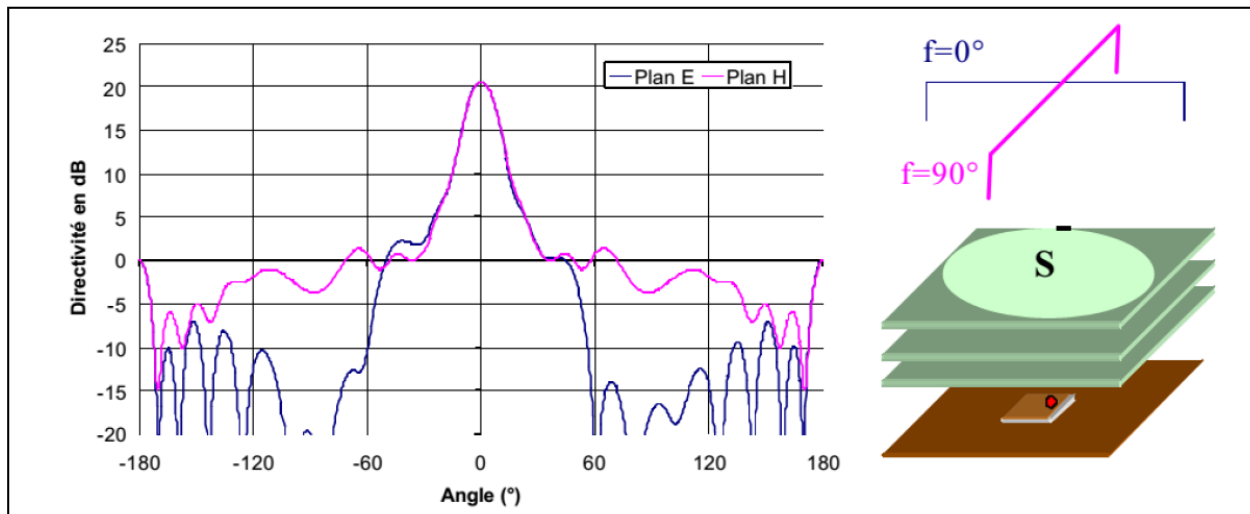


**Figure 2. 14:**Exemples de Surfaces Sélectives en Fréquence (SSF).

### **2.8 Caractéristiques et performances de l'antenne à résonateur BIE :**

Le but de la recherche sur les matériaux du BIE est de concevoir des antennes directionnelles, ce paragraphe présentera et décrira les dissemblables étapes essentielles pour la réalisation d'une telle antenne mais expliquera son fonctionnement à travers ses divers paramètres, il faut d'abord chercher à déterminée l'activité de l'antenne par son adaptation et son impédance puis un second par son rayonnement qu'elle reçoit [16].

- Adaptation de l'antenne :  
L'adaptation de n'importe qu'elle antenne est l'un des objectifs essentiels et nécessaires lors de la construction d'une antenne.
- Diagrammes de rayonnement et gain :  
L'échantillon rayonné dot présenter un seul lobe verticalement par rapport au plan de masse, en effet le sens de l'énergie émise par la source d'alimentation doit correspondre au sens de propagation admissible des matériaux BIE. Dans ce cas l'appareil complet fonctionnera.  
De plus, cette nouvelle énergie n'est pas rayonnée hors du BIE, il est donc essentiel d'utiliser des sources avec une antenne plaque de second niveau bas pour bénéficier de la direction



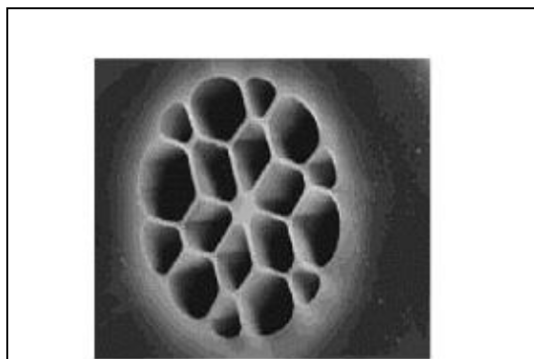
**Figure 2. 15:**Diagramme de rayonnement et directivité d'une antenne à résonateur BIE.

## 2.9 Domaines d'application [17]:

Dans cette section, nous décrivons diverses applications des matériaux de bande électromagnétiques, nous serons limités dans le cas des cristaux photoniques bidimensionnel qui offrent actuellement plusieurs applications, tout d'abord nous parlerons du domaine optique puis nous appellerons le domaine des micro-ondes.

### 2.9.1 Dans le domaine de l'optique les fibres optiques :

La fibre électromagnétique cristalline est entrée dans le domaine des applications industrielles en 1995 c'était la date où ils ont été suggérés pour la première fois, ces fibres sont obtenues en empilant plusieurs tubes de silices pour obtenir une « préformé ». Cette pièce est ensuite chauffée à une température très élevée à 1800°C puis étirée de sorte qu'elle ait un diamètre d'environ 125µm similaire à la fibre classique. Les fibres sont ensuite protégées par une gaine en plastique.



**Figure 2. 16:**photographie d'une fibre à trous, de diamètre de cœur (au centre) de 1µm.

*Ces fibres cristallines ont également des propriétés de dispersion contrôlables par leurs paramètres géométriques*

### **2.9.2 Les micro- résonateurs :**

L'usage des défauts ponctuels et linéaires permet de générer des résonateurs microscopiques et des guides d'ondes correspondantes, la mise en œuvre des résonateurs microscopiques est obtenue en introduisant des points dans la structure cristalline électromagnétiques.

Les premières études de résonateurs microscopiques bidimensionnels ont été réalisées par Labilloy en 1997.

### **2.9.3 Les guides d'ondes :**

L'idée de construire des guides d'ondes a été évoquée en 1994 et les premières réalisations remontent à 1999, les guides linéiques présentent beaucoup de pertes, on trouve un autre type de guide que nous appelons « guide avec virage » filtres et multiplexeurs : un type important peut être génère avec des cristaux électromagnétiques.

Le multiplexage en longueur d'onde (WDM) (Wavelength Devising Multiplexing) le but est de bien insérer ou extraire les longueurs d'onde précise, divers réalisations ont montré la chance du couplage d'une cavité avec un guide.

### **2.9.4 Dans le domaine micro-onde :**

Un grand nombre de groupes chercheurs se sont misent à l'étude du BIE aux fréquences micro-ondes en raison des applications possible dans cette gamme de fréquence les télécommunication en particulier les antennes , sont intéressantes , alors on peut utiliser des matériaux BIP pour réaliser : les substrats d'antenne, les surfaces a haute impédances , les filtres planaires , guides, multiplexeurs, et bien sur l'amélioration du rendement des antennes par l'utilisation des substrats à bas des cristaux électromagnétiques ultras réfractifs.

### **2.10 Conclusion :**

Les antennes à BIE sont réputées pour leur capacité à fournir plus de rayonnement directionnel sans avoir besoin de systèmes électriques complexes.

Le développement de ces antennes à partir de matériaux BIE est discuté dans ce chapitre.

Le principal inconvénient de cette antenne est la faible bande passante de rayonnement où le principale avantage d'un réseau c'est d'améliorer cet inconvénient.

## 2.11 Bibliographies

- [1] L. Rayleigh. "On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure". *Philosophical Magazine*, 24:145–159, August, 1887.
- [2] John D. Giannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, and Robert D. "Meade *Molding the Flow of Light*". Princeton University Press, 2008
- [3] Y. Rahmat-Samii and F. Yang. "Applications of EBG in low profile antenna designs: What have we learned? In Saïd Zouhdi, Ari Sihvola, and Alexey P. Vinogradov, editors, *Metamaterials and plasmonics: Fundamentals, Modelling, Applications*. Springer, 2008.
- [4] V. G. Veselago and E. E. Narimanov. The left hand of brightness: past, present and future of negative index materials. *Nature Materials*, 5:759–762.
- [5] Viktor G Veselago. "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ". *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4) :509, 1968.
- [6] Alain Priou. Matériaux composites en électromagnétisme. *Techniques de l'Ingénieur*, (E 1165).
- [7] Mohamed Farhat, Sebastien Guenneau, and Stefan Enoch. "Ultrabroadband elasticcloaking in thin plates". *Phys. Rev. Lett.*, 103(2):024301, July 2009.
- [8] P. de Maagt, R. Gonzalo, Y.C. Vardaxoglou, and J.-M. Baracco. "Electromagnetic band gap antennas and components for microwave and (sub) millimeter wave applications". *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 51(10):2667 – 2677, Oct. 2003.
- [9] A. Chaabane, F. Djahli, H. Attia, L. M. abdelghani and T. A. Denidni, "Wideband and high-gain EBG resonator antenna based on dual layer PRS", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, no. 1, 98–101, 2017
- [10] H. Liu, S. Lei, X. Shi and L. Li , "Study of antenna superstrates using metamaterials for directivity enhancement based on Fabry-Perot resonant cavity", *International Journal of Antennas and Propagation*, article ID 209741, 1–10, 2013
- [11] L. Li, S. Lei and C. H. Liang, "Metamaterial-based Fabry-Perot resonator for ultralow profile high-gain antenna", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, no. 11, 2620–2623, 2012.
- [12] A. R. Vaidya, R. K. Gupta and S. K. Mishra, "Efficient, high gain with low side lobe level antenna structures using parasitic patches on multilayer superstrate " *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, no. 6, 1488–1493, 2012
- [13] A. R. Weily, T. S. Bird and Y. J. Guo, "A reconfigurable high-gain partially reflecting surface antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 11, 3382–3390, 2008.
- [14] N. Wang, Q. Liu, C. Wu, L. Talbi, Q. Zeng and J. Xu, "Wideband Fabry-Perot resonator antenna with two complementary FSS layers", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 16, no. 5, 2463–2471, 2014
- [15] L. Moustafa, "Conception d'antennes à bande interdite électromagnétique large bande et multi bandes à base de méta surfaces", Thèse de doctorat présentée à l'université de Limoges, France, 2009
- [16] HAMDIKEN .N "Analyse d'une antenne microbande circulaire par la méthode neurospectrale " thèse de Magister, Institut d'électronique, Université de Batna.2010.



[17] A. BOUFRIOUA "Contribution à l'étude des antennes à patch résistifs et parfaitement conducteur tenant compte d'une source d'excitation et des nouvelles formes asymptotiques de courant " thèse de Doctorat, Institut d'électronique, Université de Constantine, Novembre 2006.

# **3 CHAPITRE III** *Résultats & discussions*

### 3.1 Introduction :

La phase de conception d'une antenne, à l'aide d'un logiciel adapté est une étape incontournable dans un souci de gain de temps et d'optimisation de structure aux paramètres désirés. La conception permet également de prendre en compte les paramètres diélectriques et conducteurs des matériaux bas coût choisis, qui ne sont pas parfaits, et de nous permet de rapprocher des futures antennes réalisées.

Pour cela, nous avons choisi un outil de simulation électromagnétique HFSS qui étudie et simule des structures complexes en trois dimensions, il est exploité notamment pour calculer les paramètres S, les fréquences de résonnances ainsi que les champs électromagnétiques et la visualisation du diagramme de rayonnement en 3D.

Dans ce chapitre, en premier, on va décrire le logiciel de simulation HFSS qu'on a utilisé pour notre conception , ensuite présenter les structures d'une antenne patch sans encoche et avec encoche et des antennes micro ruban à substrat BIE , et enfin l'analyse des résultats de simulation de l'antenne patch jusqu'au réseau d'antenne .

### 3.2 Logiciels de Simulation Electromagnétique

Actuellement, les concepteurs des antennes utilisent souvent des logiciels de simulation électromagnétique. Ces logiciels permettent soit une conception multicouche en 2D (c'est le cas, par exemple, de Momentum développé par Keysight Technology) soit une conception 3D comme (comme HFSS d'Ansys, FEKO d'Altair et CST Microwave studio). La différence entre ces logiciels, hormis l'Interface Homme Machine (IHM), réside dans les méthodes numériques qu'ils utilisent pour calculer la réponse électromagnétique des structures modélisées.



*Figure 3. 1: logo des principaux logiciels de simulation.*

### 3.3 Procédure de simulation

Cette partie est essentiellement réservée pour la représentation des différentes Simulation du réseau d'antenne BIE. Nous présentons également ces résultats en termes de coefficient de réflexion S11, gain ainsi que le diagramme de rayonnement.

Les simulations sont effectuées à l'aide du logiciel HFSS. Logiciel de simulation de champ électromagnétique HFSS est un simulateur électromagnétique de haute performance pour les problèmes en 3D. Les principales caractéristiques de ce logiciel peuvent être regroupées comme suite :

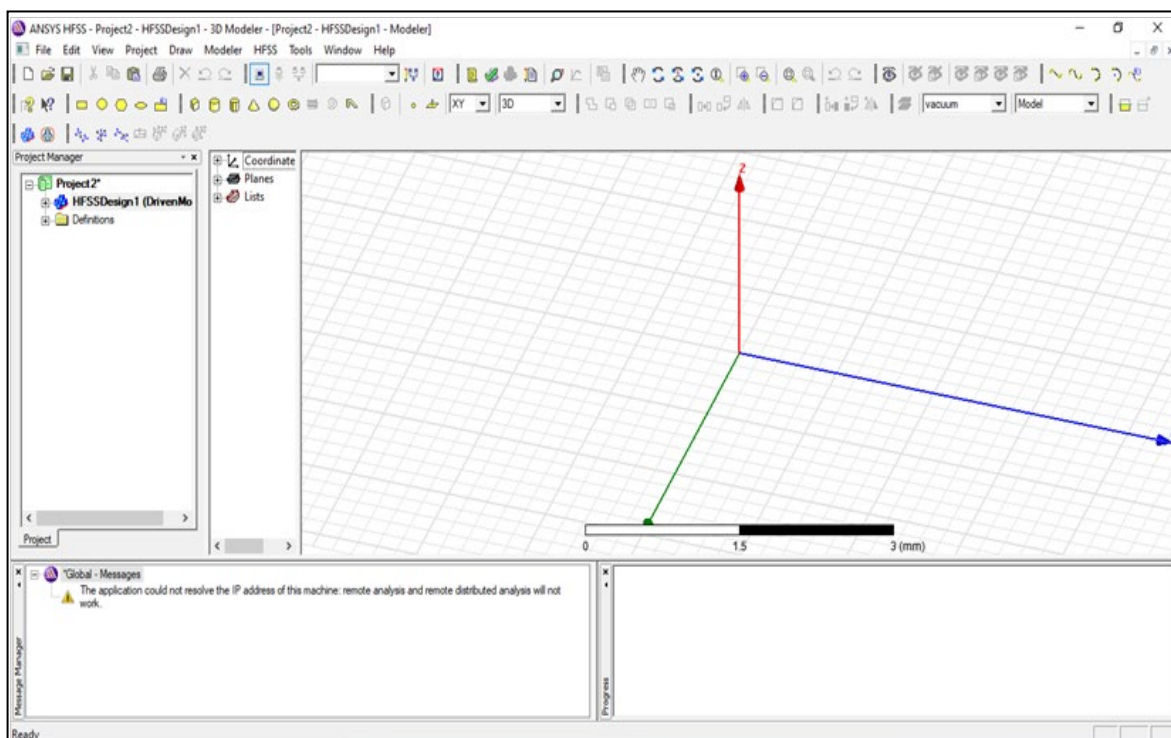
Il intègre des simulations, des visualisations et une interface automatisée facile à utiliser pour résoudre rapidement et de façon efficace les problèmes électromagnétiques en 3D

Peut être utilisé pour calculer des paramètres tels que le S11, les fréquences de résonance et représenter les champs. C'est un outil permettant le calcul du comportement électromagnétique d'une structure.

- Il permet le calcul des :
- Quantités de base :  $E, J, \lambda, \dots$
- Impédances caractéristiques des ports et les constantes de propagation des lignes
- Les paramètres S normalisés par rapport à une impédance de port spécifique.

### 3.3.1 Interface du HFSS

L'interface et l'arbre HFSS sont présentés respectivement sur les figures 01.



**Figure 3. 2:**L'interface HFSS.

### 3.3.2 Le processus de HFSS

Le processus HFSS se déroule comme suit figure02.

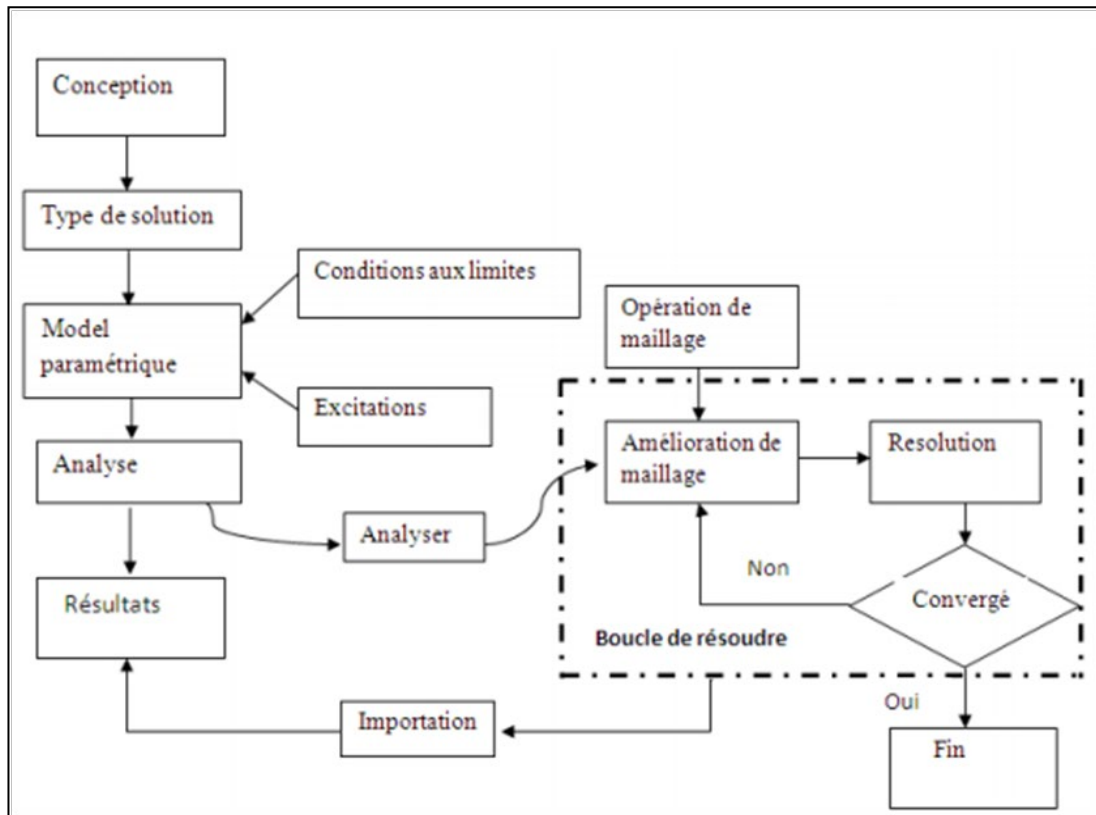


Figure 3. 3:Le processus HFSS.

Pour que le logiciel travail sans problèmes et donne des bonnes résultats, il faut que le choix des paramètres est effectué soigneusement. Parmi ces paramètres, le type de solution et les excitations jouent un rôle très important. En autre, plusieurs substrats sont disponibles au niveau de sa bibliothèque selon le besoin.

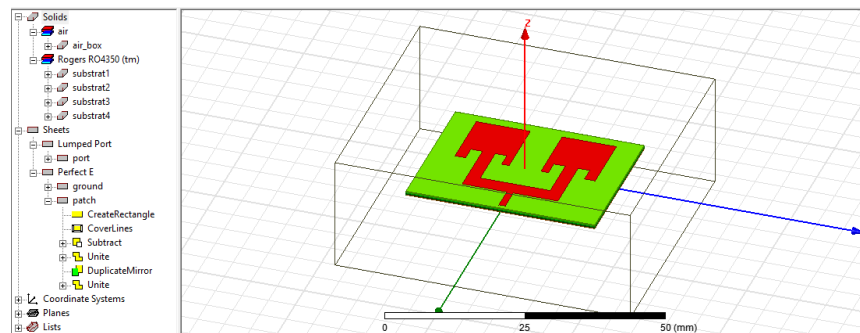
### 3.4 Logiciel de simulation HFSS :

H.F.S.S est un simulateur électromagnétique de haute performance pour les modèles en 3D. Il intègre des simulations, des visualisations et une interface automatisée facile à utiliser pour résoudre rapidement et de façon efficace les problèmes électromagnétiques en 3D. Son code de calcul est basé sur la méthode des éléments finis (méthode fréquentielle), des graphiques performants pour donner à l'utilisateur des résultats et une perspicacité aux problèmes électromagnétiques en 3D.

Une croissance H.F.S.S peut être utilisée pour calculer des paramètres tels que les paramètres S, les fréquences de résonance et les champs. C'est un outil permettant le calcul du comportement

électromagnétique d'une structure. Le simulateur possède des outils de post traitement pour une analyse plus détaillée. Il permet le calcul des :

- · Quantités de base : champ proche, champ lointain
- · Impédances caractéristiques des ports et leurs constantes de propagation
- · Les paramètres S normalisés par rapport à une impédance de port spécifique Afin de générer une solution du champ électromagnétique, H.F.S.S emploi la méthode des éléments finis. En général, cette méthode divise l'espace de résolution du problème en plusieurs milliers de régions plus petites et représente le champ dans chaque sous-région (élément) avec une fonction locale.

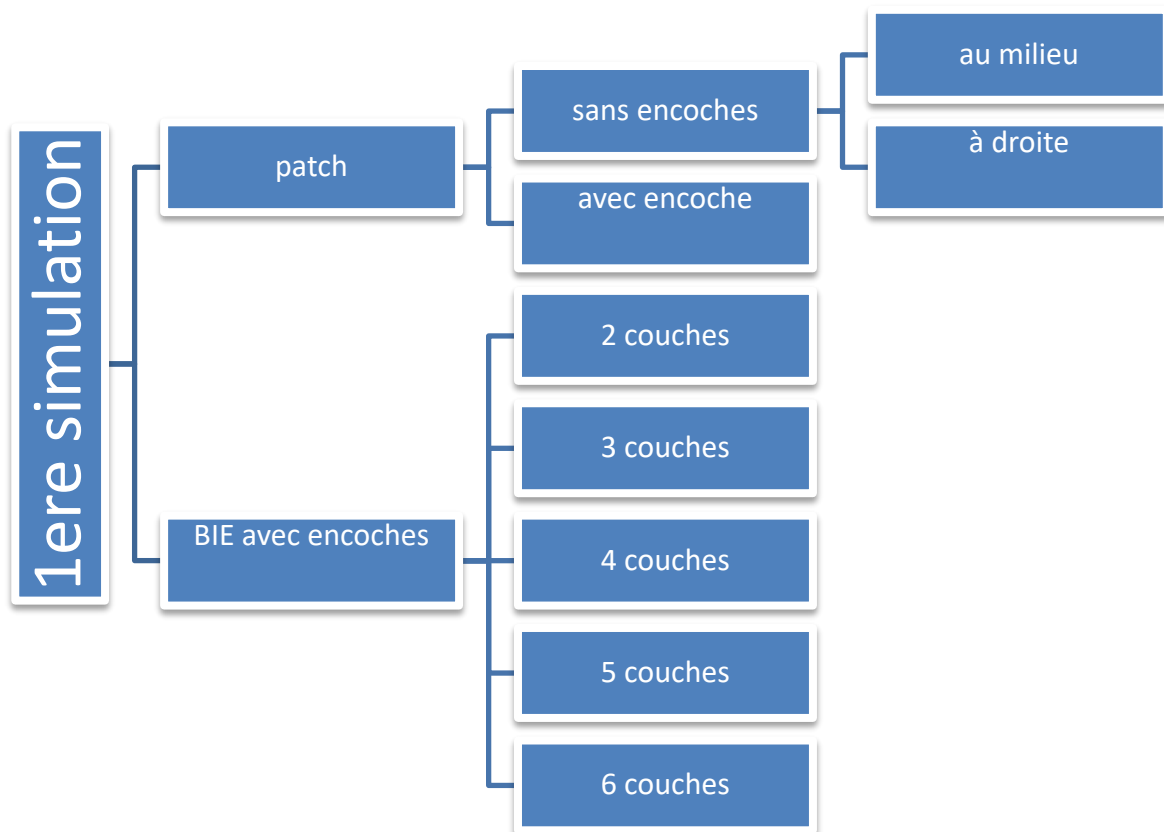


**Figure 3. 4:** simulation Dun réseau d'antenne patch BIE.

### 3.5 Simulation

#### 3.5.1 Les différentes étapes de simulation :

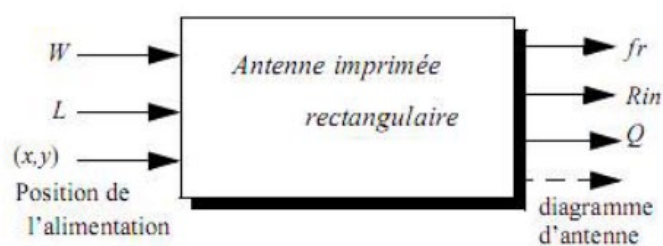
Pour notre travail nous allons réaliser un réseau d'antenne BIE bien adapté, nous étions obligé de passer par plusieurs étapes comme la montre la figure ci-dessous pour cela nous avons divisés le travail en deux grandes parties (simulation 1 et simulation2).



**Figure 3. 5:**les différentes étapes de simulation.

### 3.5.2 Présentation de la structure d'un seul élément

L'antenne peut être décrite sous la forme fonctionnelle suivante



**Figure 3. 6:**définitions fonctionnelles d'une antenne imprimée rectangulaire.

Les paramètres d'entrée correspondent aux dimensions géométriques de l'antenne imprimée ainsi qu'à la position de son alimentation.

On commence par comparer une antenne rectangulaire sans Encoche et avec encoche pour avoir une bonne adaptation.

L'antenne patch rectangulaire qui est définie par :

- Ses caractéristiques électromagnétiques : son gain, son diagramme de rayonnement, sa largeur de faisceau, sa polarisation.
- Ses paramètres d'utilisations : sa fréquence de résonance  $f_r$ , sa résistance d'entrée  $R_{in}$  et sa bande passante  $B$ .
- Ses paramètres internes : son facteur de qualité  $Q$ , sa résistance de rayonnement  $R_r$ , son rendement  $\eta$  et ses pertes métal et diélectrique mesurées par  $Q_c$ ,  $Q_d$ .

La première étape est le choix du substrat et du conducteur pour lesquels les caractéristiques à connaître sont :

- ✚ pour le substrat :  $\epsilon_r$  sa permittivité relative,  $\tan \delta$  sa tangente de perte et sa hauteur  $h$ ,
- ✚ pour le conducteur : sa conductivité  $\sigma$  et son épaisseur.

La conception consiste alors à déterminer :

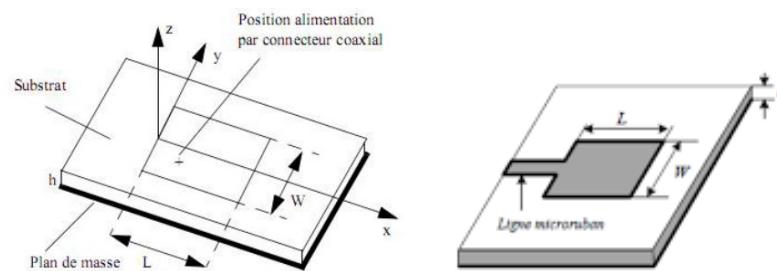
- ✚ la longueur et la largeur du patch ( $L$  et  $W$ ),
- ✚ la position et le type de l'alimentation (coaxiale, microstrip, fente).
- ✚ substrat
- ✚ L'alimentation.
- ✚ La polarisation est horizontale et la fréquence de résonance.

### 3.5.2.1 Simulation d'une antenne rectangulaire sans encoche :

On commence par comparer une antenne patch sans encoche et avec encoche. L'étape de la conception consistait à vérifier la résonance du patch et à localiser l'emplacement approprié de l'emplacement de la sonde. Pour obtenir une polarisation linéaire le long de l'axe des abscisses, le champ équivalent total sur l'axe des ordonnées l'axe des  $y$  doit être nul. Par conséquent, la position  $y$ -feed du centre du patch ( $y_f$ ) doit être égale à zéro, ( $y_f = 0$  mm).

L'antenne imprimée à bande interdite choisi est de forme rectangulaire alimentée par ligne micro-ruban. La géométrie de cette antenne est donnée à la Figure 3.7 L'antenne est constituée d'un patch rectangulaire, imprimé sur la face de dessus d'un substrat de type FR4 de permittivité relative  $\epsilon_{r1}=1$  « vacuum », d'épaisseur  $h_1=0.23$ mm

La figure ci-dessous nous montre la structure d'antenne rectangulaire sans encoches avec ces dimensions.



**Figure 3. 7:**structure d'antenne rectangulaire sans encoches.



Considérons une antenne microbande rectangulaire avec une seule couche qui a les caractéristiques suivantes :

### 3.5.2.1.1 Les dimensions :

Les Dimension de la structure d'antenne sans encoches sont résumées dans le tableau 3.1.

<b>Substrat</b>	Position : $-W_s/2, -L_s/2, 0$ X : $W_s$ Y : $L_s$ Z : $H_{sub}$	Type : box (RO4350)
<b>Grounds</b>	Position : $-W_s/2, -L_s/2, 0$ X : $W_s$ Y : $L_s$ Axis Z : /	Type : rectangulaire
<b>Patch</b>	Position : $-W_p/2, -L_p/2, H$ ( $H = \sum H_{sub}$ ) X : $W_p$ Y : $L_p$ Axis Z : /	Type : rectangulaire
<b>Feed line</b>	Position : $-W_f/2, L_p/2 - Y_o, H$ X : $W_f$ Y : $L_f$ Axis Z : /	Type : rectangulaire
<b>Port</b>	Position : $-W_f/2, L_p/2 - Y_o + L_f, 0$ X : $W_f$ Axis Y : /    Z : $H$	Type : rectangulaire
<b>Air box</b>	Position : $-W_s/2 - a_{irdis}, -L_s/2 - a_{irdis}, -H - a_{irdis}$ X : $abs(-W_s/2 - W_s/2) + 2 * a_{irdis}$ Y : $abs(-L_s/2 - L_s/2) + 2 * a_{irdis}$ Z : $abs(-H - H) + 2 * a_{irdis}$	Type : box (air)

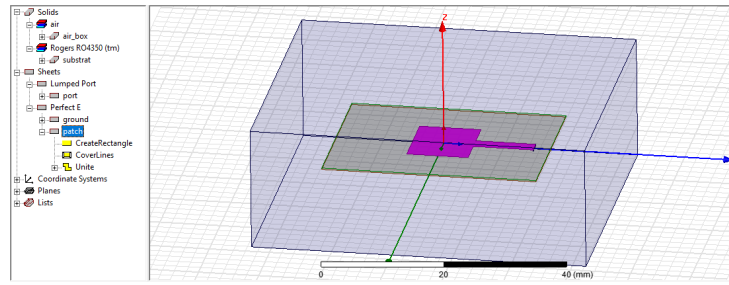
**Tableau 3. 1:**Dimensions de l'antenne micro-ruban rectangulaire à substrat normal.

Les paramètres géométriques de l'antenne sont regroupés dans le tableau paramétrique de l'antenne de base :

Dimension paramétrique	Valeur (mm)
Longueur patch ( $L_p$ )	10.2
Largeur patch ( $W_p$ )	12
Longueur ligne d'alimentation ( $L_f$ )	11.46
Largeur ligne d'alimentation ( $W_f$ )	2.408
Position d'alimentation ( $Y_o$ )	1.5
Largeur substrat ( $W_s$ )	27.93
Longueur substrat ( $L_s$ )	35.58
Hauteur de la couche	0.23
Airdis	9.9931

**Tableau 3. 2:**Dimension paramétrique.

La figure ci- dessous nous donne le schéma d'antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation au milieu sous HFSS.



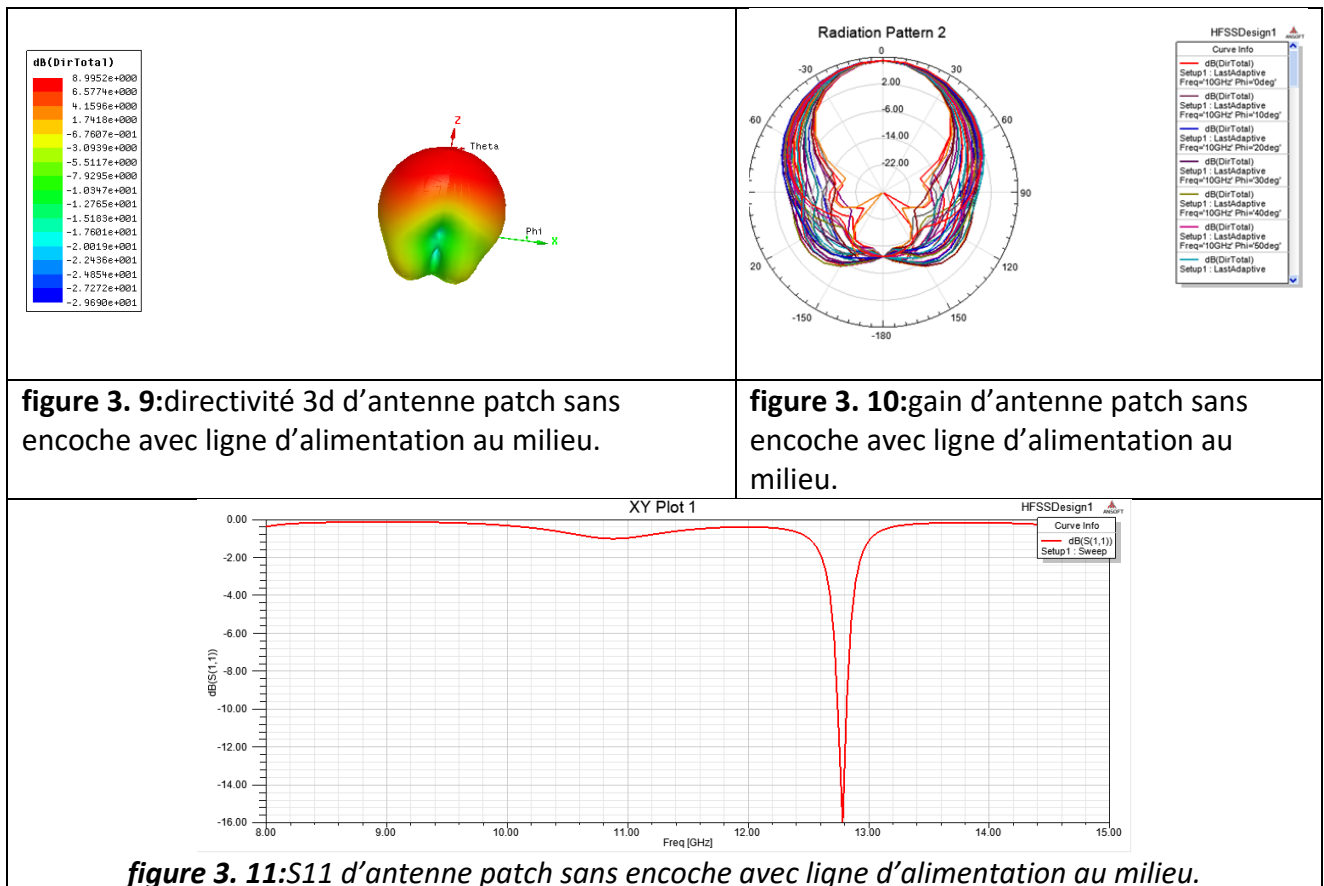
**Figure 3. 8:**antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation au milieu sous HFSS.

### 3.5.2.1.2 Résultats et Discussions de la simulation de l'antenne Patch sans encoche avec ligne d'alimentation au milieu

Les résultats obtenus,

### 3.5.2.1.3 Diagramme de rayonnement

La figure 3.9 montre le digramme de rayonnement dans le plan E ( $\Phi=90^\circ$ ), simulé à la fréquence de résonance -10db.



**figure 3. 9:**directivité 3d d'antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation au milieu.

**figure 3. 10:**gain d'antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation au milieu.

**figure 3. 11:**S11 d'antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation au milieu.

La figure 3.11. Montre le coefficient de réflexion ou le paramètre S11 en dB tracé en fonction de la fréquence et qui caractérise la quantité de puissance réfléchié par l'antenne.

En calculant la bande passante et le S11 et le gain à la fréquence 10 GHz on aura :

L'une des facilité donnée par le simulateur HFSS est le marquage de n'importe quel point d'un graphe et de données ses cordonnées. Cette facilité peut être utilisée pour la détermination de la bande passante à partir du graphe du paramètre S11.

$$\Delta f = \frac{|f_1 - f_2|}{f_0} \times 100$$

B= 12.81-12.74= 0.07 GHz

S11 = -16 dB

D=8.9952dB

D'après le résultat l'antenne n'est pas adaptée puisque le S11 est supérieur à 10 dB.

### 3.5.2.2 Simulation d'antenne rectangulaire sans encoches décalé à droite :

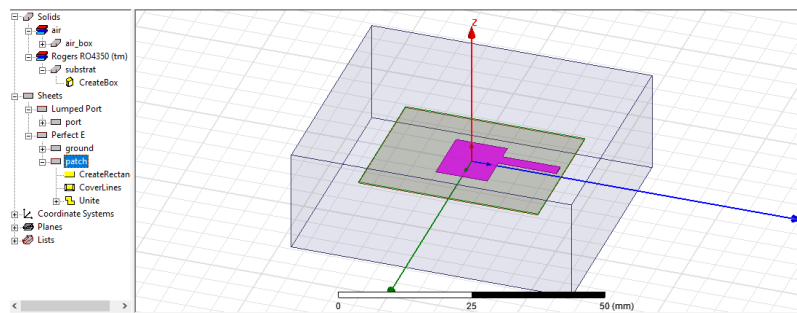
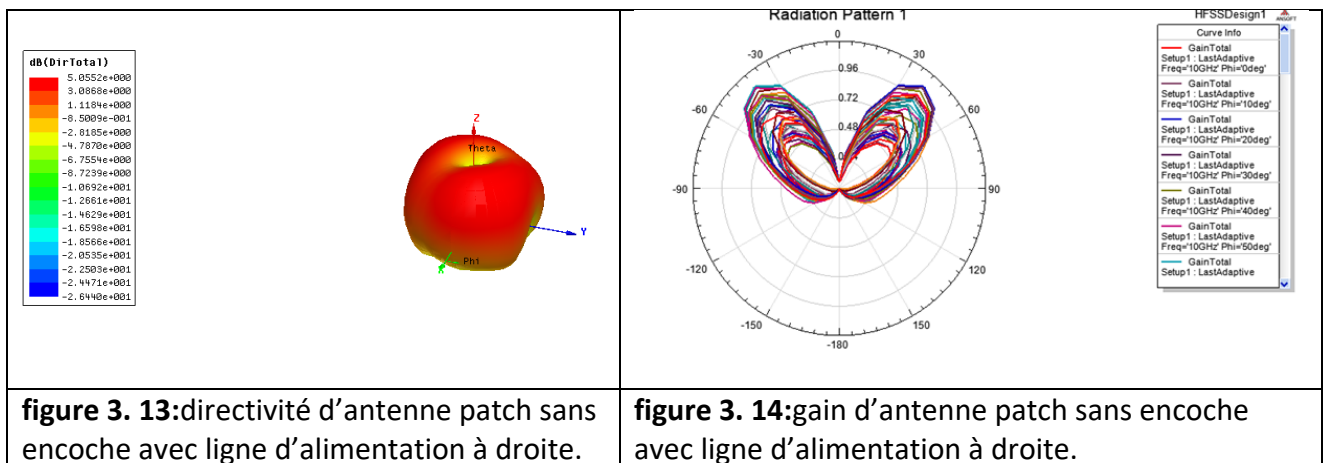
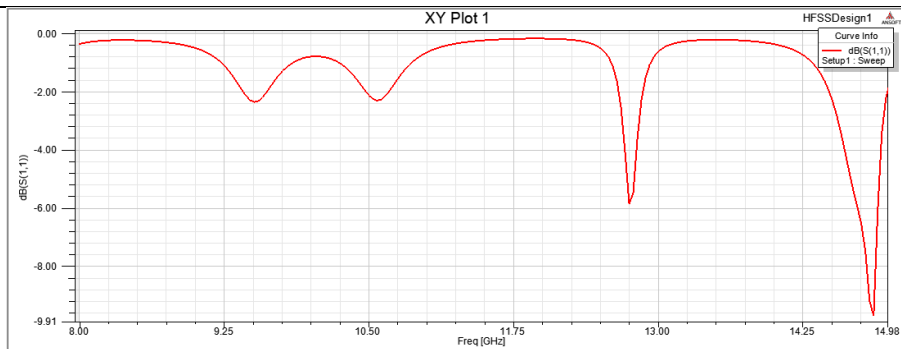


Figure 3. 12:antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation à droite.

En utilisant la même dimension en décalant juste la ligne d'alimentation à droite on aura :



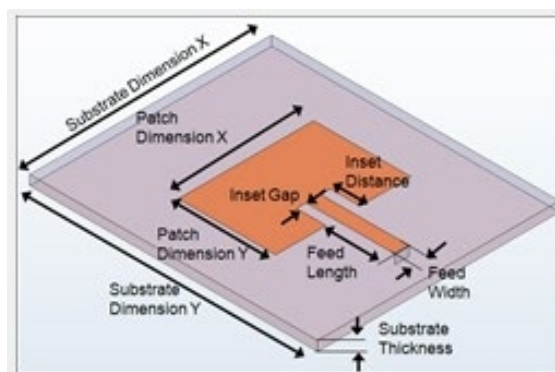


**figure 3. 15:**S11 d'antenne patch sans encoche avec ligne d'alimentation à droite.

L'antenne n'est pas adaptée.

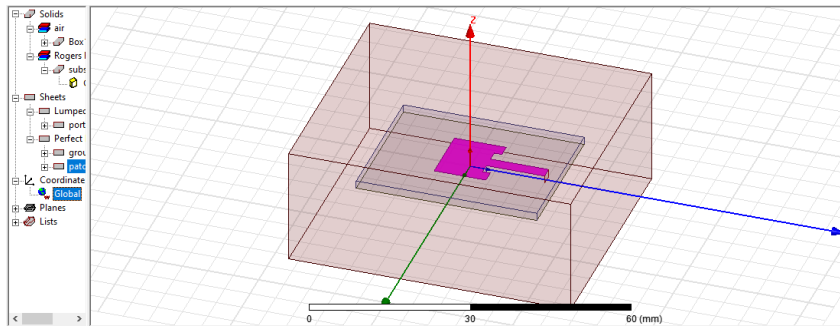
### 3.5.2.3 Simulation d'antenne rectangulaire avec encoche au milieu :

Présentation de la structure d'un seul élément La structure de base que nous avons adoptée pour notre antenne est une structure composé d'un plan de masse, d'un substrat BIE de type 1D qui est constitué de quatre couches: deux couches diélectriques d'une permittivité de  $\epsilon r1=1$  « vacuum », d'épaisseur  $h1=0.23\text{mm}$  et deux autre couches diélectriques d'une permittivité de  $\epsilon r2=4$  « Epoxy raisin », d'épaisseur  $h2=0.165\text{mm}$ , la longueur et la largeur d'élément rayonnant sont  $Lp=10.2\text{mm}$ ,  $Wp=12\text{mm}$  et les dimensions du substrat  $Ls=50\text{mm}$ ,  $Ws=60\text{mm}$ . Cette antenne est alimentée par une ligne microbande

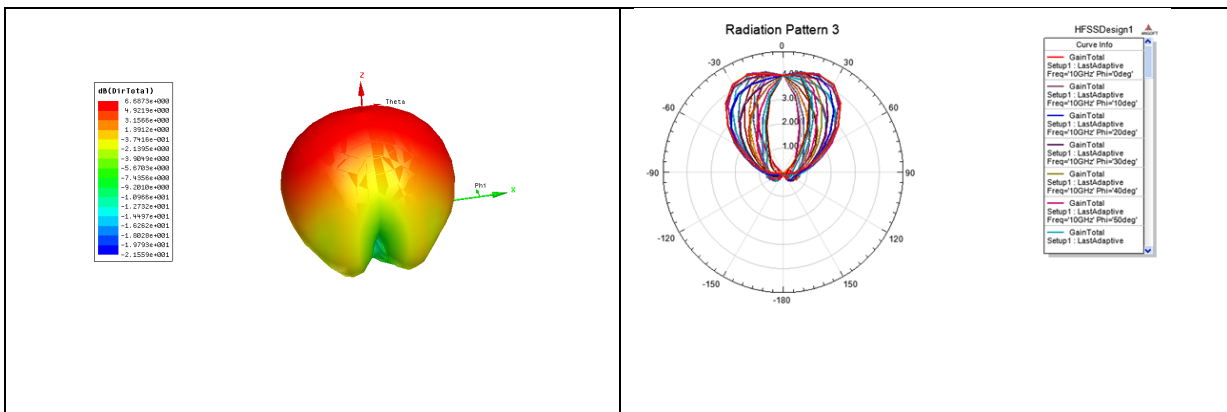


**Figure 3. 16:**structure d'antenne patch avec encoches.

<b>Encoches</b>	Position : $-Wf/2-Sg$ , $Lp/2-Yo$ , H X : $Wf+2*Sg$ Y : $Lf$ Axis Z : /	Type :
Largeur de l'encoche (Sg)	2.196	rectangulaire

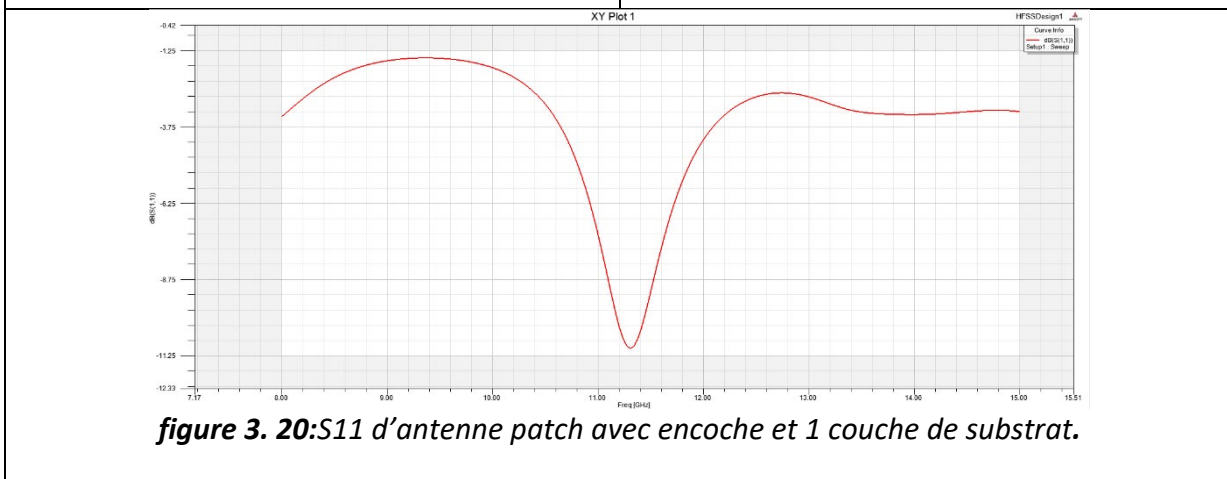


**Figure 3. 17:**antenne patch avec encoche et 1 couche de substrat.



**figure 3. 18:**directivité d'antenne patch avec encoche et 1 couche de substrat.

**figure 3. 19:**gain d'antenne patch avec encoche et 1 couche de substrat.



**figure 3. 20:**S11 d'antenne patch avec encoche et 1 couche de substrat.

En calculant la bande passante et le S11 et le gain à la fréquence 10 GHZ on aura :

$$B= 11.41-11.20=0.21 \text{ GHZ}$$

$$S11 = -11.82 \text{ dB}$$

D=6.6873 dB

	Directivité (dB)	Le coefficient de réflexion S11 (dB)	La fréquence de résonance (GHZ)	La bande passante (GHZ)
Antenne patch sans encoche avec alimentation décalé à droite				
Antenne patch sans encoche alimentation au milieu	8.9952	-16	0.7	0.07
Antenne patch avec encoche	6.6873	-11.82	2.1	0.21

**Tableau 3. 3:** les resultats pour les differentes structures d'antennes .

A partir des figures precedente du coefficients de reflexion S11 et de la diréctivité et de gain , et les résultats indiqués dans le tableau III-4 des fréquences de résonnances et les bande passantes structures, et on remarque que :

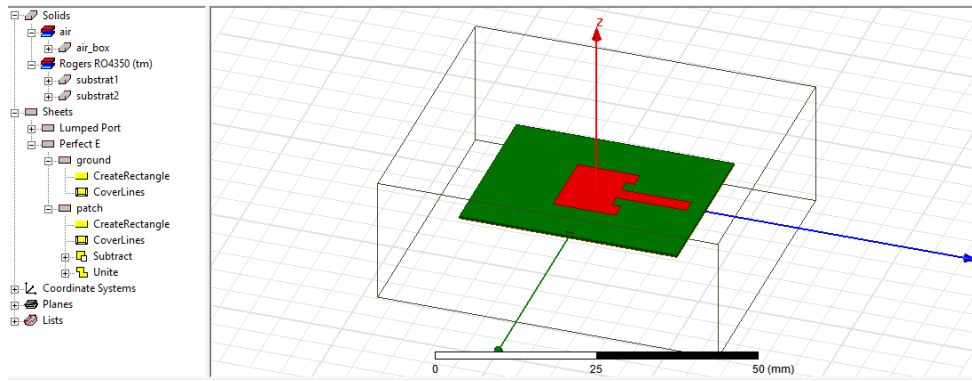
- Antenne patch sans encoche avec alimentation décalé à droite n'est pas adaptée ;
- La fréquence de résonance pour une antenne patch sans encoche alimentation au milieu a diminué par rapport au d'autre simulation ;
- La bande passante pour une Antenne patch avec encoche est plus large par rapport à un seul élément ;
- La directivité pour une Antenne patch sans encoche alimentation au milieu est plus large aux dautre antennes .

### **3.5.2.4 Antenne patch BIE avec encoches :**

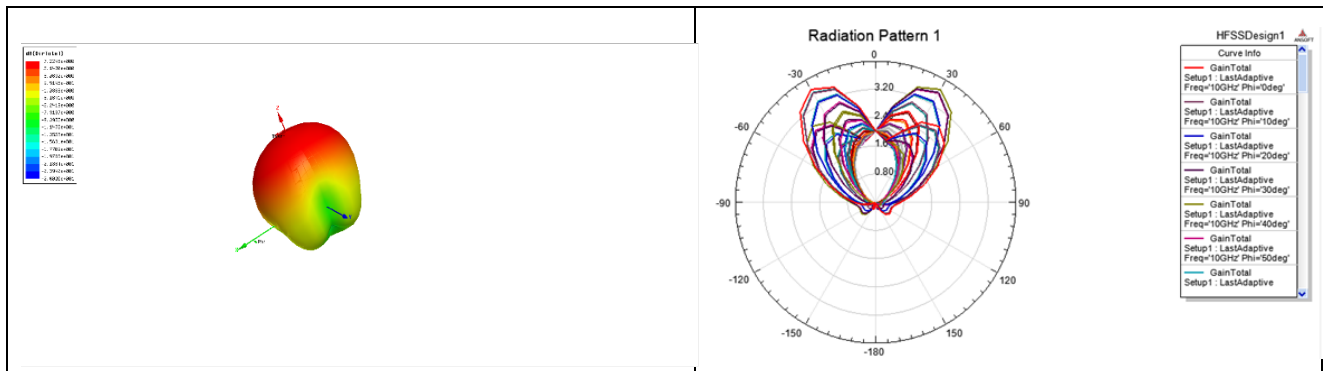
#### **3.5.2.4.1 Avec 2 couches :**

En gardant les mêmes dimensions et on ajoute 1 couche de substrat avec :

Hauteur de couches 1	0.23 mm
Hauteur de couches 2	0.165 mm

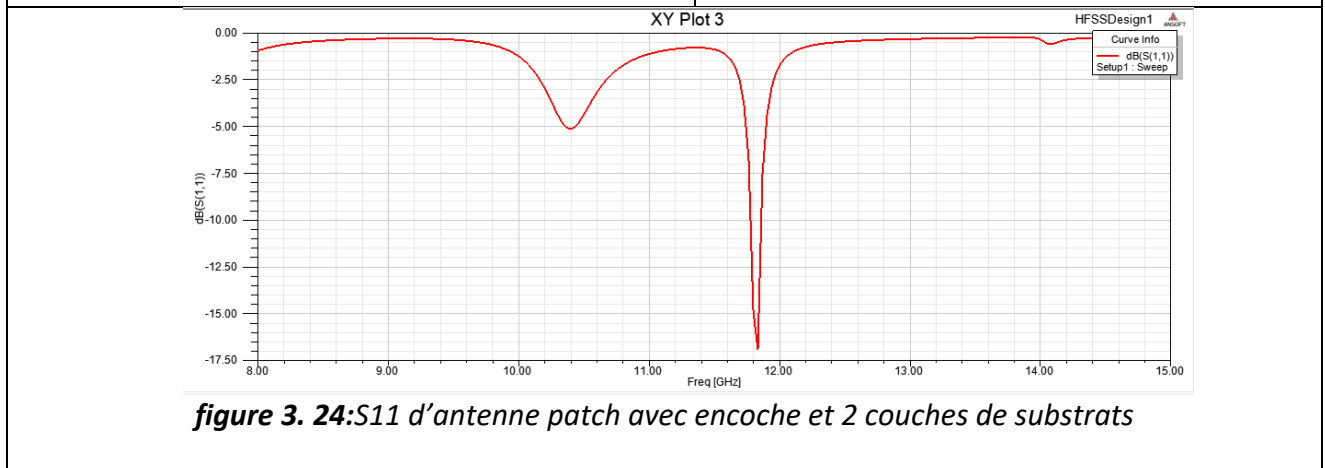


**Figure 3. 21:**antenne patch avec encoche et 2 couches de substrats.



**figure 3. 22:**directivité d'antenne patch avec encoche et 2 couches de substrats.

**figure 3. 23:**gain d'antenne patch avec encoche et 2 couches de substrats.



**figure 3. 24:**S11 d'antenne patch avec encoche et 2 couches de substrats

En calculant la bande passante et le S11 et le gain à la fréquence 10 GHz on aura :

$$B = 11.68 - 11.77 = 0.09 \text{ GHz}$$

$$S_{11} = -17 \text{ dB}$$

$$D = 7.2248 \text{ dB}$$

### 3.5.2.4.2 Avec 3 couches :

Hauteur de couches 1 et 3	0.23 mm
Hauteur de couches 2	0.165 mm

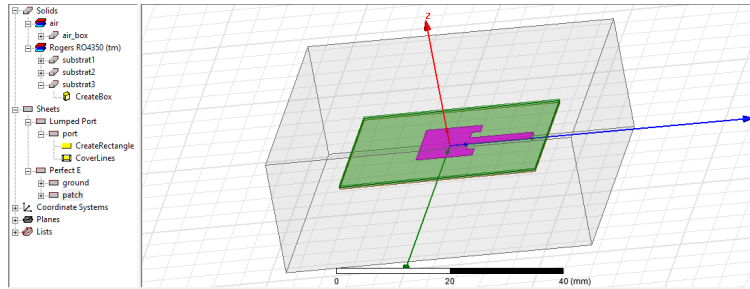


Figure 3. 25:antenne patch avec encoche et 3 couches de substrats.

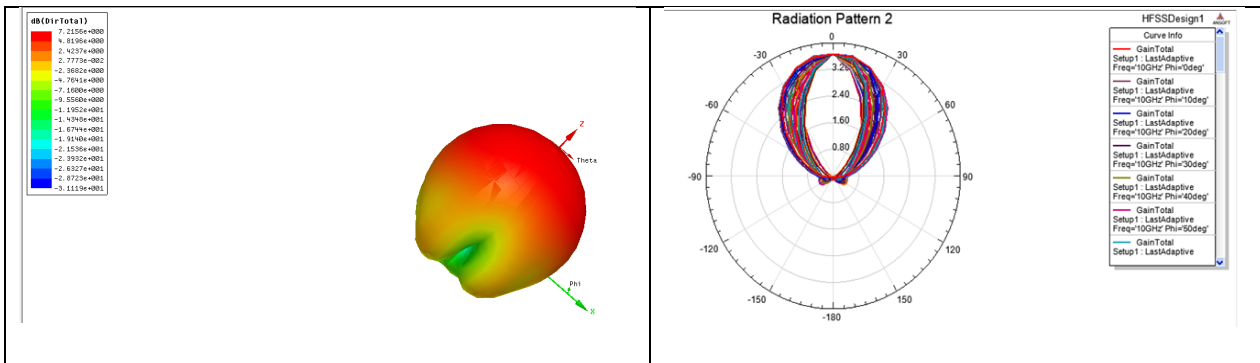


figure 3. 26:directivité d'antenne patch avec encoche et 3 couches de substrats.

figure 3. 27:gain d'antenne patch avec encoche et 3 couches de substrats.

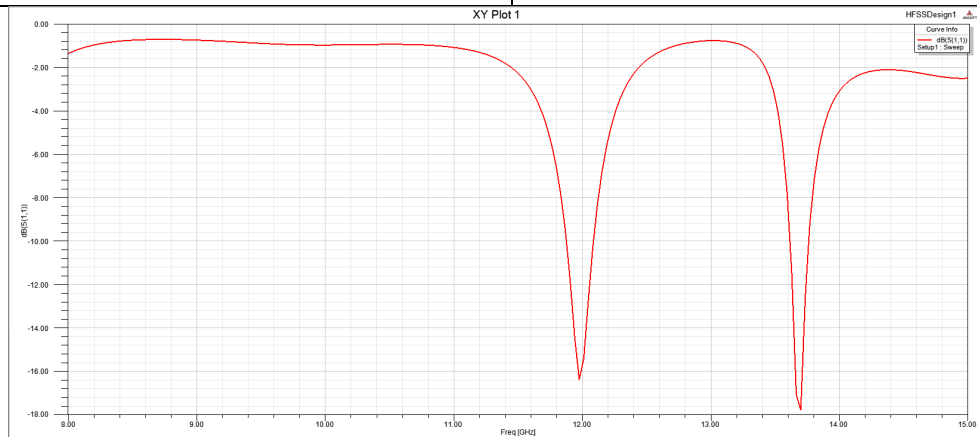


figure 3. 28:s11 d'antenne patch avec encoche et 3 couches de substrats.

En calculant la bande passante et le S11 et le gain à la fréquence 10 GHz on aura :

$$B1=12.08-11.87=0.21 \text{ GHz,}$$



S11 = -16.10 dB

B2=13.76-13.61 = 0.156 GHz

S11 = -17.8 dB

D=7.2156 dB

### 3.5.2.4.3 Avec 4 couches :

En utilisant les mêmes dimensions citées précédemment et un espacement de  $\lambda/2$  entre les deux patches, un réseau d'antenne à deux patches rectangulaires est conçu. Nous optant pour deux méthodes d'alimentation, la première est une alimentation série utilisant un transformateur quart Chapitre III Résultats & discussions 50 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  $\Omega$ . Figure.III.16 montre la géométrie des antennes proposées.

Hauteur de couches 1 et 3	0.23 mm
Hauteur de couches 2 et 4	0.165 mm

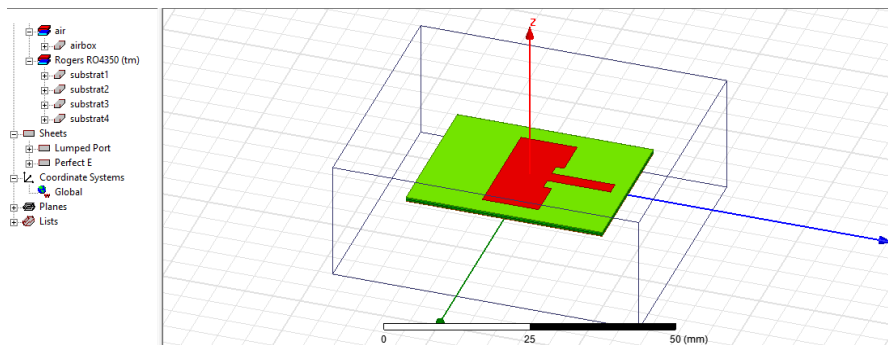
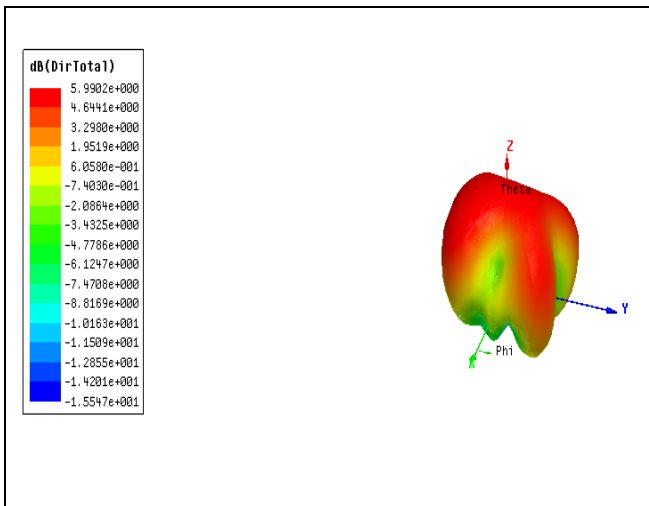
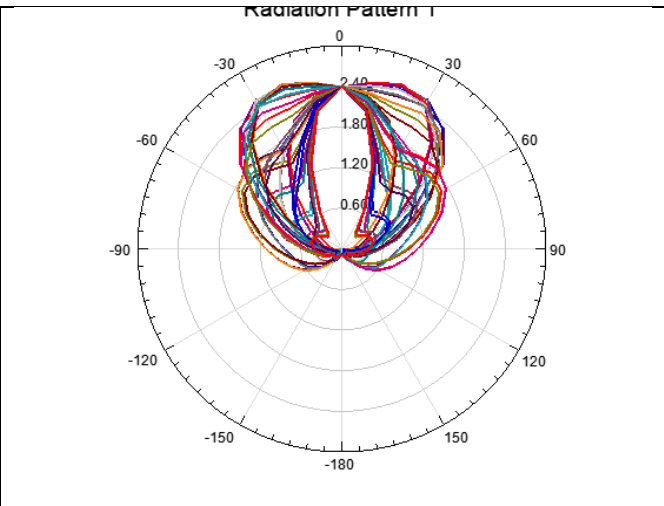


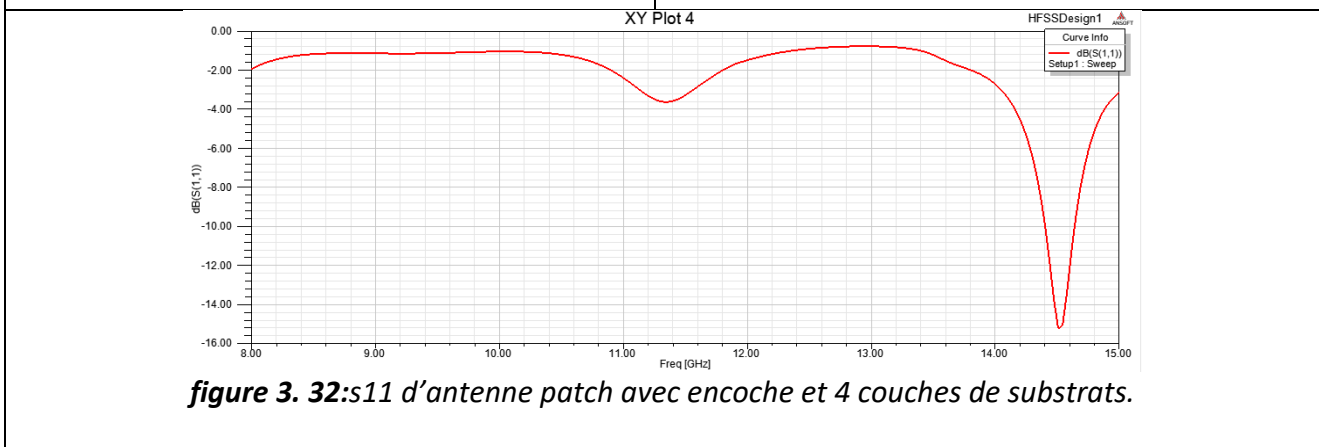
Figure 3. 29:antenne patch avec encoche et 4 couches de substrats.



**figure 3. 30:**directivité d'antenne patch avec encoche et 4 couches de substrats.



**figure 3. 31:**gain d'antenne patch avec encoche et 4 couches de substrats.



**figure 3. 32:**s11 d'antenne patch avec encoche et 4 couches de substrats.

En calculant la bande passante et le S11 et le gain à la fréquence 10 GHz on aura :

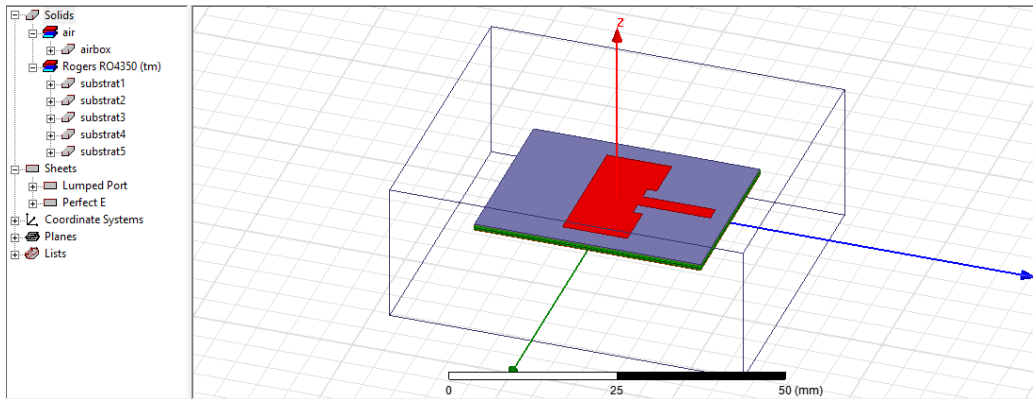
$$B=14.63-14.52=0.11 \text{ GHz}$$

$$S_{11} = -15.08 \text{ dB}$$

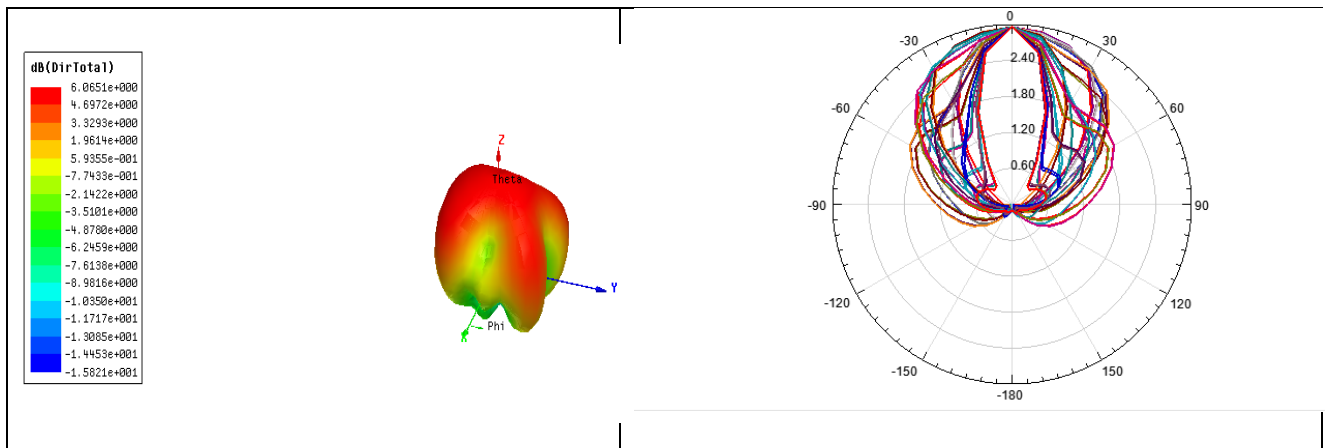
$$D=5.9902 \text{ dB}$$

#### 3.5.2.4.4 Avec 5 couches :

Hauteur de couches 1 et 3 et 5	0.23 mm
Hauteur de couches 2 et 4	0.165 mm

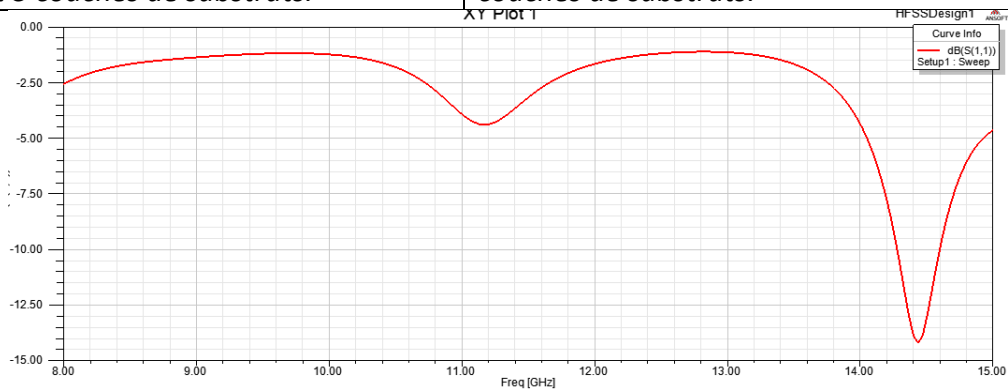


**Figure 3. 33:**antenne patch avec encoche et 5 couches de substrats.



**figure 3. 34:**directivité d'antenne patch avec encoche et 5 couches de substrats.

**figure 3. 35:**gain d'antenne patch avec encoche et 5 couches de substrats.



**figure 3. 36:**S11 d'antenne patch avec encoche et 5 couches de substrats.

En calculant la bande passante et le S11 et le gain à la fréquence 10 GHz on aura :

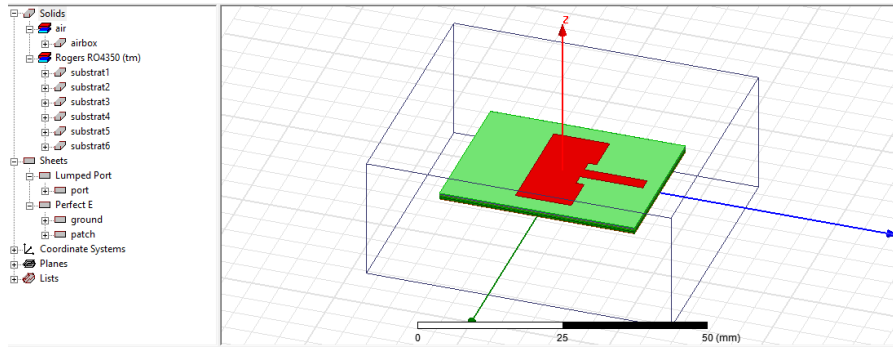
$$B=14.59-14.27=0.32 \text{ GHz}$$

$$S_{11} = -13 \text{ dB}$$

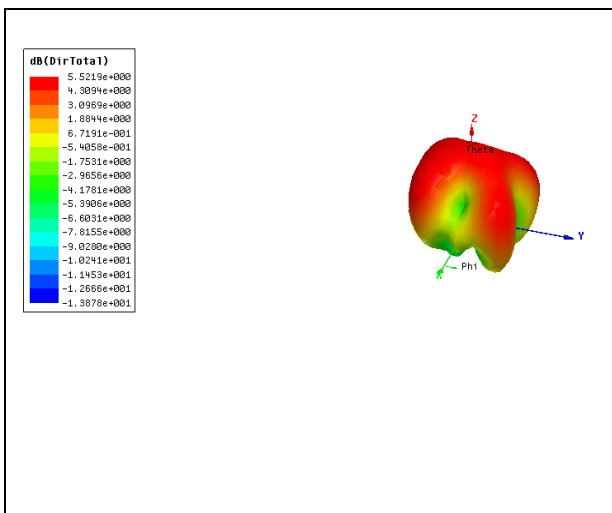
$$D=6.0651\text{db}$$

**3.5.2.4.5 Avec 6 couches :**

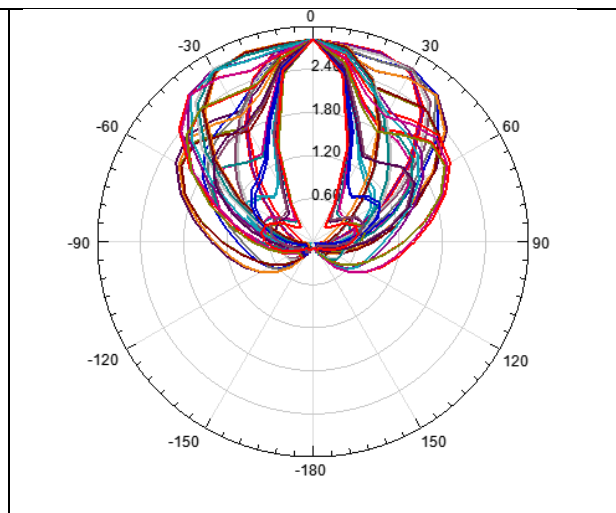
I) Hauteur de couches 1 et 3 et 5	0.23 mm
Hauteur de couches 2 et 4 et 6	0.165



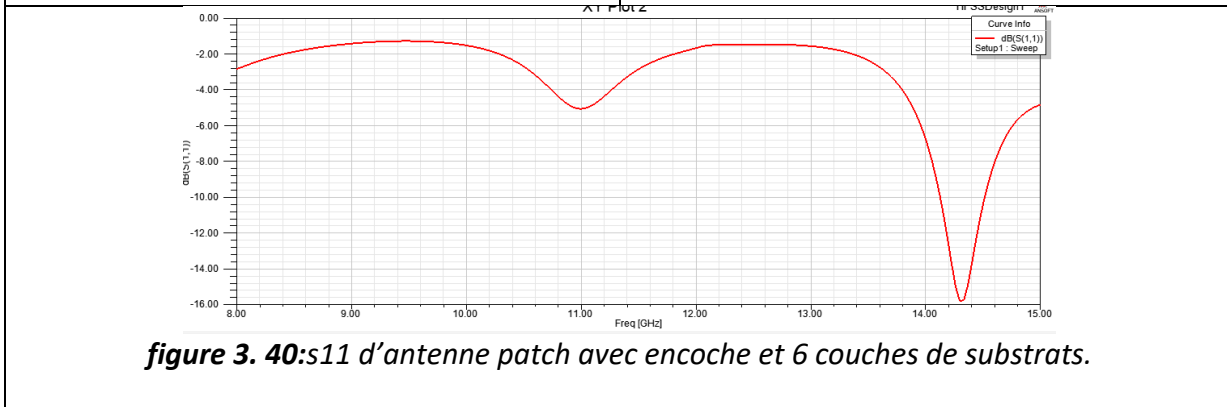
**Figure 3. 37:**antenne patch avec encoche et 6 couches de substrats.



**figure 3. 38:**directivité d'antenne patch avec encoche et 6 couches de substrats.



**figure 3. 39:**gain d'antenne patch avec encoche et 6 couches de substrats.



**figure 3. 40:**s11 d'antenne patch avec encoche et 6 couches de substrats.

En calculant la bande passante et le S11 et le gain à la fréquence 10 GHZ on aura :

$$B=14.51-14.12=0.39 \text{ GHZ}$$

$$S_{11} = -16 \text{ dB}$$

$$D=5.5219\text{db}$$

Interprétation des

	Directivité (dB)	Le coefficient de réflexion S11 (dB)	La fréquence de résonance	La bande passante (GHZ)
antenne patch avec encoche et 2 couches de substrats.	7.2248	-17	0.9	0.09
antenne patch avec encoche et 3 couches de substrats.	7.2156	-16.10,-17.8	2.1, 1.56	0.21, 0.156
antenne patch avec encoche et 4 couches de substrats.	5.9902	-15.08	1.1	0.11
antenne patch avec encoche et 5 couches de substrats.	6.0651	-13	3.16	0.316
antenne patch avec encoche et 6 couches de substrats.	5.5219	-16	3.9	0.39

**Tableau 3. 4:** les résultats pour les différentes structures d'antenne.

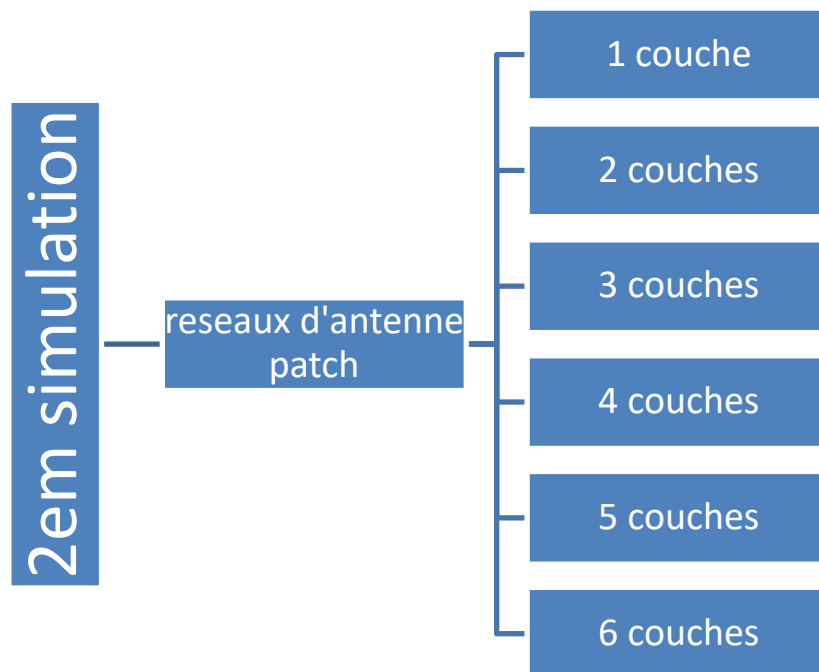
A partir des figures précédente du coefficients de reflexion  $S_{11}$  et de la diréctivité et de gain , et les résultats indiqués dans le tableau III-4 des fréquences de résonnances et les bande passantes structures, et on remarque que :

- La fréquence de résonance pour une antenne patch avec encoche et 2 couches de substrats a diminué par rapport au d'autre simulation ;
- La bande passante pour une antenne patch avec encoche et 6 couches de substrats est plus large par rapport à un seul élément ;
- La directivité pour une antenne patch avec encoche et 2 couches de substrats est plus large aux dautre antennes .

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.

### 3.5.3 Antenne patch BIE avec encoche

#### 3.5.3.1 Simulation d'un réseau d'antenne patch BIE :



**Figure 3. 41:** les différentes étapes de simulation Dun réseau d'antenne patch BIE.

Pour pouvoir réalisé cette simulation on doit garder les mêmes valeurs de l'antenne BIE simulé précédemment.

En utilisant les mêmes dimensions citées précédemment et un espacement de  $\lambda/2$  entre les deux patches, un réseau d'antenne à deux patches rectangulaires est conçu.

Dimension paramétrique	Valeur (mm)
Longueur patch (Lp)	10.2
Largeur patch (Wp)	12
Longueur ligne d'alimentation (Lf)	11.46
Largeur ligne d'alimentation (Wf)	2.408
Position d'alimentation (Yo)	1.5
Largeur de l'encoche (Sg)	2.196
Largeur substrat (Ws)	27.93
Longueur substrat (Ls)	35.58
Hauteur de couches 1 et 3 et 5	0.23
Hauteur de couches 2 et 4 et 6	0.165
Airdis	9.9931

### 3.5.3.2 Réseau d'antenne patch avec 1 couche :

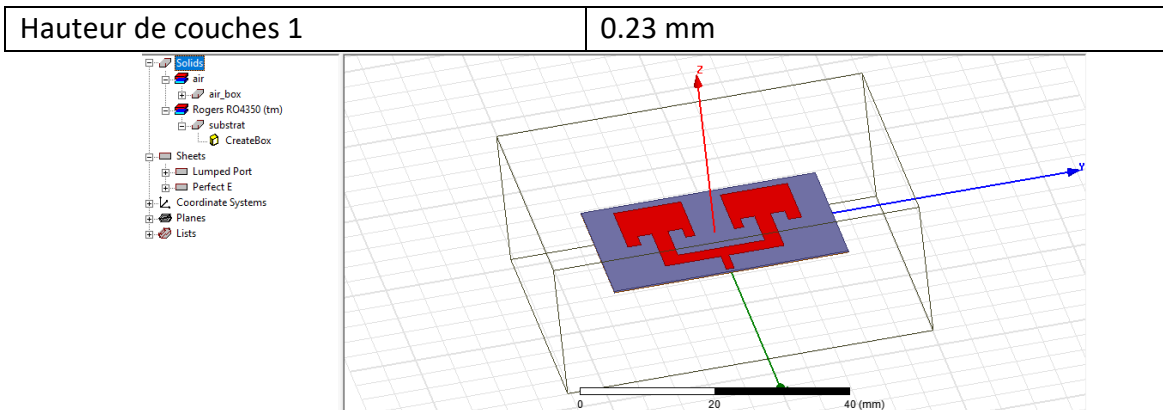
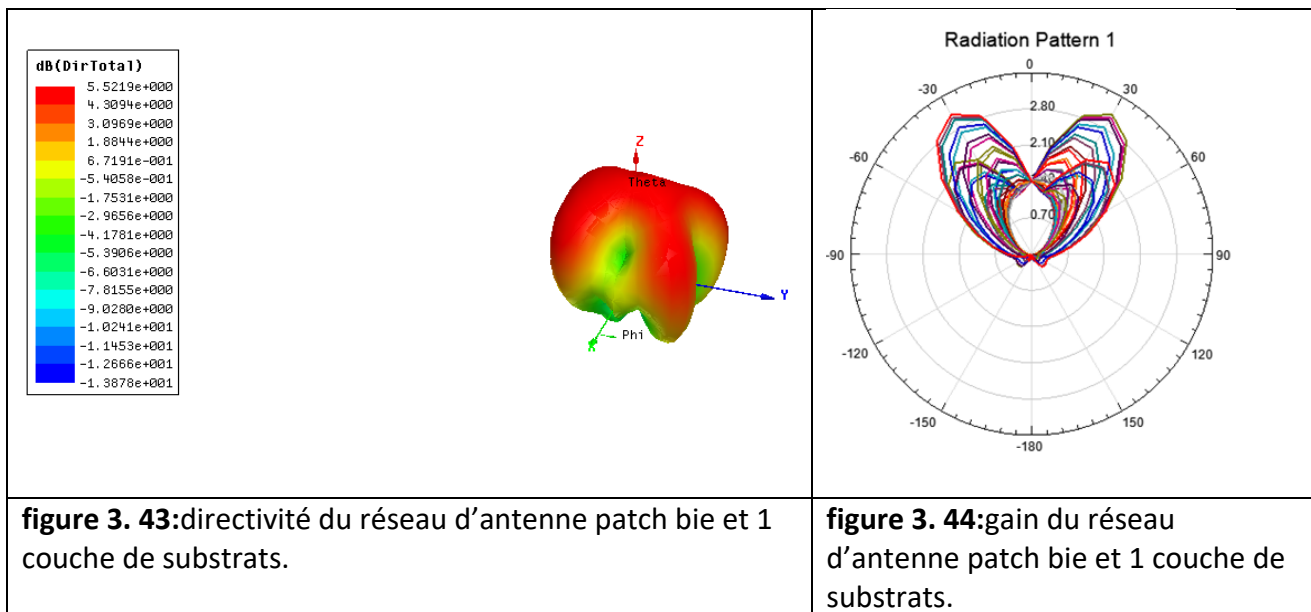
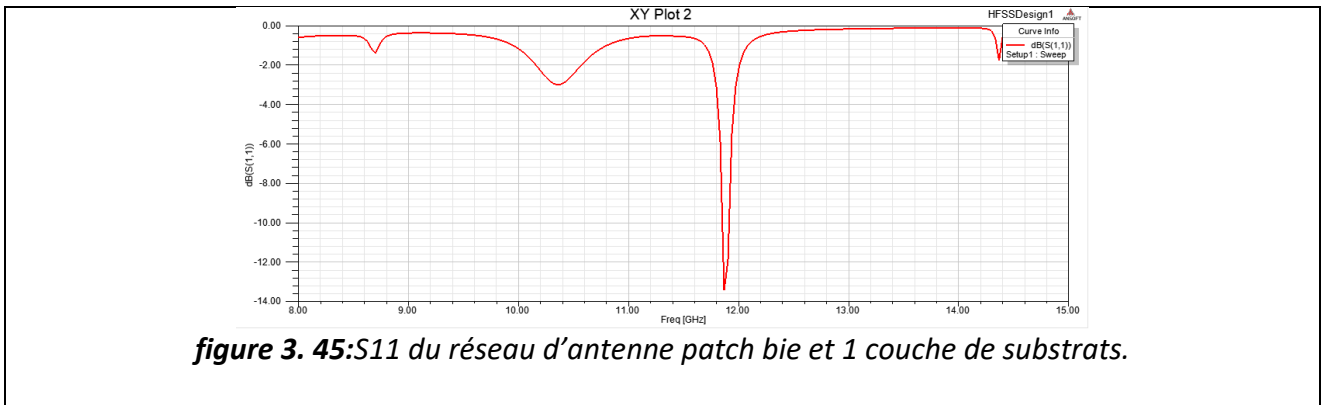


Figure 3. 42:réseaux d'antenne patch bie et 1 couche de substrats.





En calculant la bande passante et le S11 et le gain à la fréquence 10 GHz on aura :

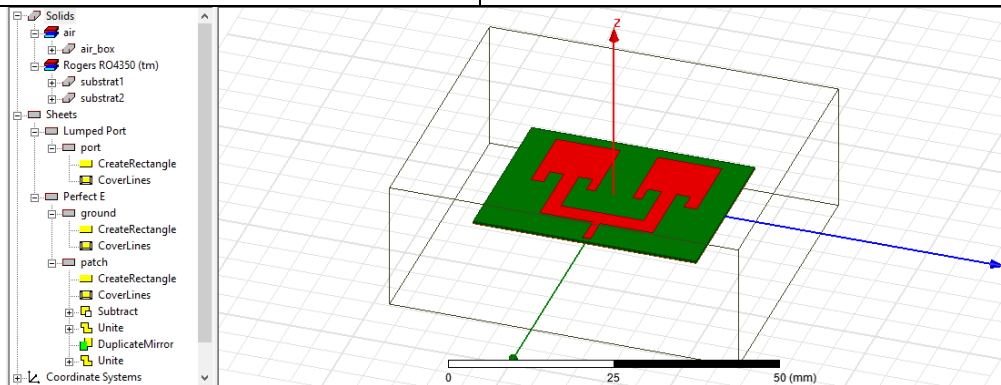
$$B=11.91-11.85=0.06 \text{ GHz}$$

$$S11 = -1.18 \text{ dB}$$

$$D=8.1358$$

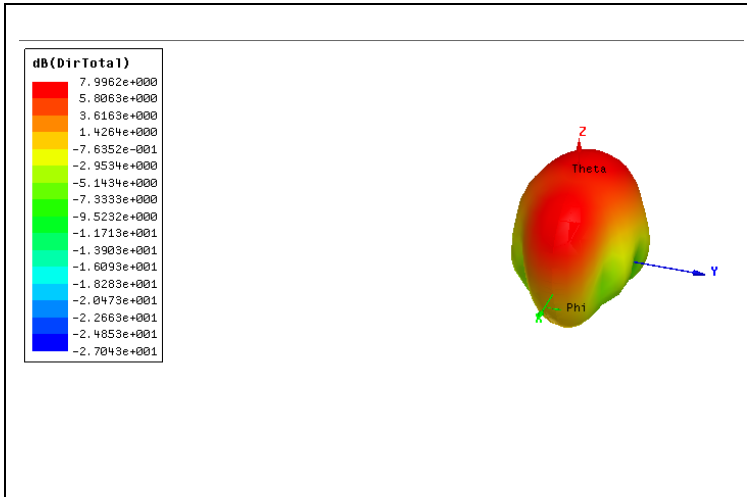
### 3.5.3.3 Réseau d'antenne patch avec 2 couches :

Hauteur de couches 1	0.23 mm
Hauteur de couches 2	0.165 mm

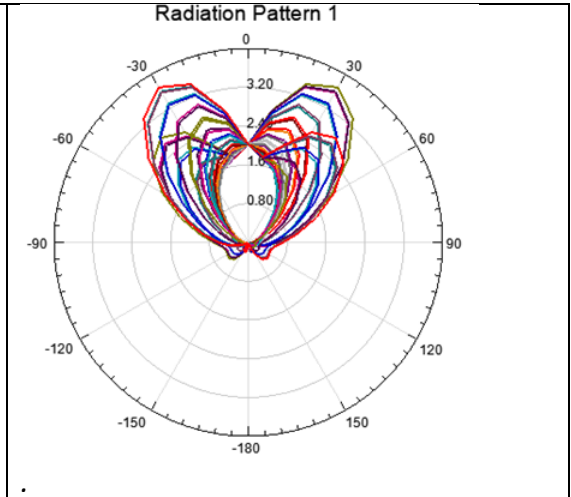


**Figure 3. 46:** réseaux d'antenne patch bie et 2 couches de substrats.

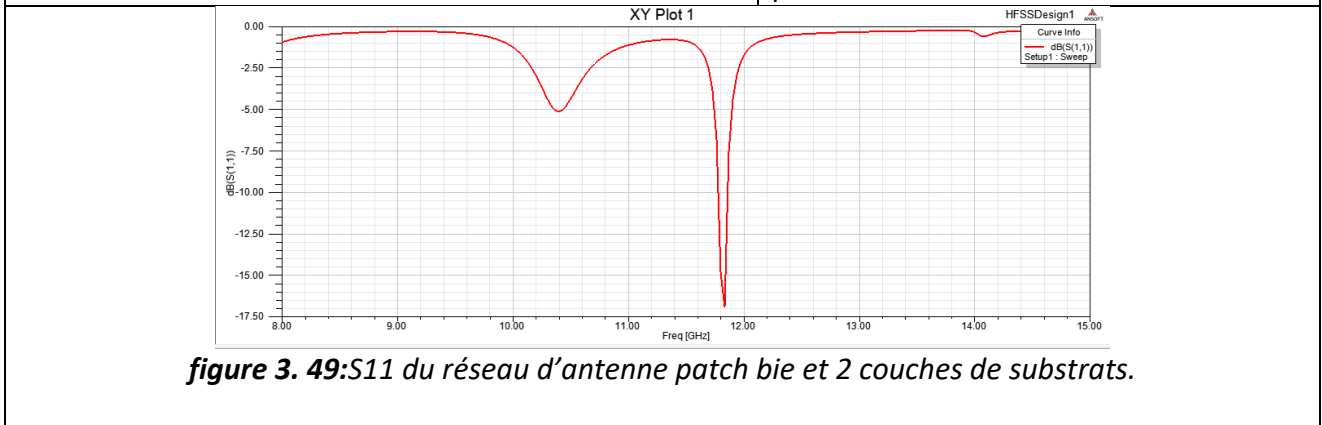




**figure 3. 47:**directivité du réseau d’antenne patch bie et 2 couches de substrats.



**figure 3. 48:**gain du réseau d’antenne patch bie et 2 couches de substrats



**figure 3. 49:**S11 du réseau d’antenne patch bie et 2 couches de substrats.

En calculant la bande passante et le S11 et le gain à la fréquence 10 GHZ on aura :

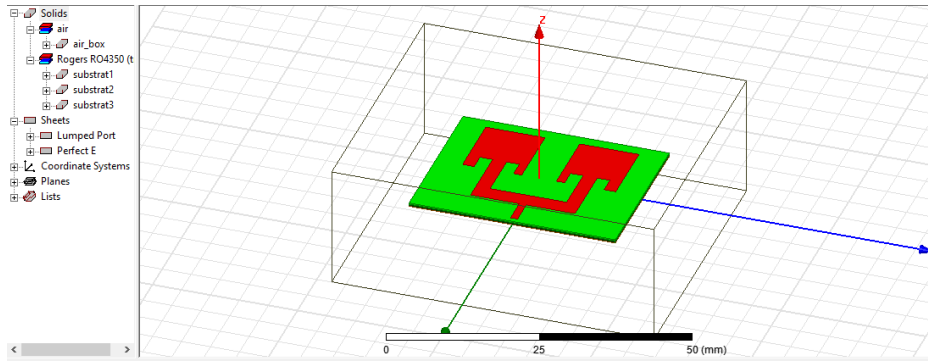
$$B=11.86-11.77=0.09 \text{ GHZ}$$

$$S11 = -1.27 \text{ dB}$$

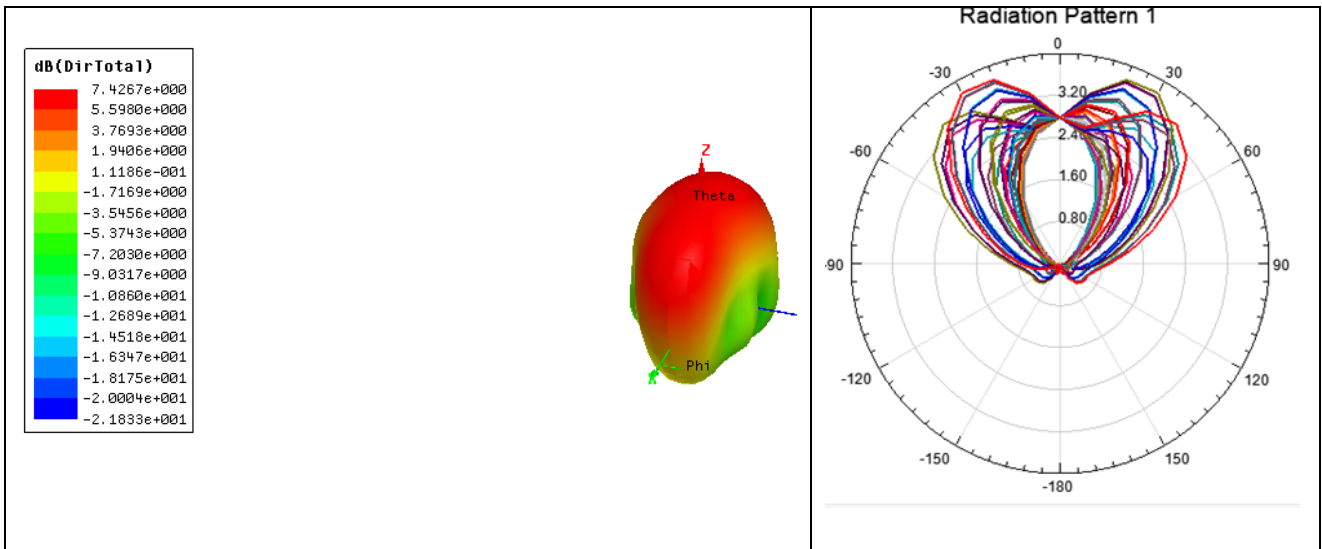
$$D=7.9962 \text{ dB}$$

### 3.5.3.4 Réseau d’antenne patch avec 3 couches :

Hauteur de couches 1 et 3	0.23 mm
Hauteur de couches 2	0.165 mm

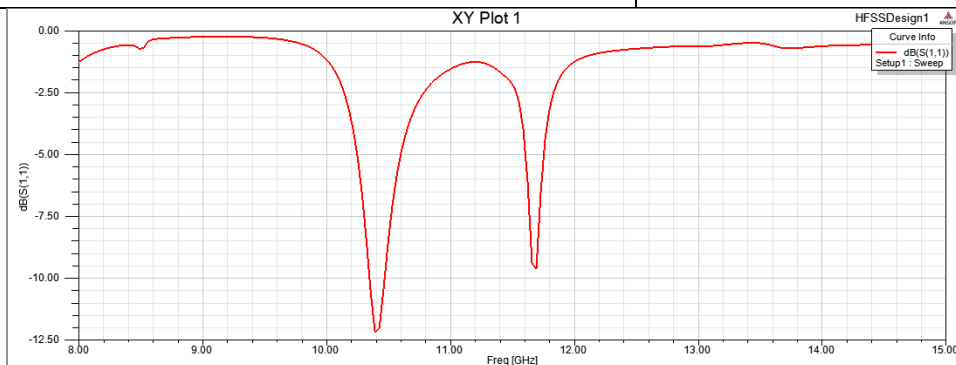


**Figure 3. 50:**réseaux d'antenne patch bie et 3 couches de substrats.



**figure 3. 51:**directivité réseaux d'antenne patch bie et 3 couches de substrats.

**figure 3. 52:**gain du réseau d'antenne patch bie et 3 couches de substrats.



**figure 3. 53:**S11 réseaux d'antenne patch bie et 3 couches de substrats.

En calculant la bande passante et le S11 et le gain à la fréquence 10 GHz on aura :

$$B=10.46-10.34=0.12 \text{ GHz}$$

S11 = -1.18 dB

D=7.4267 dB

### 3.5.3.5 Réseau d'antenne patch avec 4 couches :

Hauteur de couches 1 et 3	0.23 mm
Hauteur de couches 2 et 4	0.165 mm

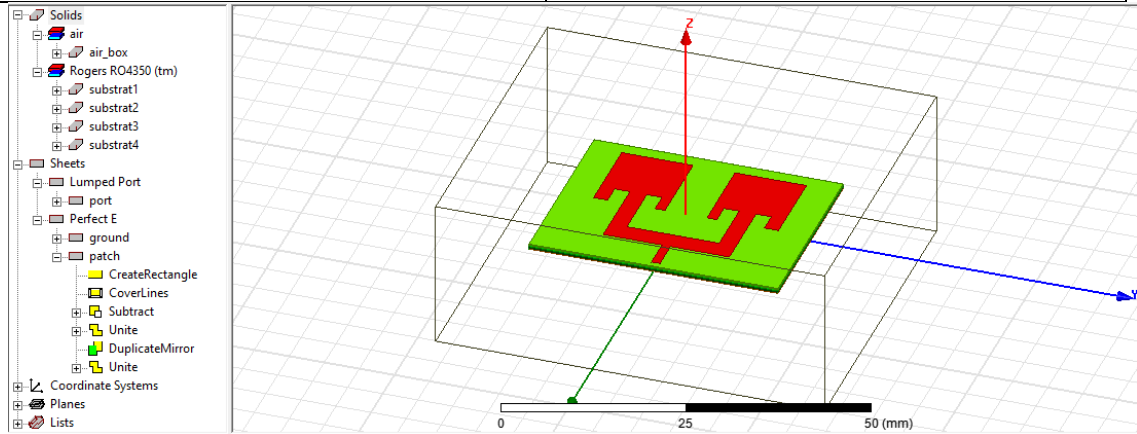
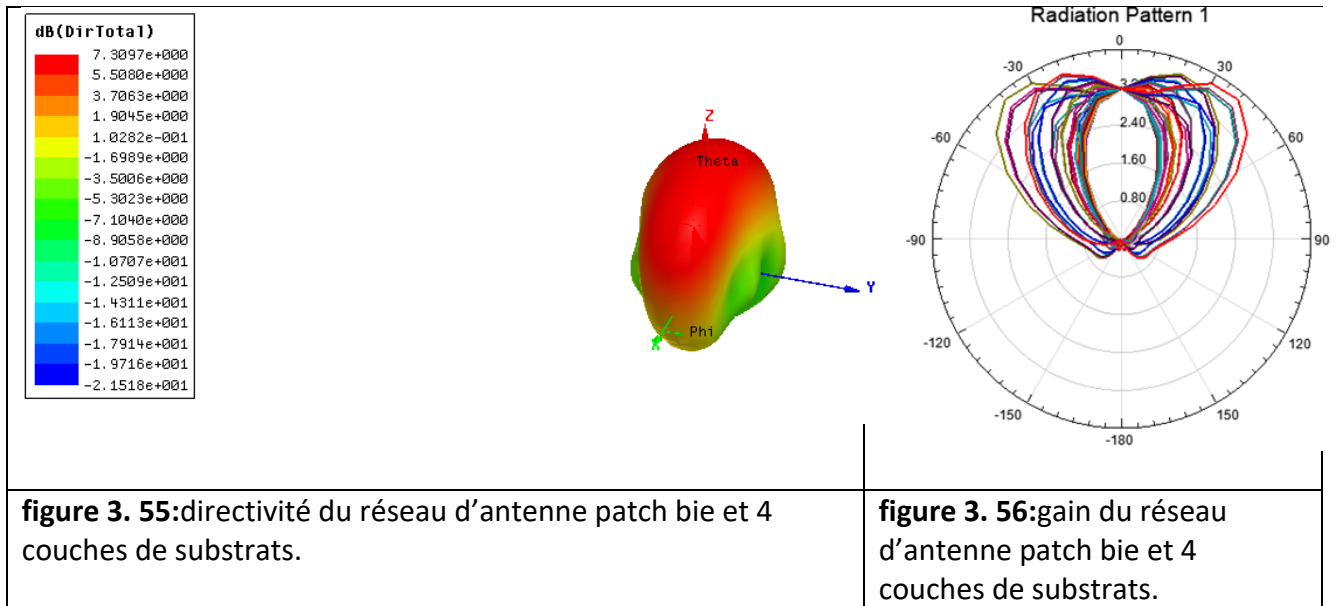
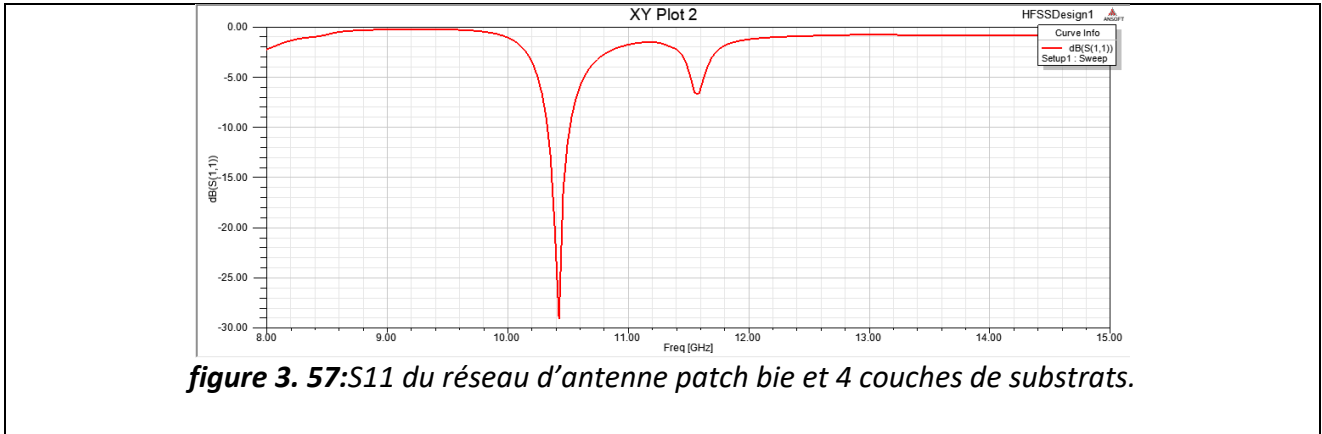


Figure 3. 54:réseaux d'antenne patch bie et 4 couches de substrats.





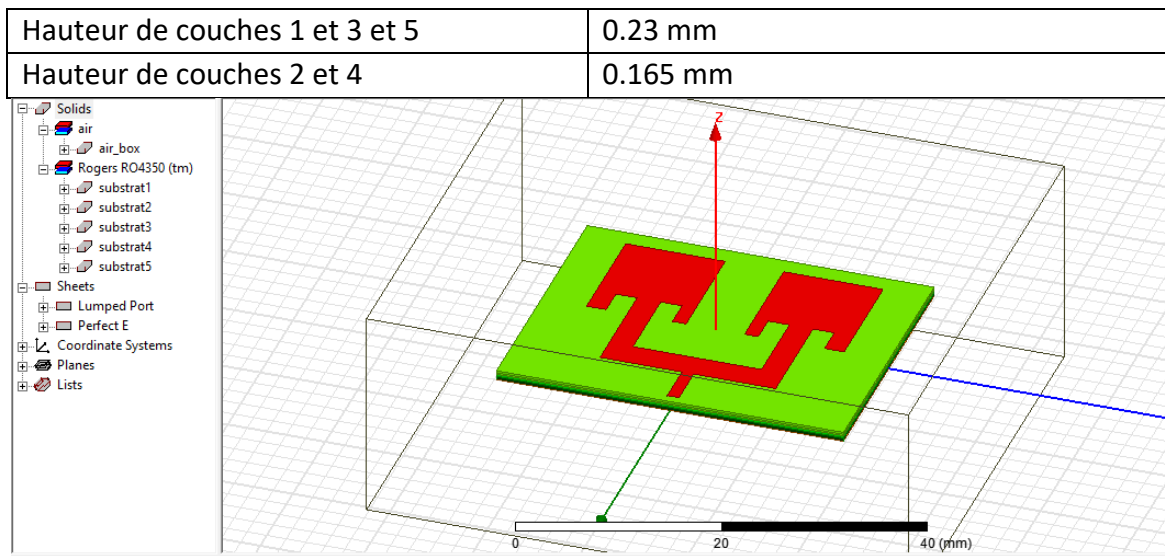
En calculant la bande passante et le S11 et le gain à la fréquence 10 GHz on aura :

$$B=10.51-10.33=0.18 \text{ GHz}$$

$$S_{11} = -1.0.7 \text{ dB}$$

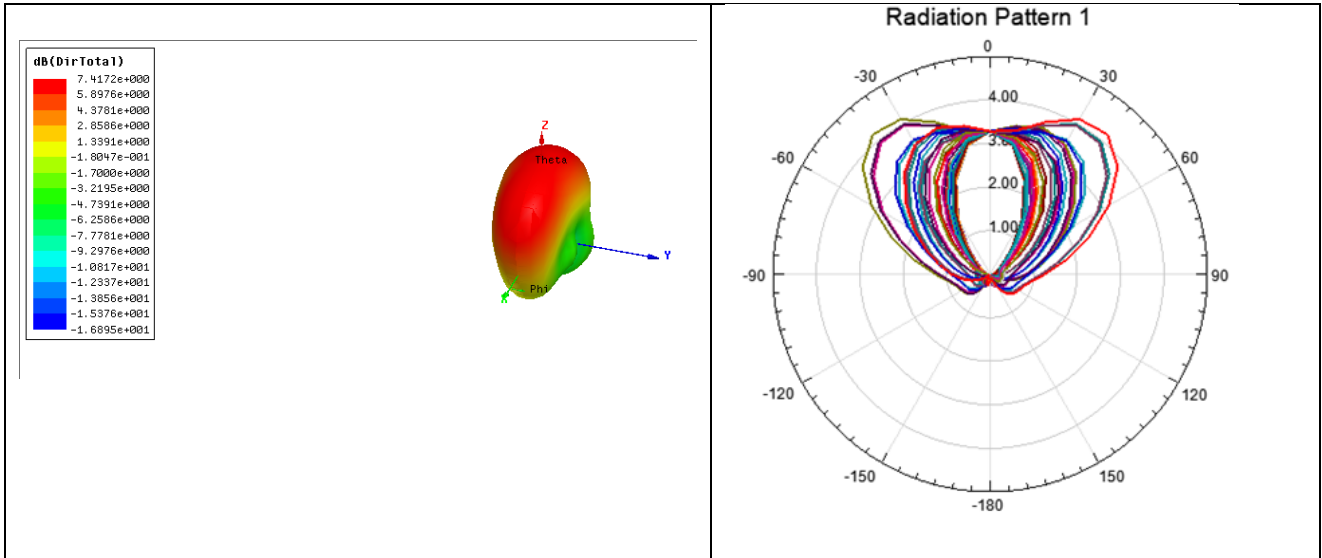
$$D=7.3097 \text{ db}$$

### 3.5.3.6 Réseau d'antenne patch avec 5 couches :



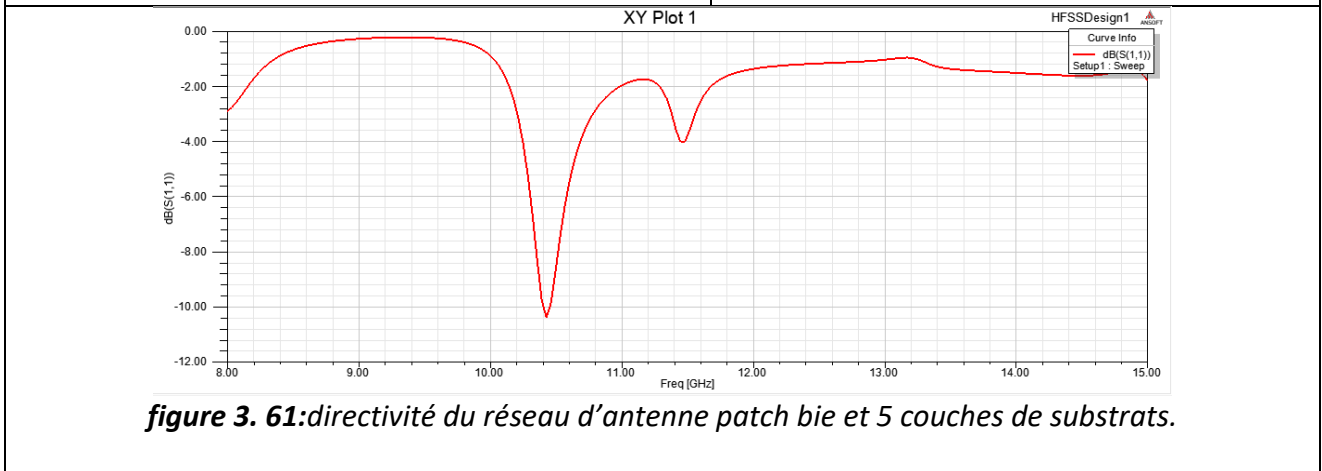
**Figure 3. 58:** réseaux d'antenne patch bie et 5 couches de substrats.

**Figure III .3.2.17 :** réseaux d'antenne patch bie et 5 couches de substrats.



**figure 3. 59:**directivité du réseau d'antenne patch bie et 5 couches de substrats.

**figure 3. 60:**gain du réseau d'antenne patch bie et 5 couches de substrats.



**figure 3. 61:**directivité du réseau d'antenne patch bie et 5 couches de substrats.

En calculant la bande passante et le S11 et le gain à la fréquence 10 GHz on aura :

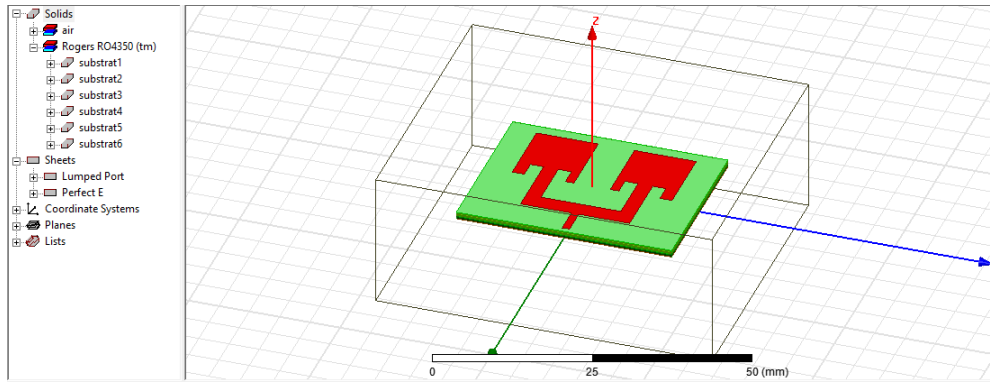
$$B=10.45-10.40=0.05 \text{ GHz}$$

$$S_{11} = -0.90 \text{ dB}$$

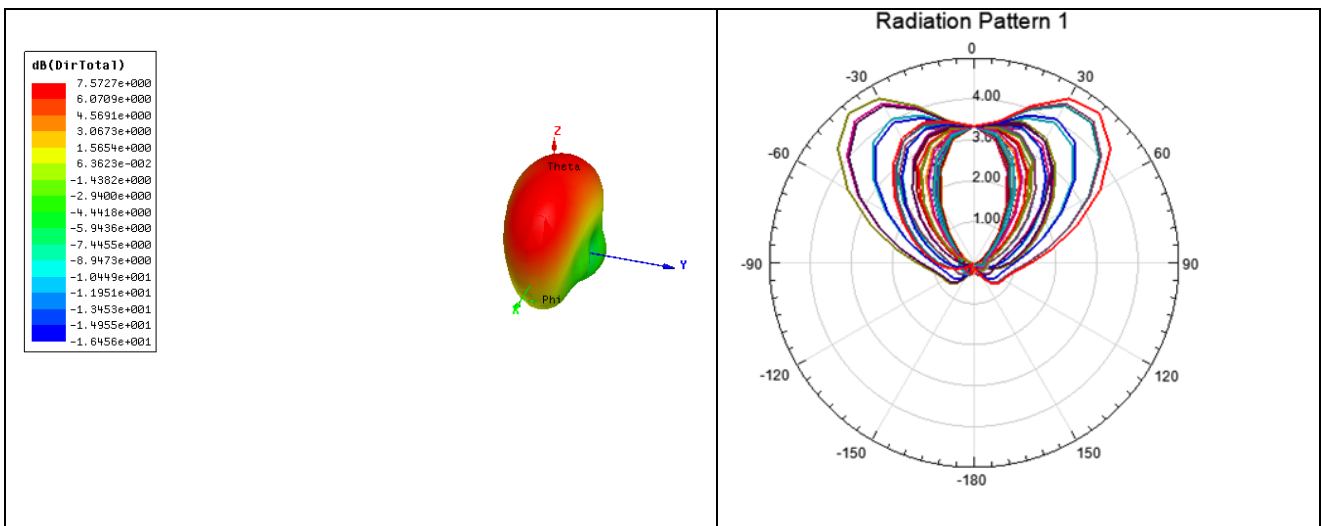
$$D= 7.4172 \text{ dB}$$

### 3.5.3.7 Réseau d'antenne patch avec 6 couches :

Hauteur de couches 1 et 3 et 5	0.23 mm
Hauteur de couches 2 et 4 et 6	0.165 mm

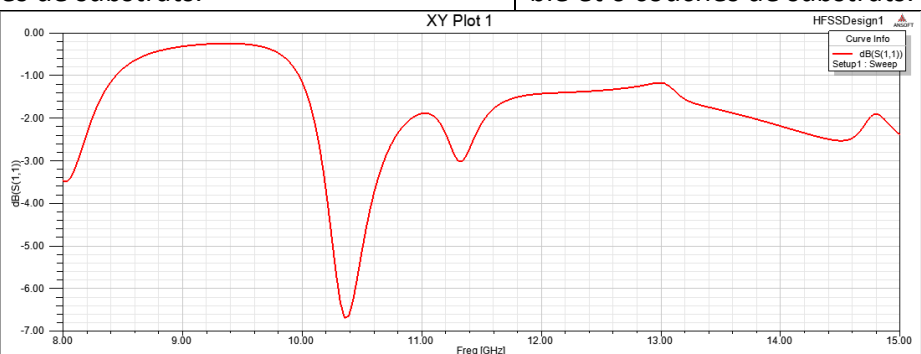


**Figure 3. 62:**réseaux d'antenne patch bie et 6 couches de substrats.



**figure 3. 63:**directivité du réseau d'antenne patch bie et 6 couches de substrats.

**figure 3. 64:**gain du réseau d'antenne patch bie et 6 couches de substrats.



**figure 3. 65:**S11 du réseau d'antenne patch bie et 6 couches de substrats.

L'antenne n'est pas adaptée.

Interprétation des

	Directivité (dB)	Le coefficient de réflexion S11 (dB)	La fréquence de résonance	La bande passante (GHZ)
réseau d'antenne patch bie et 1 couche de substrats.	8.135	-13.18	0.6	0.06
réseau d'antenne patch bie et 2 couches de substrats.	7.9962	-16.27	0.9	0.09
réseau d'antenne patch bie et 3 couches de substrats.	7.4267	-11.83	1.2	0.12
réseau d'antenne patch bie et 4 couches de substrats.	7.3097	-29.78	1.8	0.18
réseau d'antenne patch bie et 5 couches de substrats.	7.4172	-10.20	0.5	0.05
réseau d'antenne patch bie et 6 couches de substrats.				

**Tableau 3. 5:** les résultats pour les différentes structures d'un réseau d'antenne patch BIE.

A partir des figures précédente du coefficients de reflexion S11 et de la diréctivité et de gain , et les résultats indiqués dans le tableau III-4 des fréquences de résonances et les bande passantes structures, et on remarque que :

- réseau d'antenne patch bie et 6 couches de substrats n'est pas adaptée ;
- La fréquence de résonance pour réseau d'antenne patch bie et 5 couches de substrats a diminué par rapport au d'autre simulation ;
- La bande passante pour réseau d'antenne patch bie et 4 couches de substrats est plus large par rapport à un seul élément ;
- La directivité pour un réseau d'antenne patch bie et 1 couches de substrats est plus large aux dautre antennes .

### **3.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre En utilisant le logiciel HFSS nous avons étudié l'amélioration et l'évolution d'une antenne patch vers un réseau d'antenne patch de forme rectangulaire avec changement de substrat BIE unidimensionnelle, et nous avons étudié l'influence des paramètres de ce réseau d'antennes (géométrique et physique) sur la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité.

Les paramètres que nous avons étudiés sont : les dimensions du patch, la permittivité des deux matériaux du substrat BIE, l'épaisseur des couches du substrat.

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



## **Conclusion générale**

*L'objectif essentiel de notre travail était d'étudier un réseau d'antennes patches à deux éléments de forme rectangulaires à substrats BIE (1D), selon la fréquence de résonance, la bande passante et la directivité, en utilisant l'outil de simulation électromagnétique dans le domaine fréquentiel HFSS 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 dimensions des patches, l'épaisseur du substrat, la permittivité des couches du substrat à BIE  $\epsilon r1$  et  $\epsilon r2$ .*

*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 son alimentation.*

*Dans le deuxième chapitre nous présentons dans un contexte général la structurât 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 HFSS et. Après nous avons étudié une antenne patches à 1 seul éléments de forme rectangulaire pour chaque cas (sans encoches ligne d'alimentation à droite, plusieurs substrats) dans la première simulation .et pour la deuxième simulation on a étudié un réseau d'antenne patch de forme rectangulaire à bande interdite électromagnétique opérant dans la bande X [8 GHZ-15GHZ], où les résultats obtenus sont :*

- Les caractéristiques d'un réseau d'antennes patches sont liées directement à ses paramètres géométriques et physiques.
- La fréquence de résonance est plus importante pour une antenne à substrat BIE par rapport à celle d'un substrat simple.
- La bande passante est plus large pour une antenne à substrat à BIE par rapport à celle d'un substrat simple.

- La fréquence de résonance pour un réseau d'antennes a diminuée par rapport à celle d'un seul élément.
- La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation des épaisseurs des couches du substrat ( $h_1, h_2$ ).
- La fréquence de résonance et la bande passante diminuent avec l'augmentation de longueur et la largeur du patch.
- La fréquence de résonance et la bande passante augmentent avec la décroissance des permittivités des couches du substrat ( $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$ )
- La fréquence de résonance diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche du substrat  $h_2$  (relation inversement proportionnelle)
- La bande passante varie avec la variation de l'épaisseur de la couche du substrat  $h_2$  mais cette variation n'est pas uniforme ;
- Un matériau à BIE du substrat a une influence sur la directivité :
- 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 ;
- la directivité dépend de la longueur du patch mais cette variation n'est pas uniforme.
- La directivité varie en variant l'épaisseur de la couche du substrat  $h_2$  ;
- La directivité est inversement proportionnelle avec les permittivités des couches du substrat à BIE  $\epsilon_{r1}$  et  $\epsilon_{r2}$ .

Comme perspectives nous proposons l'étude des réseaux d'antennes micro rubans à BIE : 2D et 3D et à défauts, ainsi augmenter le nombre des éléments de ces réseaux.