

Université Kasdi Merbah Ouargla

**Faculté des Sciences et Nouvelles Technologies de l'Information et de la
Communication**

Département d'Electronique et Des Télécommunication



Mémoire

MASTER 2 ACADEMIQUE

Domaine : Science et Technologie

Filière : Télécommunication

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Présenté par :

Attaouat Ferdaous et Lechehab Soumia

Thème

**Etude et Conception d'une Antenne Patch
Monopole à faisceau reconfigurable à base de
surfaces sélectives en fréquence**

Soutenu publiquement 2020

Devant le jury composé de:

M. MEKIMAH Boualem	M.A (A)	Encadreur	UKM Ouargla
M. CHEBBARA Fouad	M.C. (A)	Président	UKM Ouargla
M.CHENINA Hachemi	M.A.(A)	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire:2019-2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tous nos remerciements vont d'abord à notre dieu le tout puissant pour avoir donnée la force la patience.

Nous exprimons par ce modeste travail notre gratitude, notre reconnaissance, nos grands remerciements à notre encadreur, Mr «MEKIMAH Boualem» pour nous avoir proposé ce sujet et pour nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques et aussi pour sa disponibilité.

A monsieur le président de jury, de nous honorer de présider le jury et à monsieur l'examineur pour avoir accepté d'être notre examinateur.

On n'oublie pas nos parents pour leurs contributions, leurs Soutiens et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous. Nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leur procure bonne santé et longue vie.

À ma grand-mère, mes frères et sœurs et sans oublier leurs enfants

A celle que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet : mon mari, et bien sûr à mes belles-sœurs que j'aime.

A toute ma famille, et mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements.

*A mon binôme **soumia** et toute la famille **ATTAOUAT**.*

A tous mes professeurs et enseignants que j'ai eu durant tout mon cursus scolaire et qui m'ont permis de réussir dans mes études.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Attaouat Ferdaous

Dédicace

*Au nom de dieu clément et miséricordieux, je dédie ce travail à ma
mère Naima*

*Tu présentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de
dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager*

A mon cher père Ali

*Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon
éducation et ma formation le long de ces années*

A tous mes frères et sœur takí eddine ,Oussama et maria

A mon fiancé

A ma grande mère

A toute la famille lachehab

A mon encadreur qui a consacré son temps et ses efforts pour nous

A tous mes amis et ceux que j'aime et surtout mon binôme ferdaous

*A l'ensemble des étudiants de la promotion systèmes des
télécommunications (2019/2020)*

- *Lechehab soumia*

Table des matières

Table des matières

Remerciments.....	I
Dédicace.....	II
Dédicace.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des abréviations.....	X
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 Généralités sur les antennes Patches	
1.1 Introduction.....	3
1.2. Définition d'une antenne patch.....	3
1.2.1. Les différentes formes d'une antenne patch.....	3
1.2.2. Mécanisme de rayonnement d'une antenne patch.....	4
1.3 Les techniques d'alimentations.....	5
1.3.1. Alimentation par contact.....	5
1.3.1.1. Alimentation par ligne micro-ruban.....	5
1.3.1.2. Alimentation par sonde coaxiale.....	6
1.3.2. Alimentation sans contact.....	7
1.3.2.1. Alimentation couplée par fente (ouverture).....	7
1.3.2.2. Alimentation couplée Par Proximité.....	7
1.4 Avantages et inconvénients des antennes patch.....	8
1.5. Antenne monopole.....	9
1.6. Conclusion.....	9

Table des matières

Chapitre 2 Surfaces Sélectives en Fréquence

2.1. Introduction.....	11
2.2. Historiques des surfaces sélectives en fréquence.....	11
2.3. Définition des surfaces sélectives en fréquences.....	12
2.3.1. Différents types de motifs de FSS	12
2.4 .Classification des surfaces sélectives en fréquence.....	13
2.5. Applications des surfaces sélectives en fréquence.....	14
2.6. Principe de fonctionnement de la diode PIN.....	15
2.6.1 Régime statique.....	16
2.6.2 Régime dynamique.....	16
3.2 Circuit équivalent de la diode PIN.....	17
3.3 Applications de la diode PIN.....	17
4. Conclusion.....	19

Chapitre 3 Résultats et discussion

3.1. Introduction.....	20
3.2. Conception de l'antenne monopole	20
3.2.1. Coefficient de réflexion.....	21
3.2.2. Diagramme de rayonnement.....	22
3.2.3. Gain.....	23
3.3. Conception de la surface sélective en fréquence (FSS).....	24
3.4 Conception de l'antenne globale reconfigurable.....	26
3.4.1 Coefficient de réflexion.....	27
3.4.2. Diagramme de rayonnement.....	28
3.4.3 Gain en représentation cartésienne.....	30

Table des matières

3.4.4 Directivité en représentation polaire.....	31
3.5 Conclusion.....	33
Conclusion générale.....	34
Bibliographie.....	36
Résumé.....	40

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1.1: Structure typique d'une antenne patch rectangulaire.....	3
Figure 1.2: Différentes formes d'antennes patch.....	4
Figure 1.3 : Distribution de charge et de densité de courant	5
Figure 1.4 : Distribution du champ électrique	5
Figure 1.5 Différents types d'alimentation par ligne Micro ruban. (a) axiale, (b) décalée, (c) axiale avec en coch.....	6
Figure 1.6 : Alimentation du patch par ligne microbande	6
Figure 1.7 : Alimentation du patch par un câbl coaxial.....	6
Figure 1.8 : Alimentation du patch par le couplage par fente	7
Figure 1.9 : Alimentation du patch par couplage de proximité	7
Figure 1.10: Antenne monopole.....	9
Figure 2.1 : Furtivité d'avion d'attaque	11
Figure 2.2 Caractéristique de l'éléments FSS	12
Figure 2.3 Classification typique des FSS en fonction de leur réponse en fréquence.....	14
Figure 2.4 : Diagramme schématique du radome	15
Figure 2.5: Diagramme schématique du FSS comme sous-rélecteur dans les system d'antennes.....	15
Figure 2.6: Structure de la diode PIN	16
Figure 2.7 : Schéma équivalent d'une diode PIN	17
Figure 2.8 : Schéma équivalent d'une diode PIN en microondes	17
Figure 2.9 : Principe de base de l'AFSS dans deux états de diode: (a) réflexion, (b) transmission	18

Liste des figures

Figure 3.1 : Structure de l'antenne monopole proposée, (a) vue de dessus et (b) vue de dessous	20
Figure 3.2 : Coefficient de réflexion s_{11} en (dB) en fonction de la fréquence en (GHz) de l'antenne monopole.....	21
Figure 3.3 : Diagramme de rayonnement en 3D à 5 GHz de l'antenne monopole	22
Figure 3.4 : Diagrammes de rayonnement polaires de l'antenne monopole à 5 GHz. (a) plan E, (b) plan H.....	23
Figure 3.5 : Gain de l'antenne monopole en fonction de la fréquence	23
Figure 3.6 : Structure de la cellule unitaire AFSS proposée	24
Figure 3.7 : Paramètres S en dB en fonction de la fréquence en GHz à l'état ON de la diode PIN.....	25
Figure 3.8 : . Paramètres S en dB en fonction de la fréquence en GHz à l'état OFF de la diode PIN.....	26
Figure 3.9 : Géométrie de l'antenne finale proposée en 3D	27
Figure 3.10 : Différentes combinaisons des diodes PIN de l'antenne globale proposée	27
Figure 3.11 : Comportement du panneau AFSS pour les deux états de la diode PIN	27
Figure 3.12 : Coefficient de réflexion s_{11} en (dB) des trois combinaisons en fonction de la fréquence en (GHz).....	28
Figure 3.13 Diagrammes de rayonnement en 3D correspondent aux trois combinaisons. ..	30
Figure 3.14 : Gain réalisé en dB en fonction de la fréquence en GHz des trois configurations.....	31
Figure.3.15 . Directivité en (dBi) pour différentes combinaisons des diodes	32

Liste des tables

Liste des tables

Table 1.1 : Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentatio.....	8
Table 3.1 :Différentes dimensions de l'antenne monopole.....	21
Table 3.2 –Différentes dimensions de la cellule unitaire FSS proposée.....	24
Table 3.3 –Comparaison de l'antenne proposée avec la littérature.....	32

Liste des abréviations

Liste des abréviations

RF:radio fréquence

MMIC: Microwave Monolithic Integrated Circuit

FSS: surface sélective en fréquence

RCS: radar cross section

EM: electromagnétique

TM: transverses magnétiques

TE: transverses électriques

AGC: contrôle automatique de gain

HF: haut fréquence

BF: base fréquence

AFSS: active frequency selective surfaces

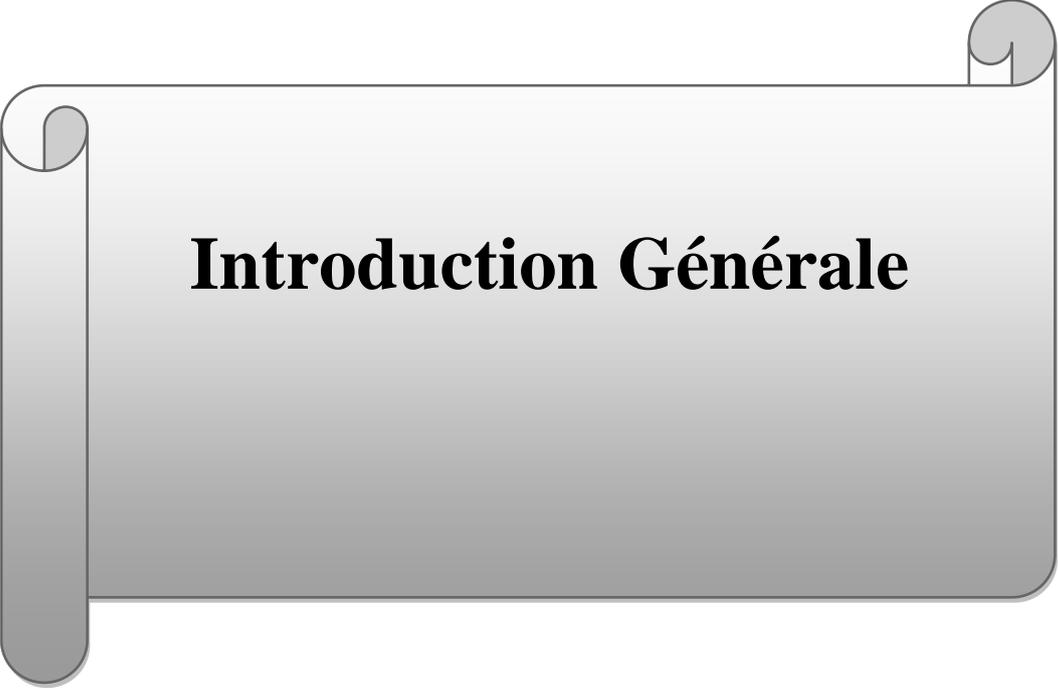
ATFSS: surface sélective de fréquence triangulaire active

ACFSS: FSS cylindrique actives

ACPFSS :patch cylindrique actif FSS

Wi-Fi : Wireless Fidelity.

CST : Computer Simulation Technology.



Introduction Générale

Introduction Générale

Les systèmes d'antennes reconfigurables sont l'un des technologies d'antennes, les plus recommandées dans les systèmes de communication sans fil récents. Ils permettent d'économiser l'énergie, d'augmenter le gain de l'antenne, de diminuer l'évanouissement par trajets multiples en dirigeant le signal souhaité vers l'utilisateur approprié, et en ajoutant plus de flexibilité à l'antenne. Par conséquent, la fonctionnalité de l'antenne sera augmentée, conduisant à une bonne qualité de transmission [1]–[7].

Il existe différentes méthodes pour concevoir des antennes reconfigurables dont la plus simple et la plus compacte, est l'utilisation des surfaces actives sélectives en fréquence (AFSS). Les surfaces sélectives en fréquence (FSS) sont des structures périodiques qui servent à filtrer les ondes électromagnétiques [8], [9]. Ils peuvent être transparents ou réfléchissants, tout dépend de la conception des cellules unitaires [8]. Par l'utilisation des dispositifs actifs, tels que les diodes PIN, les surfaces FSS peuvent atteindre un niveau de contrôle élevé sur les ondes électromagnétiques, telle que la commutation entre les modes transparents et réfléchissants des surfaces FSS. Afin de réaliser une commutation d'un diagramme de rayonnement omnidirectionnel vers un rayonnement directionnel, ainsi que la capacité de balayage de faisceau, les FSS cylindrique actives (ACFSS) à plusieurs couches [10], [11] ou à une seule couche [10] à fils métalliques ont été explorés et le patch cylindrique actif FSS (ACPFSS) ont été étudiés et rapportés dans [3], [12]–[14], où les antennes omnidirectionnelles sont placées au centre de l'ACPFSS, et le plan azimutal 360° est divisé en plusieurs secteurs. Par commutation entre les états des diodes (ON/OFF), les secteurs du cylindre ACPFSS peut être rendu transparents ou réfléchissants dans la bande de fonctionnement, de sorte que le faisceau d'antenne puisse être dirigé selon les modèles et les directions requis. Malgré toutes ces fonctionnalités, ces conceptions présentent une complexité élevée qui augmente considérablement la taille de l'antenne et le cout de fabrication.

Dans ce mémoire, suite à la récente contribution de l'auteur [1], une nouvelle conception d'une antenne à commutation de faisceau basée sur les surfaces sélectives en fréquence actives (AFSS) est proposée. La surface AFSS se comporte comme un filtre spatial reconfigurable; une fois il laisse passer les ondes électromagnétiques dans une bande de fréquences (surface transparente) et rejette d'autres bandes (surface réfléchissante). Ce comportement peut être inversé par d'autre combinaison des états des diodes PIN utilisées. L'antenne globale proposée comprend trois panneaux AFSS, disposés en triangle équilatéral, enveloppant une antenne d'alimentation placée au milieu de la structure utilisée pour exciter les surfaces AFSS. L'antenne utilisée est un monopole planaire à radiation omnidirectionnelle. En appliquant plusieurs

Introduction Générale

combinaisons des diodes (ON/OFF) sur chaque panneau AFSS, la direction du faisceau est orientée dans diverses directions (60° , 180° et 300°). L'antenne proposée peut diriger le faisceau dans différentes directions dans le plan azimutal avec une ouverture de 120° entre les panneaux AFSS.

L'antenne reconfigurable proposée fournit un gain réalisé maximal de 5.71 dBi, ce qui est presque 3.5 dBi plus élevé que le gain de l'antenne monopole sans FSS. Les résultats obtenus montrent un très bon accord entre nos résultats et les résultats disponibles dans la littérature. La structure d'antenne proposée peut être utilisée dans les applications Wi-Fi 5 GHz et d'autres applications fonctionnent à la même fréquence énoncée.

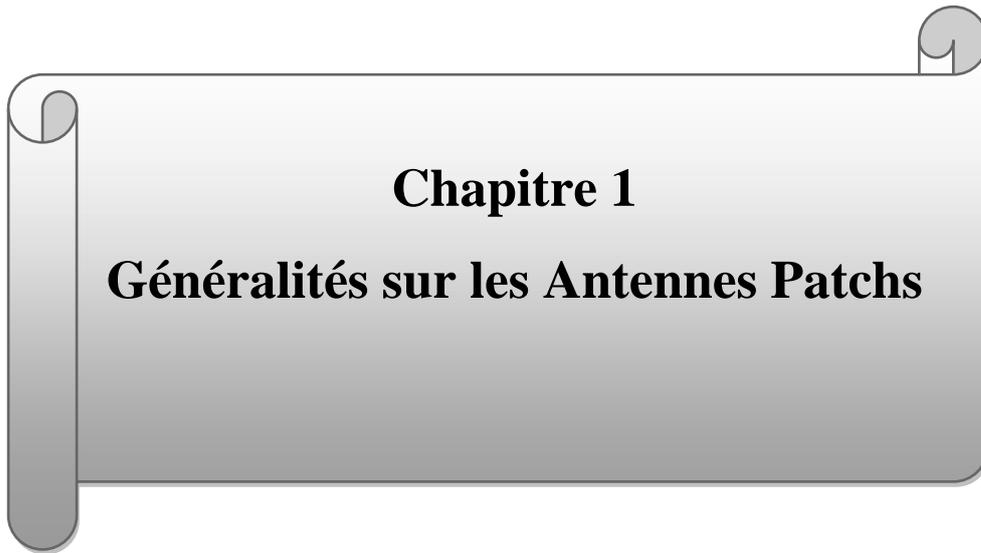
Ce manuscrit comporte trois chapitres :

Dans le premier, nous présentons une définition générale des antennes, plus particulièrement les antennes patches, nous présentons également leur configuration de base, leurs caractéristiques, leurs techniques d'alimentation, leurs mécanismes de rayonnement, ainsi que leurs avantages et inconvénients et nous citons leurs principaux domaines d'application. Enfin, nous faisons présenter une antenne monopole à radiation omnidirectionnelle, pour l'exploiter par la suite avec des surfaces sélectives en fréquence.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons, en premier lieu, la définition d'une surface sélective en fréquence (FSS), les différents types de motifs des FSS et ainsi que leur classification. Ensuite, nous citons les principales applications des surfaces FSS qui justifient leur intérêt dans le domaine des micro-ondes et également dans d'autres domaines. Parfois, l'utilisation des composants actifs, telle que la diode PIN, dans la conception des surfaces FSS fait améliorer encore leurs caractéristiques, et les rendre reconfigurables. En effet, le principe de fonctionnement de la diode PIN, ses circuits équivalents et ses applications sont bien présentés.

Le troisième chapitre est consacré à la conception de l'antenne proposée, nous présentons ses scénarios de conception. Ensuite, nous présentons les différents résultats trouvés avec leurs discussions et interprétations. Enfin, nous comparons nos résultats avec ceux de la littérature.

Nous finirons par une conclusion générale résumant les principaux résultats trouvés et nous citerons également dans cette partie les perspectives de ce travail.



Chapitre 1

Généralités sur les Antennes Patches

1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une définition générale des antennes, plus particulièrement les antennes patches, nous présentons également leur configuration de base, leurs caractéristiques, leurs techniques d'alimentation, leurs mécanismes de rayonnement, ainsi leurs avantages et inconvénients et nous citons leurs principaux domaines d'application. En fin, nous faisons présenter une antenne monopole à radiation omnidirectionnelle, pour l'exploiter par la suite avec des surfaces sélectives en fréquence.

1.2. Définition d'une antenne patch

Une antenne patch est une ligne microbande, se compose d'une pièce métallique rayonnante (matériaux conducteur, patch ou élément rayonnant) de forme arbitraire, déposée sur un substrat diélectrique. Un plan de masse couvre la surface inférieure du substrat (Fig.1.1).

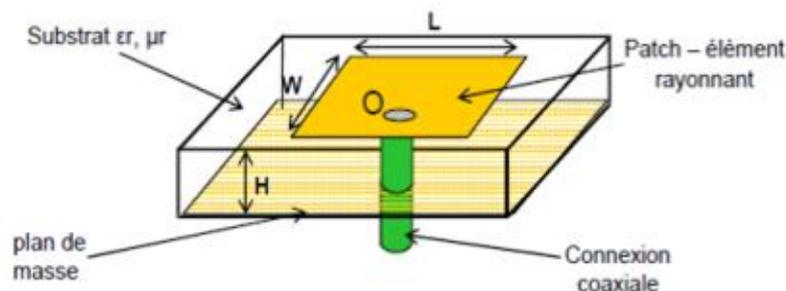


Fig.1.1–Structure typique d'une antenne patch rectangulaire.

Le patch est généralement fabriqué à base d'un matériau conducteur, tel que le cuivre ou l'or, et il peut prendre n'importe quelle forme possible. L'élément rayonnant et la ligne d'alimentation sont gravés sur le substrat diélectrique. [15], [16].

1.2.1. Différentes formes d'une antenne patch

Le patch rayonnant peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carré, circulaire ou simplement un dipôle. Ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant [17].

En pratique, les formes des éléments rayonnants sont montrées sur la Fig.1.2, leurs dimensions sont généralement de l'ordre de $\lambda/2$ à λ [18].

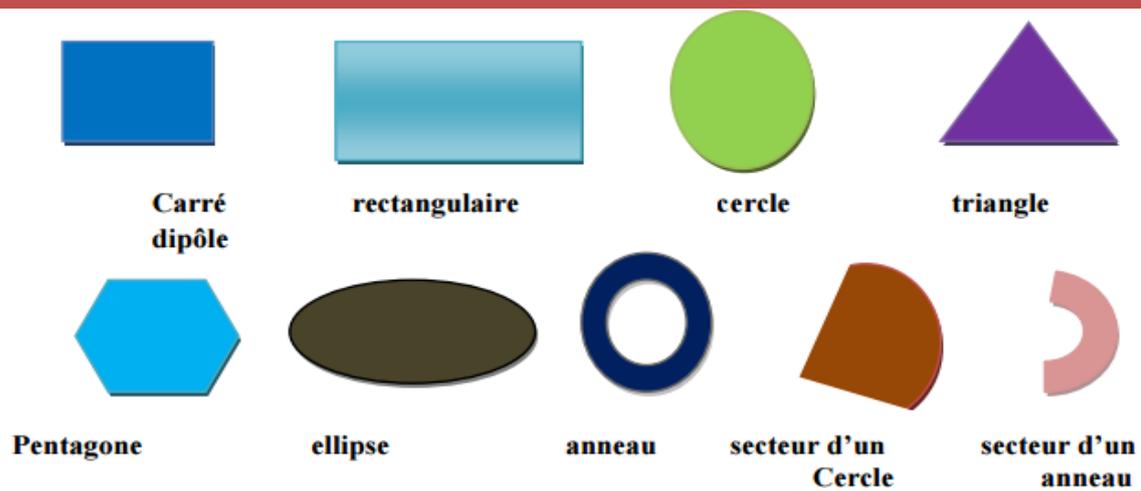


Fig.1.2–Différentes formes de l'antenne patch.

1.2.2. Mécanisme de rayonnement d'une antenne patch

Le mécanisme de rayonnement d'une antenne patch s'effectue à partir de sa forme géométrique. Une fois, la ligne d'alimentation excitée par une source RF, une onde électromagnétique se propage sur cette ligne, puis attaque l'élément rayonnant.

Une distribution de charge, Fig.1.3, va se s'établir à l'interface substrat /plan de masse, sur et sous l'élément rayonnant, et crée un champ électrique vertical, Fig.1.4, entre le patch et le plan de masse ce qui va provoquer :

- Une inversion des phases des composantes verticales du champ électrique sur la longueur de l'antenne.
- Contrairement à précédemment, des rayonnements qui sont en phase dans le plan de l'antenne et dus aux composantes horizontales des lignes de champ qui entoure l'élément imprimé.
- Une modélisation de l'antenne patch par une cavité à 4 murs magnétiques (bords de la cavité) et 2 murs électriques (formés par les métallisations) [19].

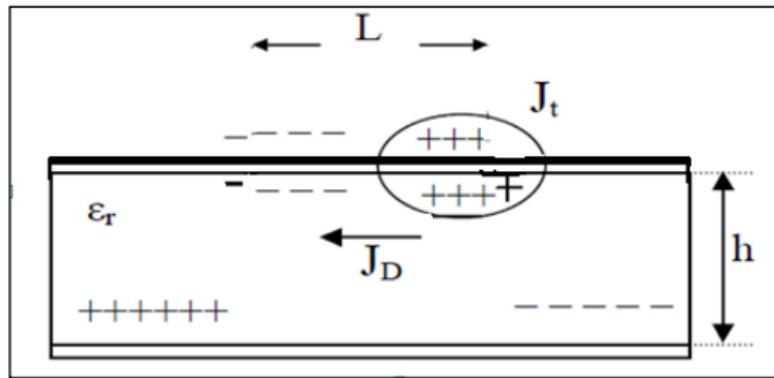


Fig.1.3–Distribution de charge et de densité de courant.

Avec : J_D représente le courant de déplacement et J_t le courant de surface.

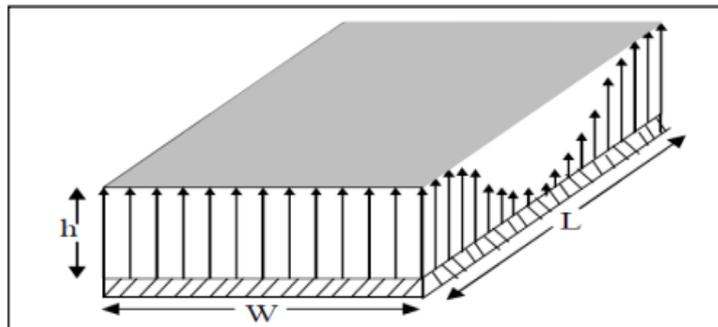


Fig.1.4–Distribution du champ électrique.

1.3. Techniques d'alimentations

Il existe plusieurs méthodes d'alimentation des antennes micro-rubans peuvent être classées en deux grandes catégories : l'alimentation par contact (ligne micro ruban et sonde coaxiale) et l'alimentation par proximité (couplage par fente et couplage de proximité).

1.3.1. Alimentation par contact

❖ Alimentation par ligne micro-ruban

Le moyen le plus simple pour alimenter un patch micro ruban est de connecter directement au bord du patch tout en gardant les deux éléments sur le même substrat [20], Comme montré sur la Fig.1.6. L'alimentation peut être établie par la connexion directe à une ligne microbande dont le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément ou décalé par rapport à cet axe de symétrie si cela permet une meilleure adaptation d'impédance [21], comme il a été montré sur la

Fig.1.5.

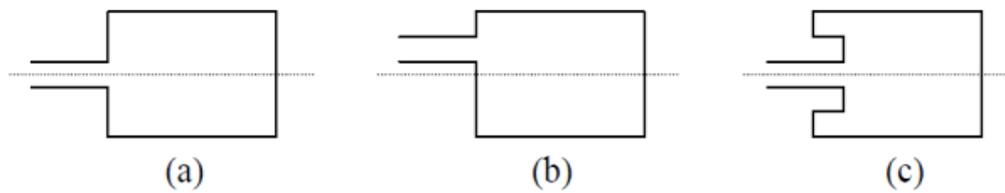


Fig.1.5–Différents types d'alimentation par ligne Micro ruban. (a) axiale, (b) décalée, (c) axiale avec encoche.

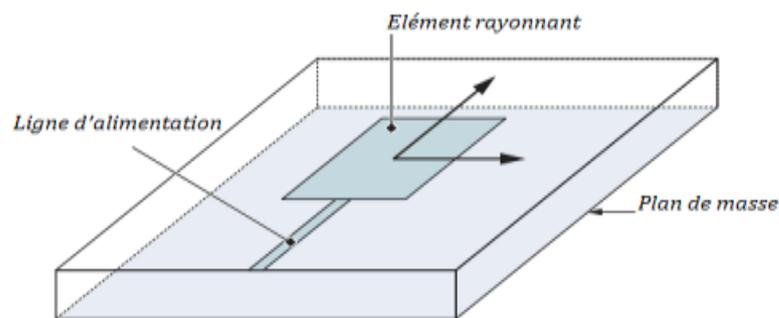


Fig.1.6–Alimentation du patch par ligne microbande.

❖ Alimentation par sonde coaxiale

Un autre moyen pour alimenter le patch consiste à placer une ligne coaxiale perpendiculairement au plan de masse (Fig.1.7) [20].Le conducteur central est connecté sur l'élément rayonnant, et le conducteur extérieur est connecté au plan de masse [22].

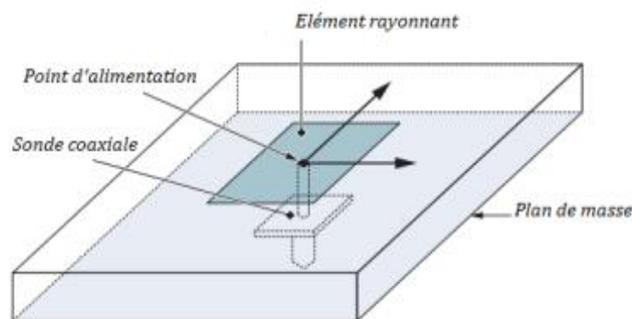


Fig.1.7–Alimentation du patch par un câble coaxial.

1.3.2. Alimentation sans contact

❖ Alimentation couplée par fente (ouverture)

Dans ce type d'alimentation, le patch micro ruban et la ligne d'alimentation sont séparés par le plan de masse comme indique sur (Fig.1.8) Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation est assuré par une fente ou une ouverture dans le plan de masse [23]. généralement, les matériaux à permittivité élevée sont employés pour le substrat inférieur par contre les matériaux à faible constante diélectrique sont utilisés pour le substrat supérieur dans le but d'optimiser le rayonnement du patch [24].

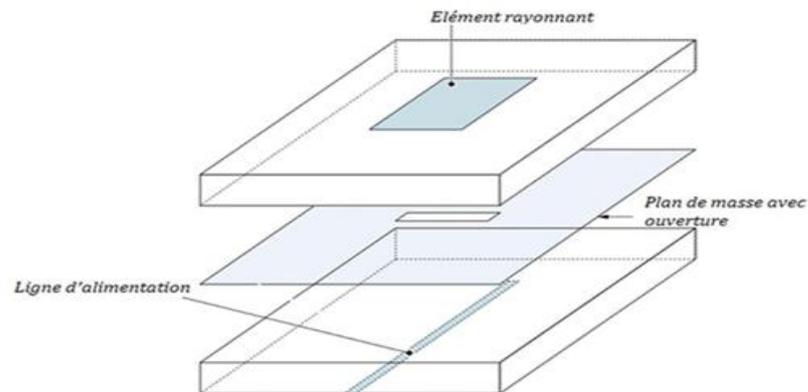


Fig.1.8–Alimentation du patch par le couplage par fente.

❖ Alimentation couplée par proximité

Alimentation par proximité, emploie un substrat de deux couches avec une ligne micro ruban sur le substrat inférieur se terminant dans un stub ouvert au-dessous du patch, ce qui est imprimé sur le substrat supérieur [25], Fig.1.9.

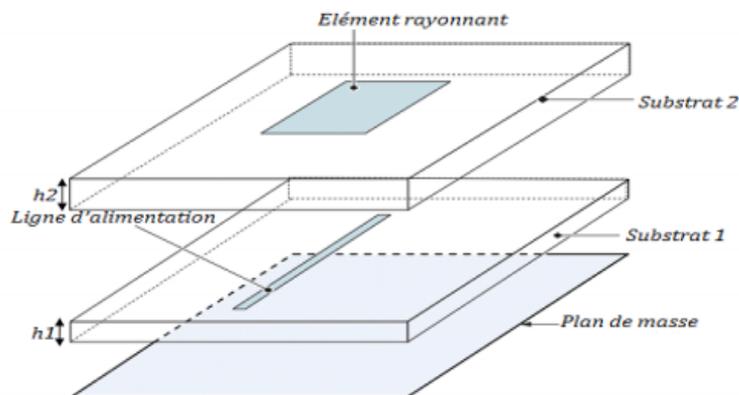


Fig.1.9–Alimentation du patch par couplage de proximité.

Table 1- Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation.

Caractéristiques	Alimentation par la ligne micro ruban	Alimentation coaxial	Alimentation couplée par ouverture	Alimentation couplée par proximité
Rayonnement parasite	Plus	Plus	Moins	Minimum
Fiabilité	Meilleur	Pauvre à cause de soudure	Bon	Bon
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et forage requis	Alignement requis	Alignement requis
Adaptation d'impédance	Facile	Facile	Facile	Facile
Bande passante	2-5%	2-5%	2-5%	13%

1.4. Avantages et inconvénients

Les antennes micro ruban ont suscité beaucoup d'attention ces dernières années ceci à cause de leurs nombreuses propriétés uniques et attrayantes [25]. Parmi les avantages de ces d'antennes, on peut citer [26] :

- Faible poids, encombrement réduit, configurations conformes possibles.
- Faible coût de fabrication, production en masse possible.
- Polarisation linéaire et circulaire pour les télécommunications.
- Antennes multi bandes, multi-polarisations possibles.
- Compatibilité avec les circuits hybrides et MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit).
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.

Malgré ces avantages, les antennes micro-rubans ont également des inconvénients, inhérents à leur fonctionnement propre [21].

- Faible bande passante (1 à 5%).
- Faible puissance admissible.
- Forte influence de la qualité du substrat diélectrique sur les performances.
- L'alimentation et les ondes de surface créent un rayonnement parasite.

1.5. Antenne monopole

L'antenne monopôle ou quart d'onde est constituée d'un élément de longueur égale un quart de la longueur d'onde, perpendiculaire à un plan conducteur. Elle se comporte comme un demi-dipôle, le plan conducteur agissant en miroir.

L'alimentation de l'antenne $\lambda/2$ au centre n'est pas toujours facile, donc il existe une astuce qui consiste à remplacer le brin inférieur $\lambda/4$ par un plan de masse (en théorie de dimensions infinies) lequel est capable de remplacer le brin manquant, Fig.1.10.

Cette antenne « monopôle $\lambda/4$ » est aussi appelée « antenne fouet » ou « verticale au sol »

La Figure 1.10, ci-dessous représente en vert les diagrammes d'émission et de réception théoriques. L'amplitude des courants dans les antennes est visualisée en trait rouge [27].

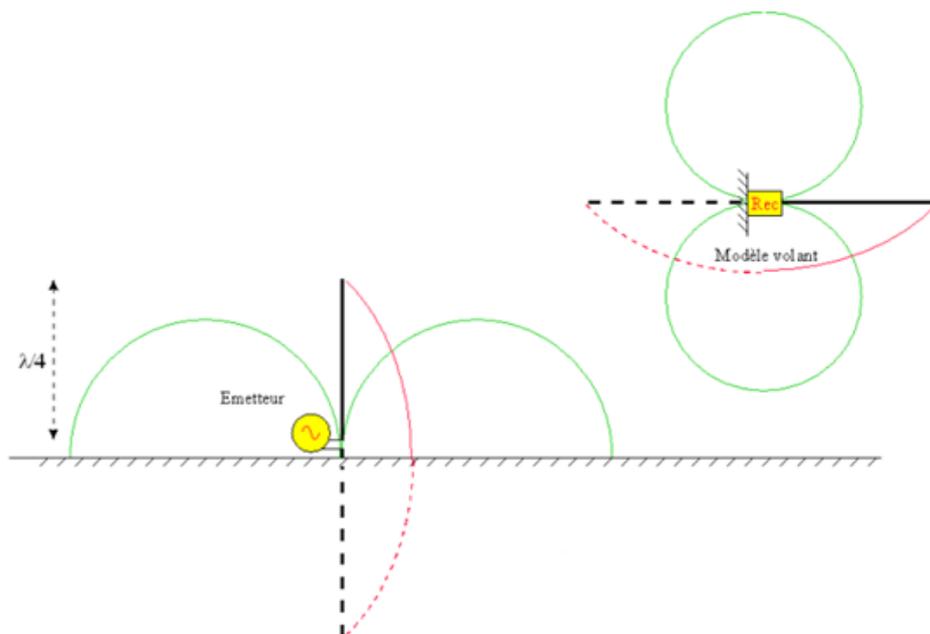
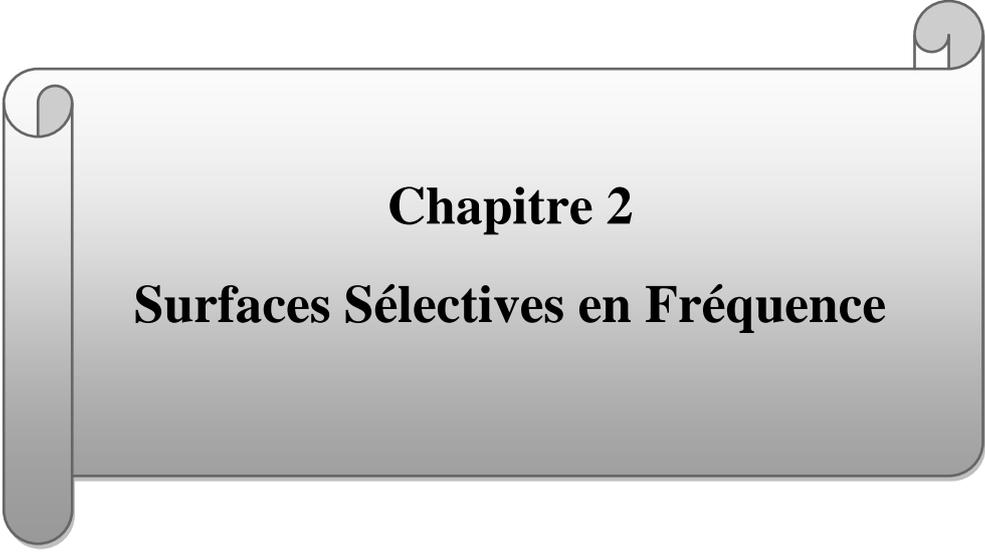


Fig.1.10–Antenne monopole.

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions basiques sur les antennes patches. Nous avons parlé de leurs formes, mécanisme de rayonnement et nous avons étalé sur leurs techniques d'alimentation. Après, nous avons fait également une comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation. Ensuite, nous avons discuté les avantages et les inconvénients de l'antenne patch. Nous avons présenté un bref sur l'antenne monopole qui servira par la suite dans la conception

d'une antenne patch reconfigurable en termes de radiation, à base des surfaces sélectives en fréquence.



Chapitre 2
Surfaces Sélectives en Fréquence

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons, en premier lieu, la définition d'une surface sélective en fréquence (FSS), les différents types de motifs des FSS et ainsi leur classification. Ensuite nous citons les principales applications des surfaces FSS qui justifient leur intérêt dans le domaine des microondes et ainsi dans d'autres domaines. Parfois, l'utilisation des composants actifs dans la conception des surfaces FSS fait améliorer encore leurs caractéristiques. En effet, le principe de fonctionnement de la diode PIN, ses circuits équivalents et ses applications ont été bien présentés.

2.2 Historiques des surfaces sélectives en fréquence

Les surfaces sélectives en fréquence ont été découvertes en 1783 par David Rittenhouse et Francis Hopkinson [28]. Depuis cette époque, les physiciens se sont intéressés aux propriétés de ces structures; au début c'était dans le domaine de l'optique puis dans le domaine des Microondes [29].

Au début des années 1960, en raison des applications militaires potentielles, les structures FSS ont fait l'objet d'études intensives. Marconi et Franklin, cependant, sont crus être les pionniers dans ce domaine pour leur contribution d'un réflecteur parabolique en utilisant des sections de fil demi-onde en 1919. Les FSSs ont été utilisés traditionnellement dans la technologie furtive pour réduire les surfaces équivalentes radar (Radar Cross Section RCS) des systèmes de communication.

Le concept de la furtivité a toujours été un objectif de la technologie militaire (Fig.2.1). Afin de minimiser la détection, les couches de FSS couvrent les installations afin de réduire la RCS [30].



Fig.2.1–Furtivité d'avion d'attaque.

2.2 Définition des surfaces sélectives en fréquences

Les surfaces sélectives en fréquences (FSS) sont des éléments en métal placés périodiquement bidimensionnel ou tridimensionnel généralement planes ou quasi-planaires, composant d'un tableau infini de plaques métalliques ou d'un tableau d'ouvertures dans un tôle à base de substrat diélectrique, FSS conçues comme une sorte de filtre spatial en raison de leurs réponses à une onde électromagnétique (EM).

Les FSS peuvent transmettre presque tous les ondes EM sur une bande passante spécifique tout en reflétant presque toute l'énergie à travers une autre largeur de bande de fréquence [8]

A l'origine, la technologie des FSS faisait partie du domaine militaire. Aujourd'hui, les FSS ont trouvé de nombreuses applications en électromagnétisme, micro-ondes, antennes, radar, et communications par satellite.

2.3 Différents types de motifs de FSS

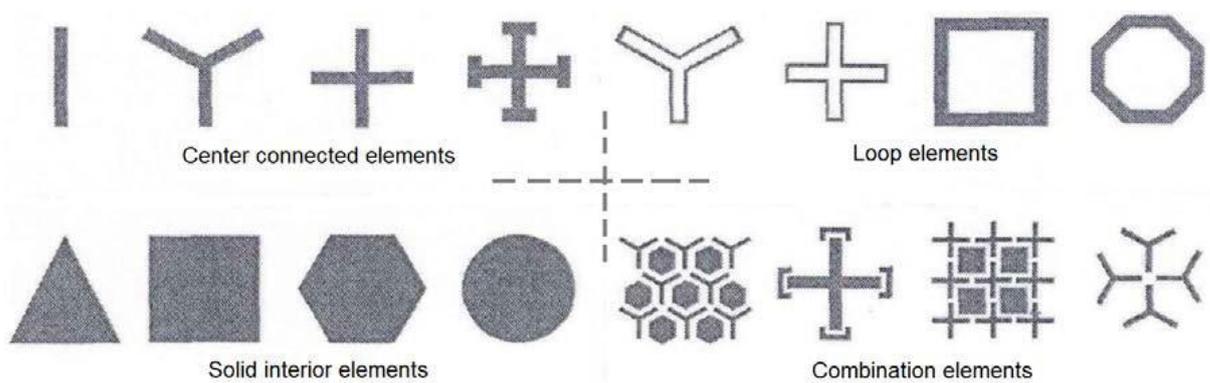


Fig.2.2—Caractéristique de l'éléments FSS .

La Figure 2.2 illustre différentes formes d'éléments FSS. Le premier groupe est constitué d'éléments connectés au centre, le deuxième groupe comprend les éléments de boucle, le troisième groupe est solides éléments intérieurs et le quatrième groupe est constitué des éléments de combinaison [31].

2.4 Classification des surfaces sélectives en fréquence

Selon les caractéristiques du filtre, les surfaces sélectives en fréquence peuvent être divisées en quatre types : passe-bande, passe-haut, coupe bande et passe bande.

Pour chaque type de FSS, nous pouvons étudier les ondes électromagnétiques à la structure en deux polarisations distinctes : TE (transverses électriques) et TM (transverses magnétiques).

Les structures de base et leur réponse en fréquence sont illustrées à la Fig.2.3. La couleur orange présente le métal; tandis que le blanc présente le support diélectrique. La grille métallique fournit des caractéristiques de filtre passe-haut sur le champ électromagnétique et les patchs se comportent comme un filtre passe-bas, tandis que le métal et les ouvertures FSS ont respectivement des caractéristiques de filtrage coupe-bande et caractéristique de filtrage passe-bande [8].

Des exemples typiques des quatre types de filtres sont décrits ci-dessous :

- ✓ **FSS coupe-bande** : Il apparaît sous la forme de réseau planaire périodique dont les éléments conducteurs ont des géométries suivantes [32] : dipôles, anneaux circulaires, anneaux carrés, anneau hexagonal, croix de Jérusalem, tripodes, etc. Une structure typique est illustrée à la Fig.2.3(a).
- ✓ **FSS passe-bande** : Un filtre passe bande typique est illustré à la Fig.2.3(b). Il est le complément Babinet du filtre coupe-bande Fig.2.3(a).
- ✓ **FSS passe-haut** : Ils peuvent être construits par perforation d'un plan conducteur avec des ouvertures ayant des formes quelconques Fig.2.3(c).
- ✓ **FSS passe-bas** : Un filtre passe bas peut être le complément de Babinet du filtre passe haut. La figure 2.3(d) montre un exemple d'un réseau de patchs, lequel est le complément de Babinet de la FSS présentée sur la Fig.2.3(c).

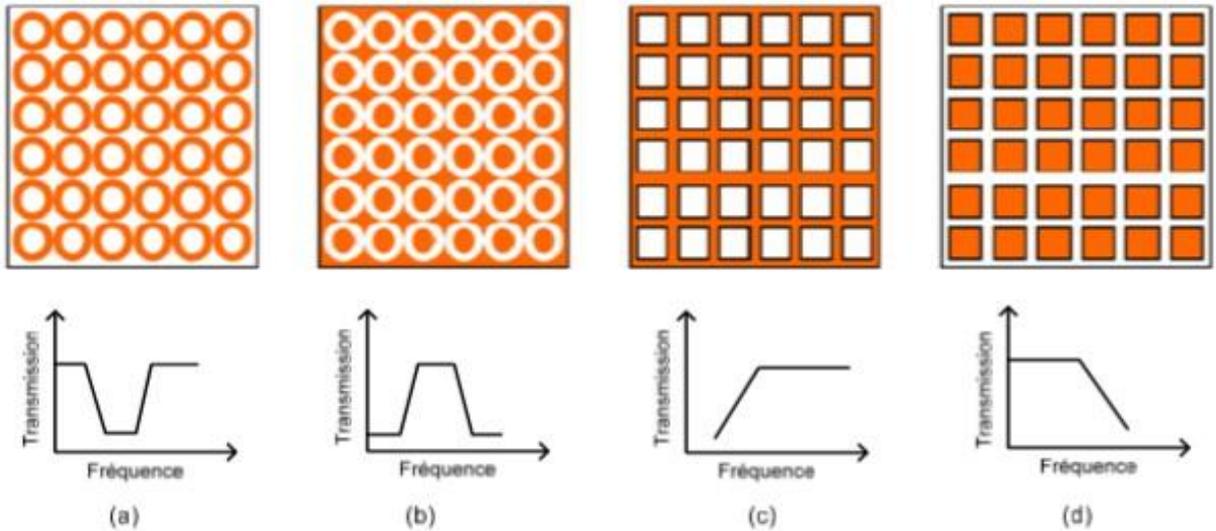


Fig.2.3–Classification typique des FSS en fonction de leur réponse en fréquence.

2.5 Applications des surfaces sélectives en fréquence

Le premier prototype FSS en tant que surface partiellement réfléchissante a été signalé en 1919 par Marconi et Franklin . Cependant, jusqu'au milieu des années 1960, les FSS ont fait l'objet d'une étude théorique approfondie et expérimentale, et ont été largement utilisés dans de nombreux domaines [8].

Un exemple d'application de la surface FSS est le blindage sur la porte d'un four à micro-ondes qui nous permet pour voir la nourriture à l'intérieur sans être rayonnée par les ondes électromagnétiques des micro-ondes four car le blindage est fait de FSS. Les FSS reflètent l'énergie micro-ondes et permettent la lumière visible à traverser. En outre, il existe de nombreux endroits utilisant des FSS dans des applications civiles, tels que les systèmes anti collision pour les véhicules autonomes, les dispositifs de blindage électromagnétique des lieux publics tels que les hôpitaux et les aéroports, les systèmes de navigation robotisés, les cristaux photoniques, etc. Une autre application importante est que les FSS peuvent être utilisées dans le domaine militaire comme radômes, qui peut diminuer la section radar (RCS) des antennes de communication et les cacher de l'ennemi. Les radômes fonctionnent en ne laissant passer que les fréquences opérationnelles et rejetant les autres fréquences situées en dehors de cette bande [8], dont le schéma est montré à la Fig.2.4.

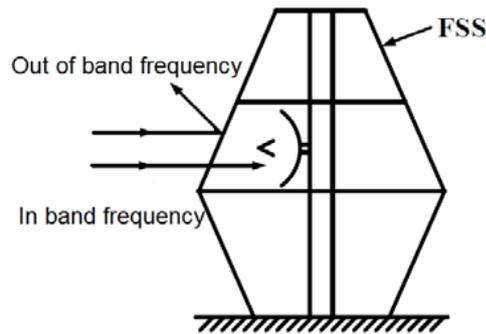


Fig.2.4–Diagramme schématique du radome.

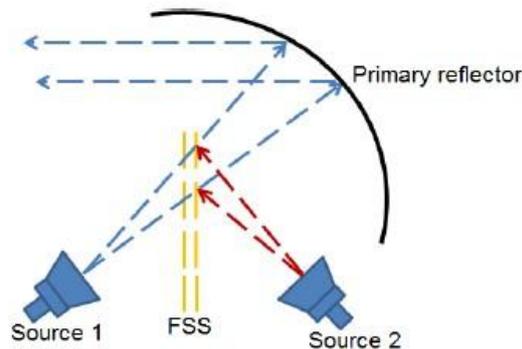


Fig.2.5–Diagramme schématique du FSS comme sous-rélecteur dans les systèmes d'antennes.

Il existe une autre application très typique dans le domaine des antennes hyperfréquences. Afin d'améliorer l'efficacité des antennes, les FSS ont également été utilisées comme sous-rélecteur dans les systèmes d'antennes permettant de réaliser un fonctionnement multifréquence [8]. Comme le montre la Fig.2.5, les FSS sont conçues à être utilisées comme sous-rélecteurs placés entre deux fréquences différentes dans un système d'antenne à réflecteur. Le FSS est transparent pour l'alimentation 1 (source 1) dans la première bande de fonctionnement, tandis qu'il fonctionne comme un sous-rélecteur dans la deuxième bande de fréquence de travail pour l'alimentation 2 (source 2). Par conséquent, en utilisant un seul réflecteur principal à deux différentes fréquences de fonctionnement, non seulement la taille et le coût des systèmes d'antennes sont réduits, mais l'efficacité des antennes a également été améliorée [8].

2.6 Principe de fonctionnement de la diode PIN

Une diode PIN se compose de trois parties : deux zones extrêmes $P+$ et $N+$ fortement dopées, et une région intermédiaire théoriquement intrinsèque, en pratique faiblement dopée de type $N-$ (Fig.2.6), qui possède une faible conductivité.

Un schéma équivalent est toujours valable en polarisation inverse (une grande résistance mise en parallèle avec une faible capacité). En polarisation directe, la région p^+ injecte des trous dans la zone 1 tandis que la région n^+ injecte des électrons. La conductivité de la région intrinsèque devient très grande. Une diode PIN équivaut donc à la mise en série de deux jonctions PI et IN. Comme il est nécessaire que la longueur de la zone 1 soit inférieure à la longueur de diffusion, un seul corps, le silicium, convient pour fabriquer des diodes PIN, en raison de sa résistivité intrinsèque et de la durée de vie des porteurs.

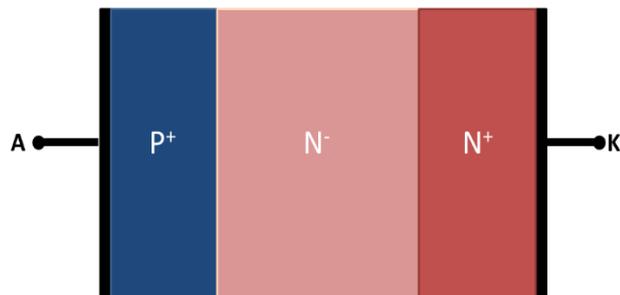


Fig.2.6–Structure de la diode PIN.

Pour étudier la diode PIN, il faut traiter son fonctionnement dans le régime statique et le régime dynamique.

2.6.1 Régime statique

À l'état passant et en raison de son faible dopage, la région de base se retrouve en haut niveau d'injection. La charge stockée est importante et permet une augmentation de la conductivité avec en conséquence une faible chute de tension à l'état passant. La disparition de la charge d'espace se fait par recombinaison et se caractérise électriquement par un courant de recouvrement important qui ralentit à la fois les vitesses de commutation et augmente les pertes dynamiques.

2.6.2 Régime dynamique

Lorsqu'on inverse le sens du courant traversant la diode PIN, un certain temps de recouvrement s'écoule avant que la diode ne retrouve son pouvoir bloquant. Le temps de recouvrement est le temps nécessaire à l'évacuation de la charge précédemment stockée dans la base pendant la phase de conduction. Le mécanisme de recouvrement inverse s'accompagne

d'une dissipation d'énergie puisque la tension inverse apparaît aux bornes du composant alors que le courant circule encore [33].

3.2 Circuit équivalent de la diode PIN

Le schéma équivalent HF de la diode PIN est celui de la Fig. 2.7. En polarisation inverse la résistance de la région intrinsèque $R_i = \infty$ et en polarisation directe la capacité de la jonction C est court-circuitée par une résistance de faible valeur. La résistance R_s est liée aux résistances de contact et de substrat, l'inductance L_s est due au boîtier et aux fils de connexion.

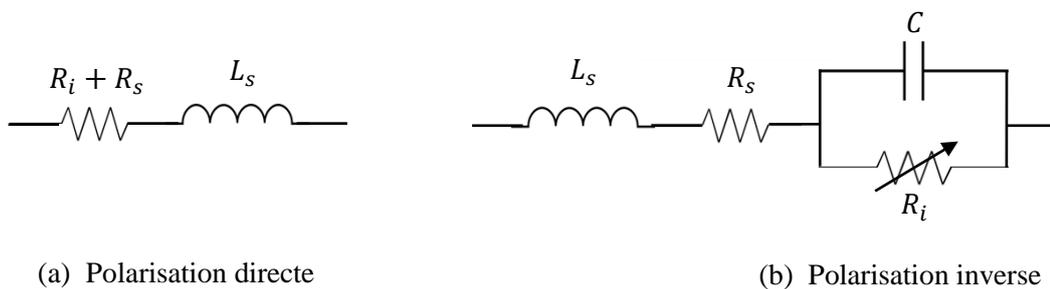


Fig.2.7—Schéma équivalent d'une diode PIN.

Une diode PIN en microondes se comporte, en polarisation directe, comme une résistance de très faible valeur, donc pratiquement comme un court-circuit indépendant de la fréquence. En polarisation inverse, la diode se comporte comme une inductance en série avec un condensateur. En effet, le schéma équivalent peut donc simplifier comme il a été présenté dans la Fig.2.8 :



Fig.2.8—Schéma équivalent d'une diode PIN en microondes.

3.2 Application de la diode PIN

La diode PIN est très utilisée dans les applications de commutation. Elle permet d'obtenir un court-circuit idéal dans l'état ON (polarisation directe) et également un bon circuit ouvert dans l'état OFF (polarisation inverse). Dans les systèmes radars modernes, la diode PIN est largement utilisée pour la fonction de limitations de puissance afin de protéger les chaînes de réceptions. De même, les diodes PIN sont largement utilisées dans les circuits d'atténuation pour le contrôle du niveau et de la phase des signaux hyperfréquences (contrôle automatique de gain (AGC) et de contrôle de puissance) [34].

Redresseurs de puissance en BF. La structure PIN peut tenir des tensions inverses très grandes (10 kV) et la chute de tension en direct est de l'ordre du volt pour des courants de 100 A/cm².

En hyperfréquences, la diode PIN peut être utilisée comme un interrupteur. On utilise deux propriétés de la structure : la capacité de la diode varie peu en fonction de la tension appliquée; la résistance de la diode peut être 10000 fois plus grande en inverse qu'en directe. On insère la structure sur le chemin de propagation de l'onde hyperfréquence, en polarisation inverse le signal passe, en polarisation directe il est réfléchi. Elle est aussi utilisée dans les modulateurs, et les atténuateurs variables. On utilise la variation de la résistance en fonction du courant direct, la structure étant toujours insérée dans le chemin de propagation de l'onde hyperfréquence.

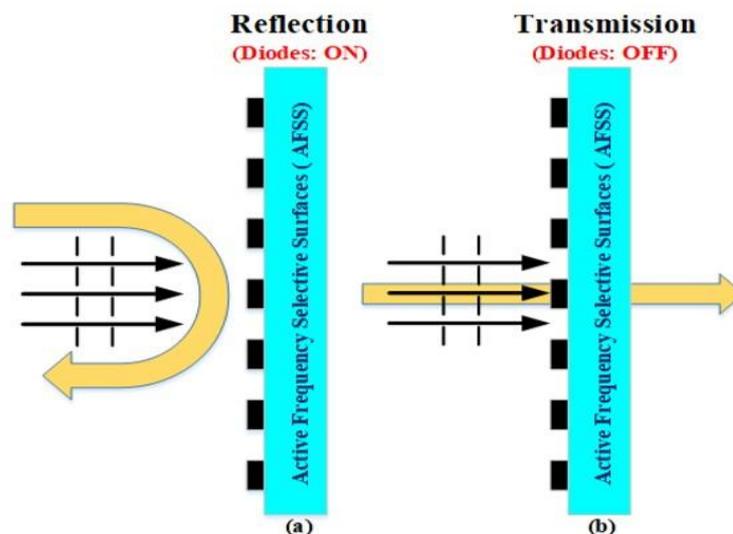
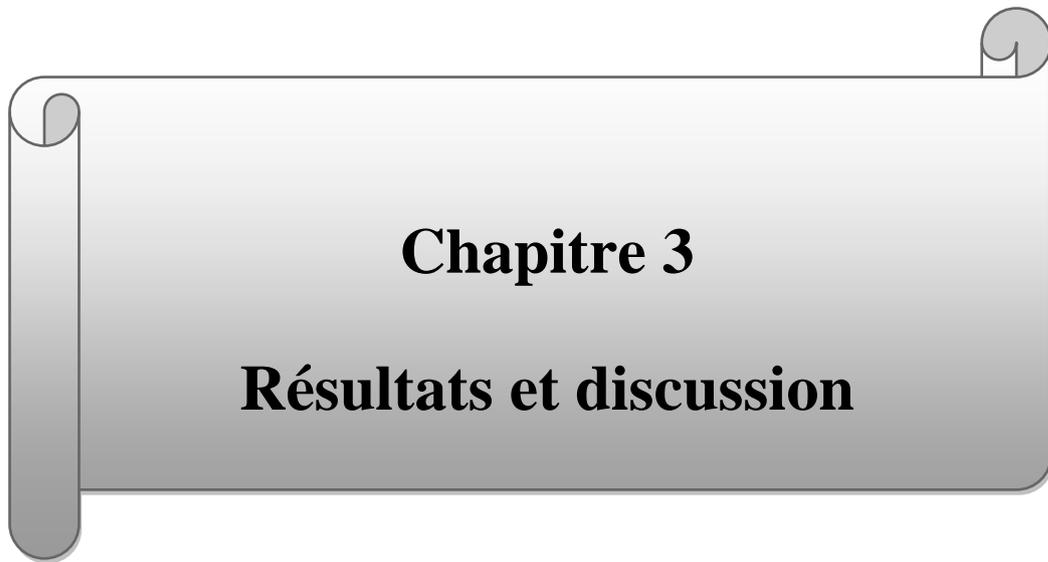


Fig.2.9—Principe de base de l'AFSS dans deux états de diode: (a) réflexion, (b) transmission [1].

Le principe de base d'une surface AFSS est illustré dans la Fig.2.9. La surface peut contrôler la propagation des ondes en modifiant les caractéristiques des composants actifs intégrés dans la surface AFSS. En commutant les états ON/OFF de la diode PIN par polarisation directe et inverse. La surface AFSS interdit donc la réflexion maximale à l'état ON de la diode, tandis que la transmission maximale à l'état OFF.

4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les surfaces sélectives en fréquence (FSS). Ces surfaces se comportent comme des filtres spatiaux dont le but de contrôler la radiation des antennes donc de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques, sans toutefois utiliser des mécanismes très complexes, augmentent en conséquence la complexité des antennes. Les structures FSS ont l'avantage d'être reconfigurable, miniaturisées, à faible cout, et offrent une très bonne efficacité des antennes.



Chapitre 3

Résultats et discussion

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle structure de surfaces sélectives en fréquence, pour être utilisé avec des antennes à radiation omnidirectionnelle. Pour rendre ces surfaces reconfigurables en termes de direction du lobe de rayonnement principal, les diodes PIN sont utilisées. L'antenne finale proposée comprend de multiples surfaces sélectives en fréquence actives (AFSS), disposées en triangle équilatéral à trois panneaux, et une antenne monopole placée au milieu de ce triangle servant à exciter les panneaux AFSS.

En appliquant de multiples combinaisons des diodes PIN (ON/OFF) sur chaque panneau AFSS, la direction du faisceau est réalisée dans diverses directions. L'orientation du faisceau peut diriger dans trois différentes directions. En effet, l'antenne monopole à radiation omnidirectionnelle est convertie à une antenne directionnelle à direction reconfigurable avec un gain plus élevé. Ce type d'antenne est très recommandé dans les systèmes de communication sans fil grâce à ses avantages par rapport à d'autres types d'antennes.

3.2 Conception de l'antenne monopole

La Figure 3.1 présente la structure de l'antenne monopole conçue. L'antenne est constituée d'un patch rectangulaire alimenté par une ligne micro-ruban et déposé sur un substrat diélectrique de type Rogers RO-3006, de permittivité $\epsilon_r = 6.5$ et de tangente de pertes de 0.002. Les différentes dimensions de l'antenne sont résumées dans le tableau 3.1 ci-dessous.

Table 3.1–Différentes dimensions de l'antenne monopole.

Paramètre	L_s						
Valeur (mm)	18	10	13.15	3	1.4	3.5	1.27

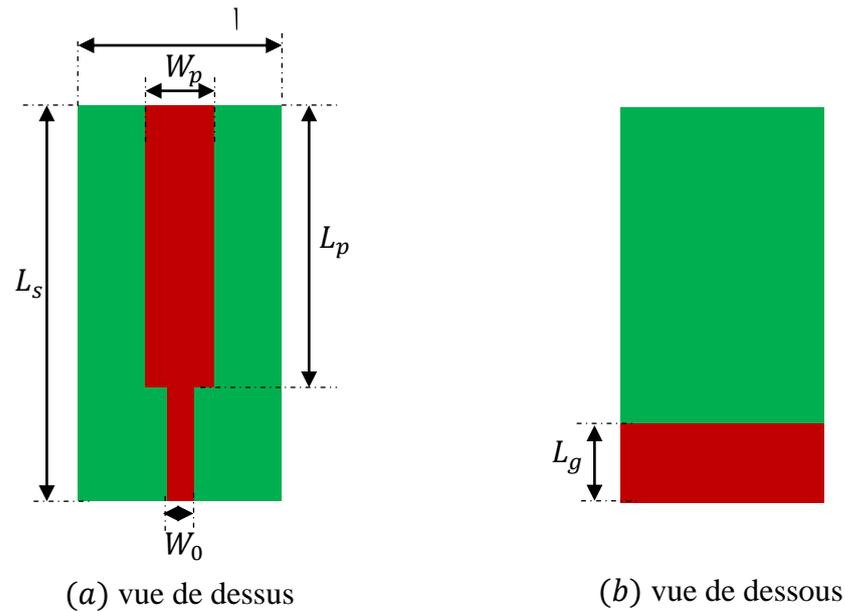


Fig.3.1–Structure de l’antenne monopole proposée, (a) vue de dessus et (b) vue de dessous.

3.2.1 Coefficient de réflexion

La Figure 3.2 représente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence et comprenant également une comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature [1]. On remarque que notre coefficient de réflexion est très proche des mesures dans [1] et la deuxième résonance des mesures peut être dû à l’effet du connecteur SMA. En plus, on ne peut pas la considérée comme un deuxième mode, puisque il ne présente pas le double de la résonance à 5 GHz. En effet, on conclure que nos résultats du coefficient de réflexion de l’antenne monopole sont en très bon accord avec les mesures de l’auteur [1] qui présente un coefficient de réflexion simulé très décalé par rapport à ses résultats mesurés.

La valeur minimale du s_{11} égale à -28.73 dB à la fréquence de 5 GHz. Cette valeur aussi est très proche de la valeur minimale mesuré qui égale à 23 dB.

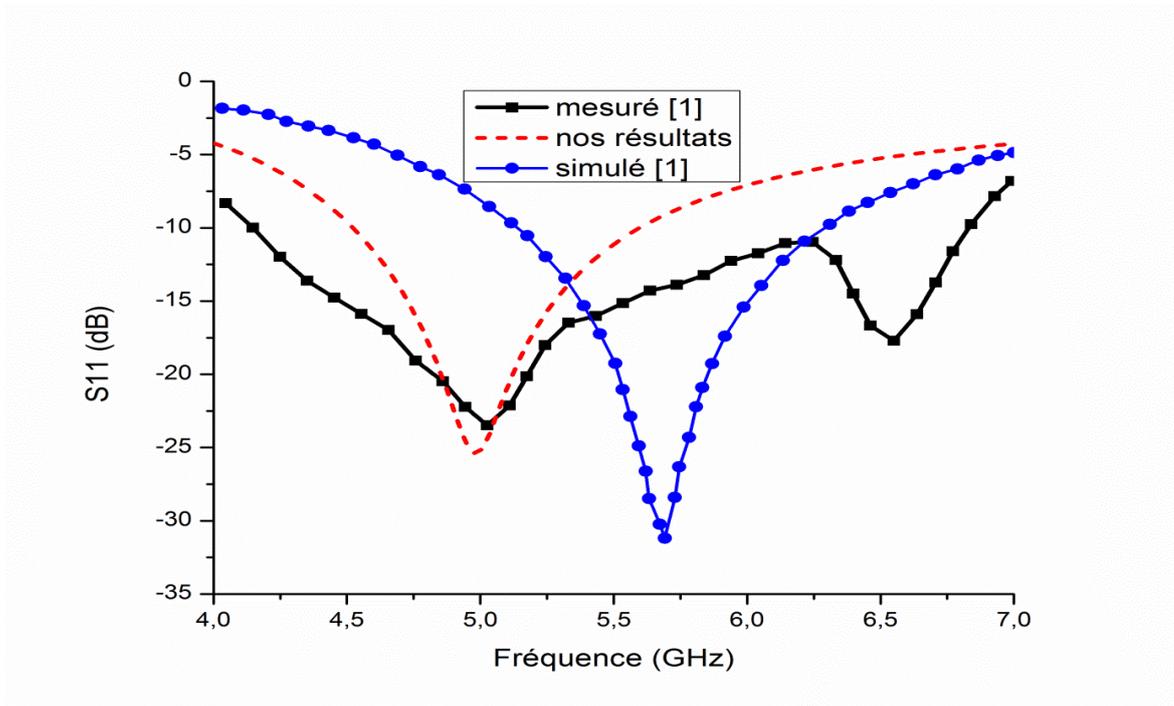


Fig.3.2—Coefficient de réflexion s_{11} en (dB) en fonction de la fréquence en (GHz) de l'antenne monopole.

La largeur de bande passante de l'antenne monopole à partir de la Fig.3.2 est :

La bande passante relative par rapport à la fréquence centrale 5 GHz, est donc :

3.2.2 Diagramme de rayonnement

Dans les Figs. 3.3 et 3.4, nous avons présenté les diagrammes de rayonnement en 3D et en coordonnées polaires dans chacun des plans E et H, à la fréquence de résonance de 5 GHz.

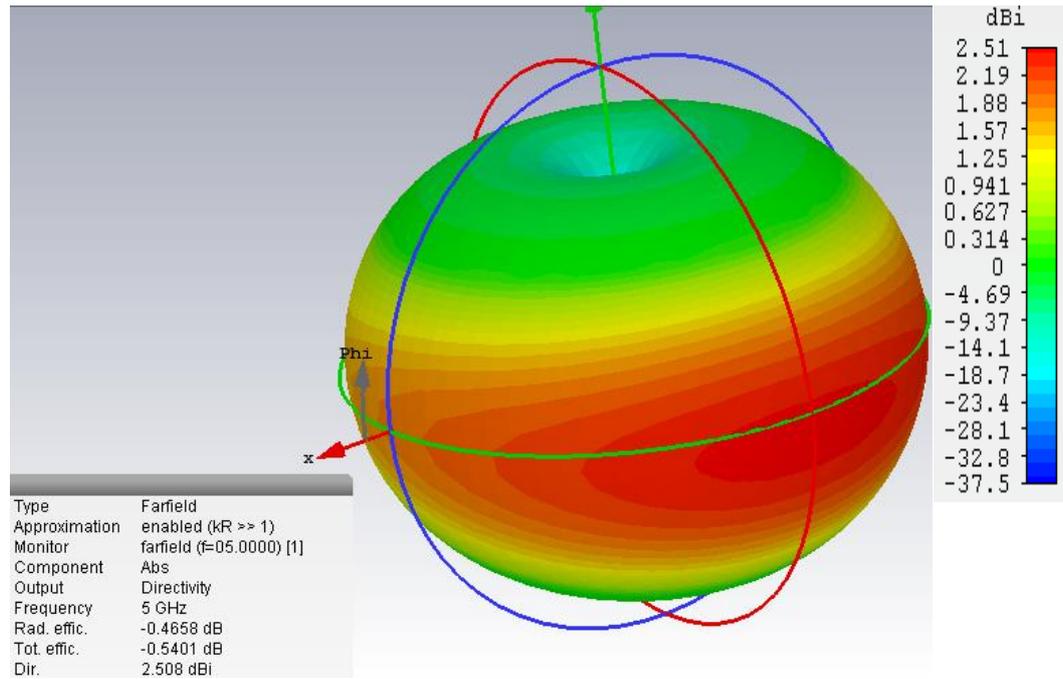


Fig.3.3–Diagramme de rayonnement en 3D à 5 GHz de l’antenne monopole.

La Figure 3.4 représente les diagrammes de rayonnement de l’antenne monopole conventionnelle dans deux plans à la fréquence de 5 GHz. Il est bien présenté que le rayonnement est omnidirectionnel.

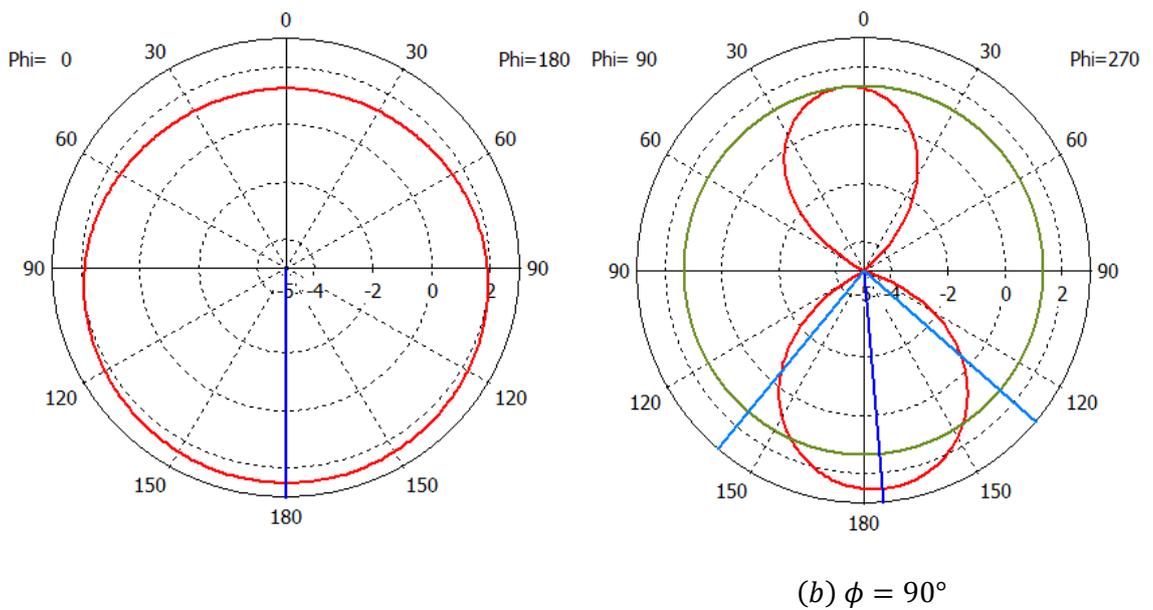


Fig.3.4–Diagrammes de rayonnement polaires de l’antenne monopole à 5 GHz. (a) plan E, (b) plan H.

3.2.3 Gain

Nous allons maintenant intéresser par l'évolution du gain en fonction de la fréquence de l'antenne monopole. On remarque que le gain croît avec la fréquence dans la Fig. 3.5, qu'est très correcte et très logique. Dans la Fig.3.5, le gain atteint une valeur maximale proche de 2.2 dB dans la bande de l'antenne énoncée.

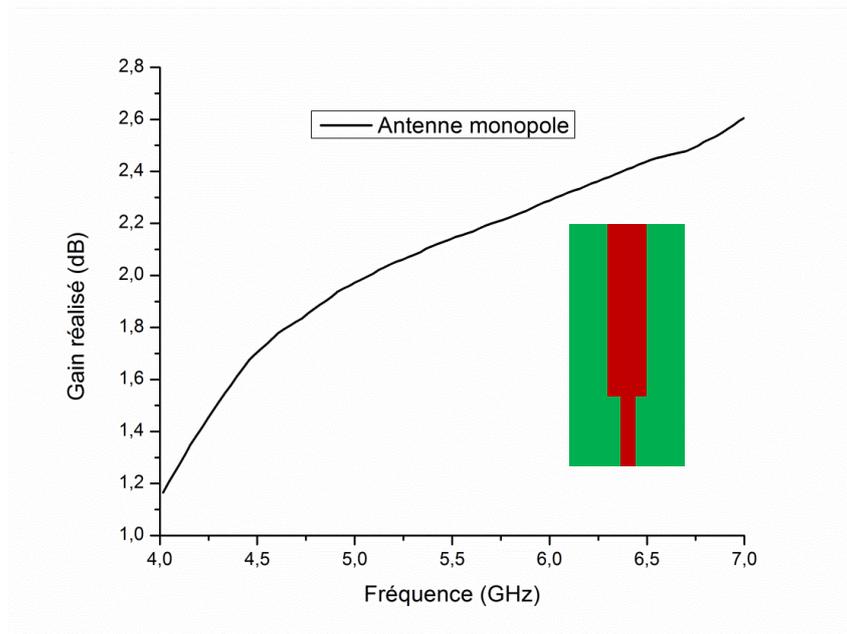


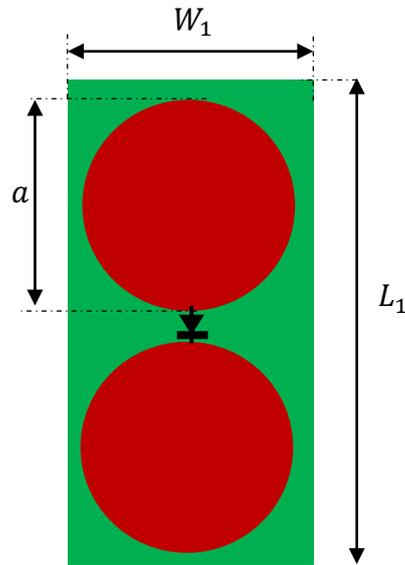
Fig.3.5—Gain de l'antenne monopole en fonction de la fréquence.

3.3 Conception de la surface sélective en fréquence (FSS)

La cellule unitaire de la surface sélective en fréquence (FSS) est constituée de deux patches circulaires, déposés sur un substrat diélectrique de type Rogers RO-3010, de permittivité relative $\epsilon_r = 10.2$ et de tangente de pertes de 0.0022. Les différentes dimensions de cette cellule sont mentionnées dans le tableau 3.2. Une diode PIN, modèle GMP4202-GM1, est placée entre les deux patches circulaires pour faire commuter la surface entre deux modes : mode transparent et mode réfléchissant. La diode PIN énoncée est modélisée, aux hautes fréquences, comme un circuit RLC série. Une petite résistance $R_s = 1.8$ ohms ($C_p = 0, L_p = 0$) représente la polarisation directe de la diode (état ON), tandis qu'une capacité $C_p = 0.09$ pF en série avec une inductance $L_p = 0.5$ nH ($R_s = 0$) présentent l'état OFF de la diode [1]–[3], [5], [35].

Table 3.2–Différentes dimensions de la cellule unitaire FSS proposée.

Paramètre				
Valeur (mm)	24	11	8	0.508

**Fig.3.6**–Structure de la cellule unitaire AFSS proposée.

Nous allons utiliser trois panneaux AFSS, déposés en triangle équilatéral (Figs.3.9 et 3.10). Chaque panneau AFSS proposé se compose de deux cellules unitaires comme le montre la Fig.3.6. Chaque cellule élémentaire subit soit à la transmission, soit à la réflexion des ondes entrantes selon les états de polarisation des diodes PIN (ON/OFF). Les patches circulaires sont connectés/séparés électriquement l'un de l'autre par la diode PIN.

Paramètres S de la cellule unitaire active (AFSS)

- **Paramètres S à l'état ON de la diode PIN**

A l'état ON de la diode PIN, la cellule unitaire active se comporte comme une surface réfléchissante. Il est bien évident de la Fig.3.7 que la réflexion s_{11} est très élevée à environ 0 dB au voisinage de la fréquence 5 GHz, tandis que la transmission s_{21} est très faible à environ -35 dB à la fréquence de 5 GHz.

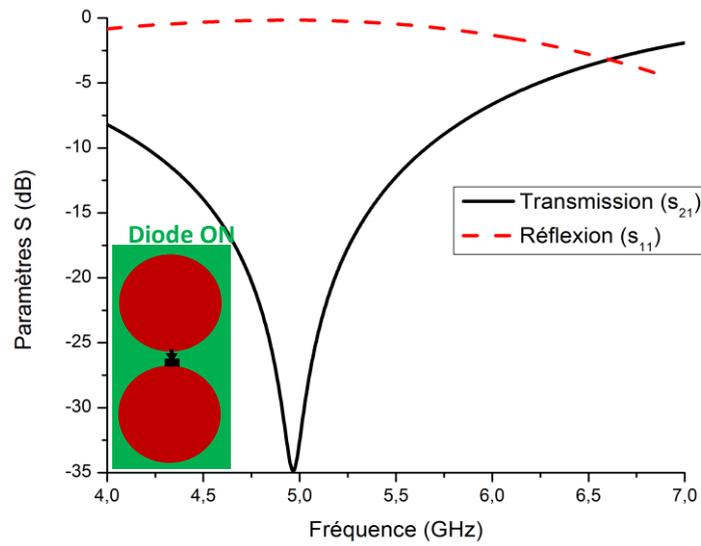


Fig.3.7– Paramètres S en dB en fonction de la fréquence en GHz à l'état ON de la diode PIN.

- Paramètres S à l'état OFF de la diode PIN

A l'état OFF de la diode, la cellule unitaire active se comporte comme une surface transparente, comme il a été montré dans la Fig.3.8. A partir des courbes tracées dans la Fig.3.8, la transmission s_{21} est très élevée, tandis que la réflexion s_{11} est très faible.

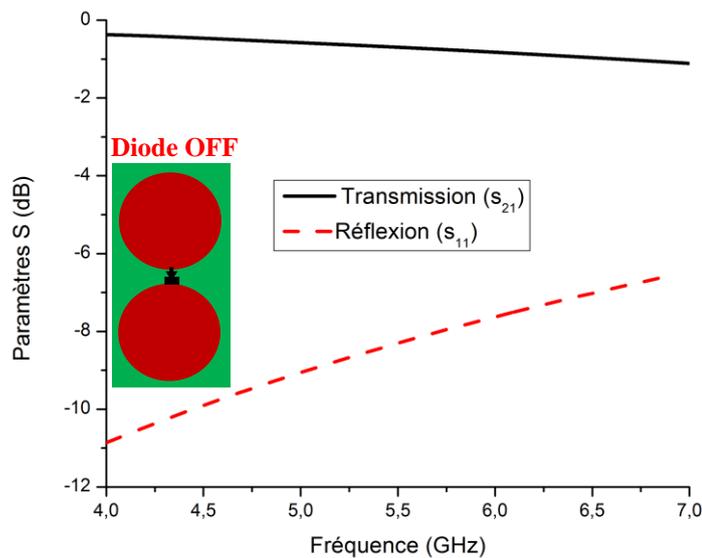


Fig.3.8– Paramètres S en dB en fonction de la fréquence en GHz à l'état OFF de la diode PIN.

3.4 Conception de l'antenne globale reconfigurable

L'objectif dans cette partie est de concevoir une antenne directionnelle à direction de rayonnement reconfigurable à partir d'une antenne à rayonnement omnidirectionnel avec un gain plus élevé.

Le mécanisme opérationnel de l'antenne proposée est basé sur la conversion du diagramme de rayonnement omnidirectionnel de la source en un diagramme directionnel en utilisant une nouvelle surface AFSS. Lorsque les diodes du panneau AFSS sont à l'état OFF, le panneau AFSS se comporte comme une surface émettrice, tandis qu'à l'état ON, il s'agit comme une surface réfléchissante (Fig.3.11). Les panneaux AFSS sont disposés dans un triangle équilatéral pour commuter le faisceau dans plusieurs directions en utilisant différentes combinaisons des diodes, ceci est bien illustré dans les Figs.3.9 et 3.10.

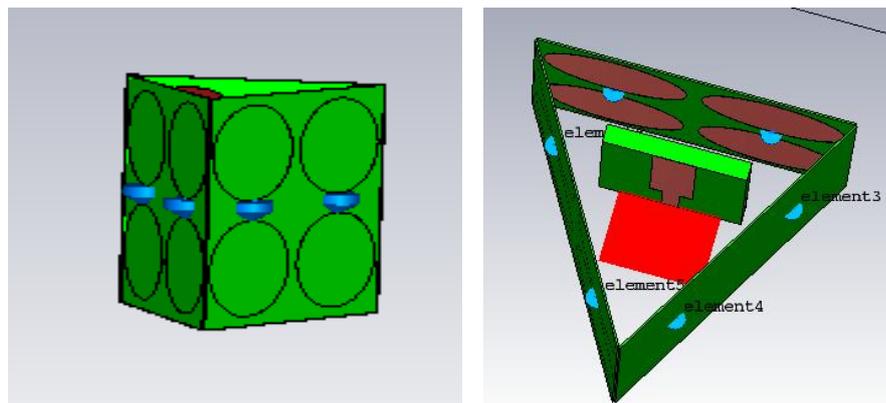


Fig.3.9–Géométrie de l'antenne finale proposée en 3D.

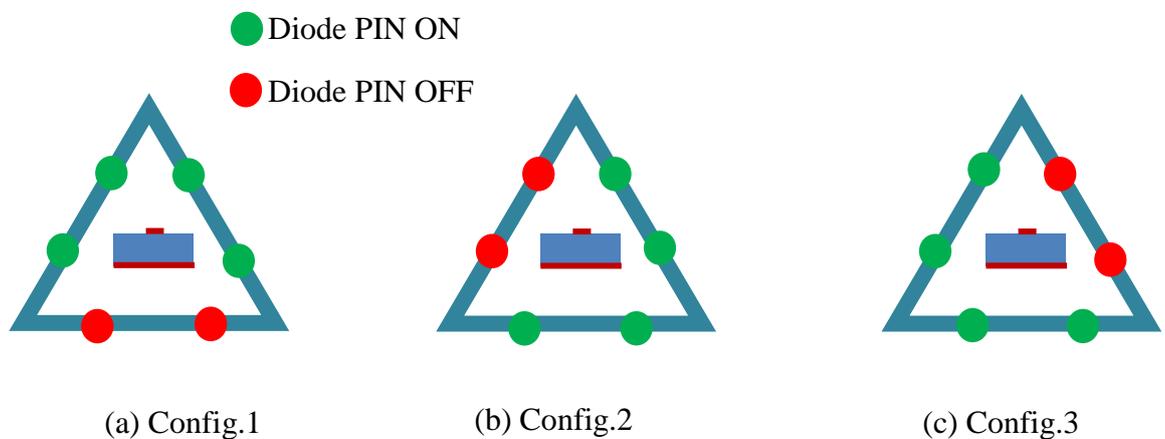


Fig.3.10–Différentes combinaisons des diodes PIN de l'antenne globale proposée.

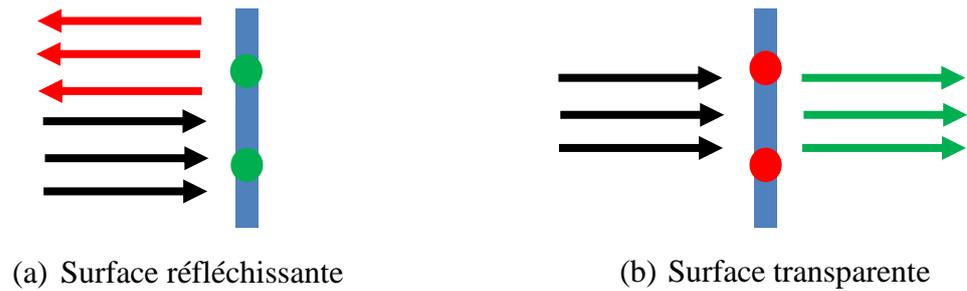


Fig.3.11—Comportement du panneau AFSS pour les deux états de la diode PIN.

3.4.1 Coefficient de réflexion

La figure 3.12 montre le coefficient de réflexion s_{11} en (dB) des trois configurations en fonction de la fréquence en (GHz) pour différentes combinaisons des diodes PIN. La variation de s_{11} en fonction de la fréquence est montrée que la structure globale proposée garde presque la même bande de l'antenne monopole initialement proposée.

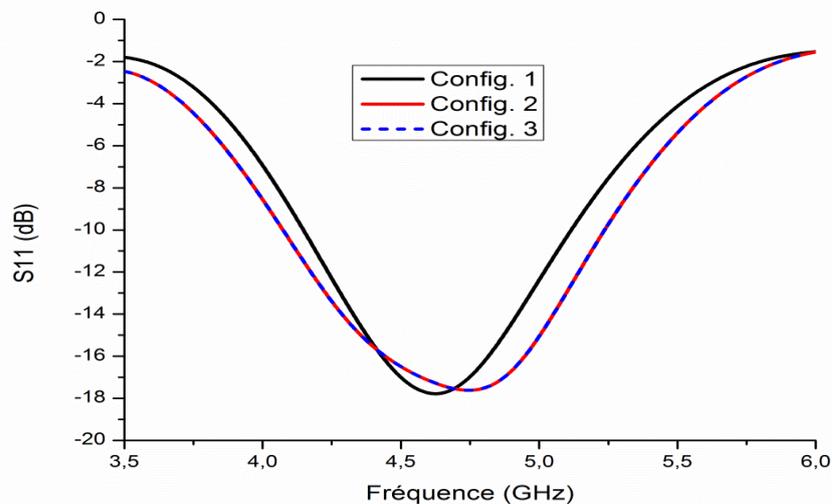
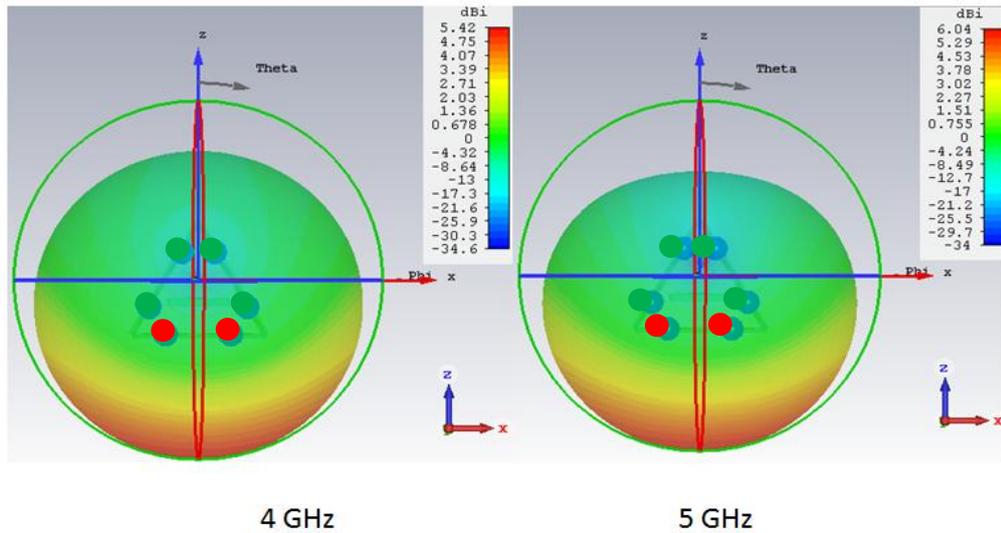


Fig.3.12—Coefficient de réflexion s_{11} en (dB) des trois combinaisons en fonction de la fréquence en (GHz).

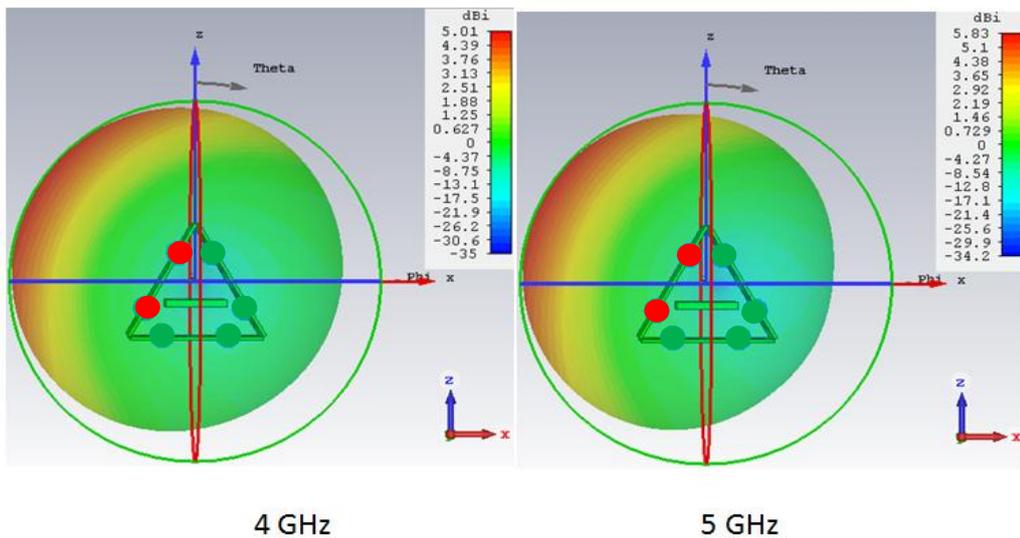
On remarque que les valeurs de fréquences de résonance sont très proches les unes des autres. Pour la deuxième et la troisième configuration (Config.2 et Config.3), on trouve exactement la même bande de 4 à 5.25 GHz, à cause de la symétrie de la structure. Tandis que, pour la première configuration (Config.1), la bande est légèrement étroite par rapport aux deux autres configurations.

3.4.2. Diagramme de rayonnement

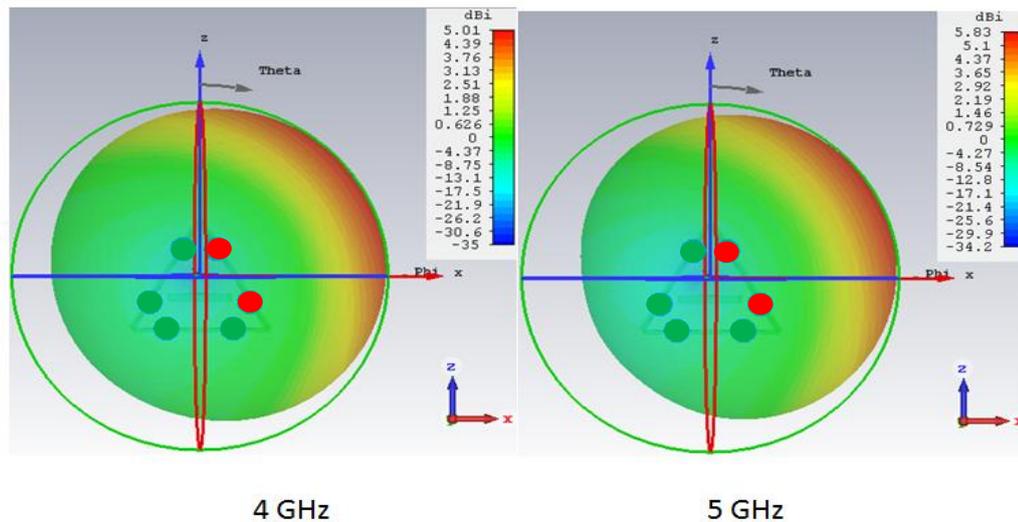
Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans différentes directions de l'espace et indique les directions privilégiées, dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale.



(a) Config.1



(b) Config.2



(c) Config.3

Fig.3.13–Diagrammes de rayonnement en 3D correspondent aux trois combinaisons.

La Figure 3.13 présente les diagrammes de rayonnement simulés en 3D aux fréquences 4 GHz et 5 GHz pour trois combinaisons des diodes PIN. Il est bien évident que l'antenne fait contrôler le rayonnement dans différentes directions à travers les diodes PIN.

À travers la Fig.3.13, nous remarquons que le diagramme de rayonnement est directionnel et la direction, avec laquelle l'antenne rayonne, est déterminée par les combinaisons des diodes des panneaux AFSS. La première configuration (Config.1) est radiée dans la direction des z négatifs à $\theta = 180^\circ$; la deuxième (Config.2) est rayonnée dans la direction de $\theta = 300^\circ$; et la dernière configuration (Config.3) est dans la direction de $\theta = 60^\circ$. Les diodes vertes, dans la Fig.3.13, sont dans l'état ON, tandis que les rouges sont dans l'état OFF. Tous les angles du triangle sont égaux (120°). On remarque que les configurations 2 et 3 ayant les mêmes directivités de 5.01 dBi à 4 GHz et de 5.83 dBi à 5 GHz, dans les directions $\theta = 60^\circ$ et $\theta = 300^\circ$. Ceci est très logique à cause de la symétrie de la structure dans les deux directions énoncées. Pour la première configuration la directivité est de 5.42 dBi à 4 GHz et de 6.04 dBi à 5 GHz.

3.4.3 Gain en représentation cartésienne

La Figure 3.14 représente le gain des trois Combinaisons en (dB) en fonction de la fréquence en (GHz). En comparant les trois courbes, avec l'antenne monopole, nous notons bien que le gain est amélioré de 2.2 à presque 5.73 dB sur toute la bande opérationnelle de l'antenne.

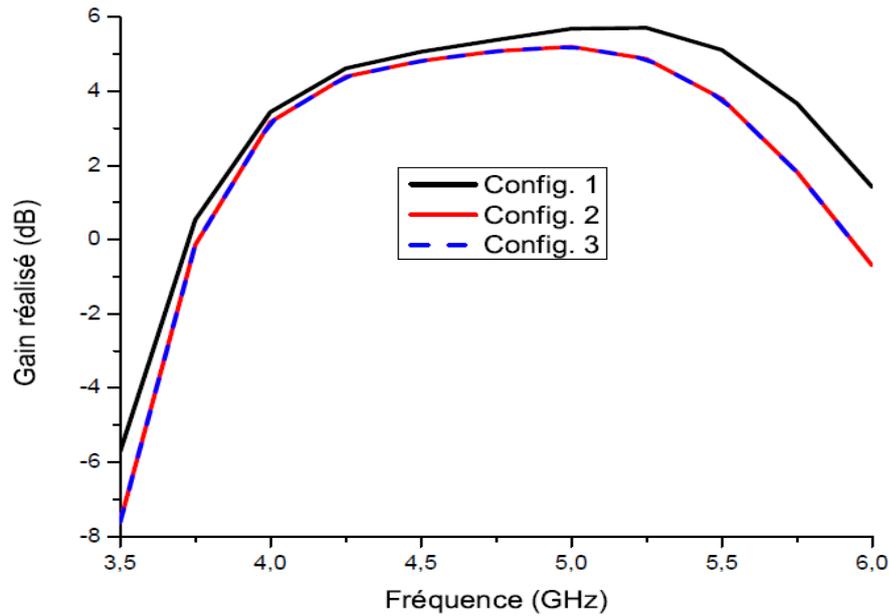
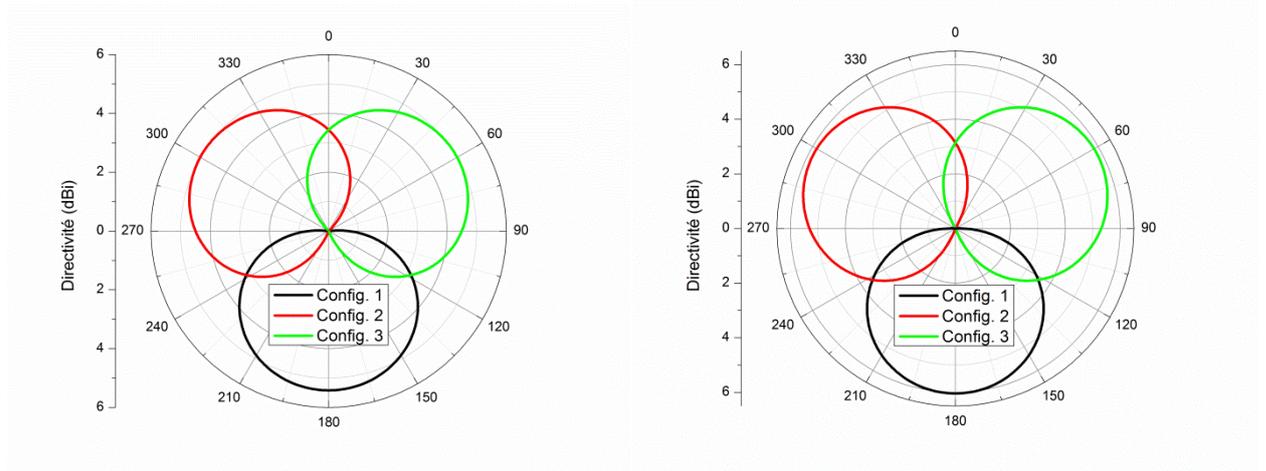


Fig.3.14—Gain réalisé en dB en fonction de la fréquence en GHz des trois configurations.

En effet, l'antenne finale proposée est capable à focaliser l'énergie dans une direction reconfigurable et augmente en conséquence le gain de l'antenne. À travers la Fig.3.14, on remarque que les configurations 2 et 3 ayant les mêmes gains réalisés avec une valeur maximale de 5.2 dBi à 5 GHz dans les directions $\theta = 60^\circ$ et $\theta = 300^\circ$. Ceci est dû à la symétrie de la structure. Pour la première configuration une valeur crête de 5.71 dBi est remarquée à la fréquence de 5 GHz dans la direction $\theta = 180^\circ$.

3.4.4 Directivité en représentation polaire

D'après les résultats obtenus dans la Fig.3.15, on note que lorsque les diodes du côté des z négatifs sont OFF (Config.1), le faisceau est dirigé vers la direction $\theta = 180^\circ$ et lorsque les diodes du côté des x négatifs sont OFF (Config.2), le faisceau est dirigé vers l'angle $\theta = 300^\circ$ et lorsque les diodes du côté des x positifs sont OFF (Config.3), le faisceau est dirigé vers $\theta = 60^\circ$ respectivement aux fréquences 4 et 5 GHz dans les Figs.3.15 (a) et 3.15 (b).



(a) 4 GHz

(b) 5 GHz

Fig.3.15–Directivité en (dBi) pour différentes combinaisons des diodes.

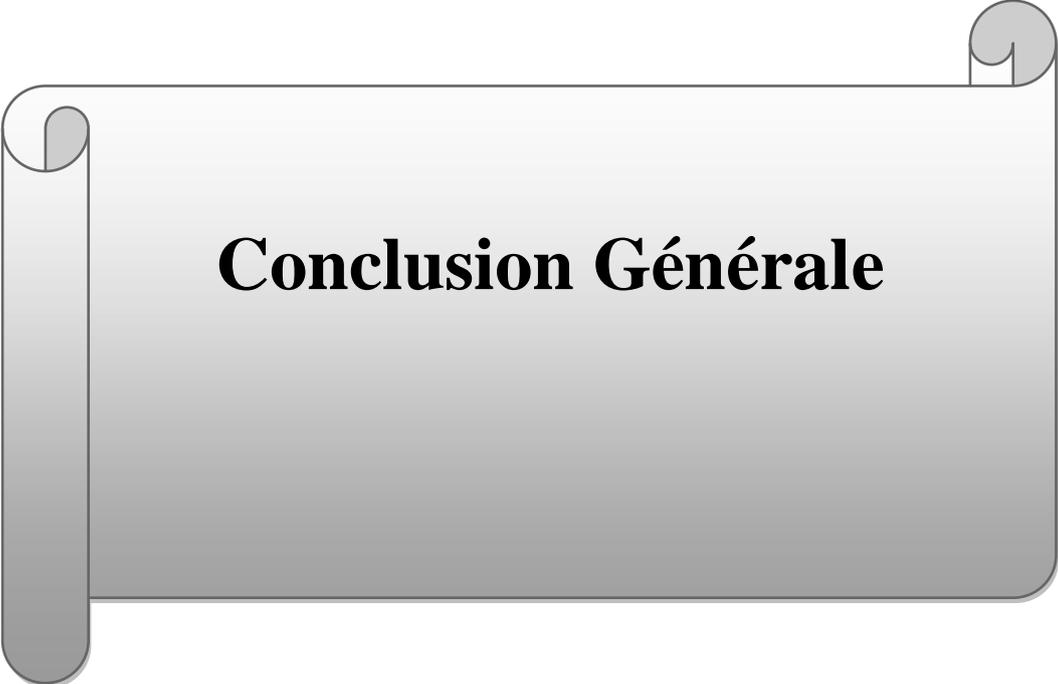
Pour valider nos résultats, nous avons comparé les performances de notre antenne avec des résultats mesurés disponible dans la littérature. Nous avons trouvé que ces résultats sont en très bonne concordance, ce qui valide bien la crédibilité de nos résultats dans ce travail. D’après la table 3.3, les résultats mesurés de l’auteur [1] sont très comparables avec nos résultats, mais la taille de notre antenne proposée à base de surfaces AFSS à patches circulaires nous donne des performances comparables avec une taille plus compacte et plus petite par rapport à la fréquence limite inférieure de chaque antenne. En effet, on peut dire qu’on a réalisé une miniaturisation par rapport à au travail [1] toute en gardant les mêmes autres performances.

Table 3.3–Comparaison de l’antenne proposée avec la littérature.

Combinaison	Gain (dBi)	Taille
Combinaison 1, mesuré [1]	5.437	
Combinaison 1 (nos résultats)	5.201	
Combinaison 2, mesuré [1]	5.394	
Combinaison 2 (nos résultats)	5.201	
Combinaison 3, mesuré [1]	5.816	
Combinaison 3 (nos résultats)	5.710	
Antenne monopole [1]	2.236	(
Antenne monopole (nos résultats)	2.201	(

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons conçu en premier lieu, une antenne monopole en utilisant le logiciel de simulation CST Microwave Studio qui nous a permis de présenter les différentes performances de l'antenne sous formes de courbes. Par la suite, nous avons conçu une nouvelle antenne à faisceau reconfigurable. L'antenne se compose de deux parties: trois panneaux FSS chargés de diodes PIN et disposés en triangle équilatéral et une source d'alimentation qu'est l'antenne monopole à rayonnement omnidirectionnel placée au centre de la structure. En appliquant de multiples combinaisons de diodes (ON et OFF) sur chaque panneau AFSS, le faisceau omnidirectionnel a été converti en un faisceau directionnel, peut s'orienter dans diverses directions. En outre, le gain réalisé de l'antenne a été amélioré de 2.2 à 5.71 dB, sur une bande de fréquences centrée sur 5 GHz, avec une capacité d'orienter le faisceau de l'antenne dans divers directions ($\theta = 180^\circ$, $\theta = 300^\circ$, $\theta = 60^\circ$). Cette antenne peut être considérée le bon choix dans plusieurs applications, entre autre les applications WI-FI et bien d'autres, vu ses divers avantages par rapport aux antennes directionnelles conventionnelles.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion générale

La technologie de communication sans fil est très intéressée par le développement de l'antenne patch. Nombreux appareils utilisent cette antenne en raison de ses nombreux avantages par rapport aux autres types d'antennes. Les chercheurs tentent constamment d'améliorer ses caractéristiques pour répondre aux exigences futures multiples imposés par le marché.

L'objectif de ce travail était de concevoir une nouvelle antenne à faisceau reconfigurable, à base d'une surface sélective en fréquence circulaire active (AFSS). Premièrement, nous avons conçu une antenne monopole planaire. Cette antenne permettant d'émettre ou de recevoir dans la bande de fréquence de 4 à 5 GHz, pour l'exploiter par la suite dans la conception d'une antenne qui regroupe l'ensemble que ce soit l'antenne monopole ou les surfaces sélectives en fréquences actives (AFSS).

Dans le premier, nous avons présenté une définition générale des antennes, plus particulièrement les antennes patches, nous avons présenté également leur configuration de base, leurs caractéristiques, leurs techniques d'alimentation, leurs mécanismes de rayonnement, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Ensuite, nous avons cité leurs principaux domaines d'application. Enfin, nous avons présenté les caractéristiques d'une antenne monopole à radiation omnidirectionnelle, pour l'exploiter par la suite avec des surfaces sélectives en fréquences.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté, les surfaces sélectives en fréquences (FSS), leurs différents types et ainsi que leur classification. Ensuite, nous avons parlé les principales applications des surfaces FSS qui justifient leur intérêt dans le domaine des micro-ondes et également dans d'autres domaines. Parfois, l'utilisation des composants actifs, telle que la diode PIN, dans la conception des surfaces FSS fait amélioré encore leurs caractéristiques, et les rendre reconfigurables. En effet, le principe de fonctionnement de la diode PIN, ses circuits équivalents et ses applications ont été bien présentés.

Dans le troisième chapitre, une nouvelle antenne à faisceau reconfigurable, à base d'une surface sélective en fréquence circulaire active (AFSS) a été conçue. En premier lieu, nous avons commencé par concevoir une antenne monopole planaire en utilisant le logiciel de simulation CST Microwave Studio, basé sur la technique d'intégration finie. Par la suite, nous avons conçu une nouvelle surface sélective en fréquence active (AFSS) à patches circulaires connectés entre eux par des diodes PIN. Ces panneaux AFSS chargés de diodes PIN et disposés en triangle équilatéral autour de la source d'alimentation qu'est l'antenne monopole à rayonnement

Conclusion Générale

omnidirectionnel. En appliquant de multiples combinaisons de diodes (ON/OFF) sur chaque panneau AFSS, le faisceau omnidirectionnel a été converti en un faisceau directionnel, peut s'orienter dans diverses directions. En outre, le gain réalisé de l'antenne a été amélioré de 2.2 à 5.71 dB, sur une bande de fréquences centrée sur 5 GHz, avec une capacité d'orienter le faisceau de l'antenne dans divers directions: $\theta = 180^\circ$, $\theta = 300^\circ$ et $\theta = 60^\circ$. Cette antenne peut être considérée le meilleur candidat dans plusieurs applications, entre autre les applications WI-FI et bien d'autres, vu ses divers avantages par rapport aux antennes directionnelles conventionnelles.

Bibliographie

- [1] G. H. Elzwawi, H. H. Elzwawi, M. M. Tahseen, and T. A. Denidni, "Frequency Selective Surface-Based Switched-Beamforming Antenna," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 48042–48050, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2850808.
- [2] Bin Liang, B. Sanz-Izquierdo, E. A. Parker, and J. C. Batchelor, "Cylindrical Slot FSS Configuration for Beam-Switching Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 1, pp. 166–173, Jan. 2015, doi: 10.1109/TAP.2014.2367534.
- [3] A. Edalati and T. A. Denidni, "Frequency Selective Surfaces for Beam-Switching Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 1, pp. 195–200, Jan. 2013, doi: 10.1109/TAP.2012.2219842.
- [4] M. Chryssomallis, "Smart antennas," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 42, no. 3, pp. 129–136, Jun. 2000, doi: 10.1109/74.848965.
- [5] M.-I. Lai, T.-Y. Wu, J.-C. Hsieh, C.-H. Wang, and S.-K. Jeng, "Compact Switched-Beam Antenna Employing a Four-Element Slot Antenna Array for Digital Home Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 9, pp. 2929–2936, Sep. 2008, doi: 10.1109/TAP.2008.928775.
- [6] A. Alexiou and M. Haardt, "Smart antenna technologies for future wireless systems: trends and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 9, pp. 90–97, Sep. 2004, doi: 10.1109/MCOM.2004.1336725.
- [7] G. Cerri, R. De Leo, V. M. Primiani, C. Monteverde, and P. Russo, "Design and Prototyping of a Switching Beam Disc Antenna for Wideband Communications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 12, pp. 3721–3726, Dec. 2006, doi: 10.1109/TAP.2006.886555.
- [8] B. A. Munk, *FREQUENCY SELECTIVE SURFACES Theory and Design*. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [9] R. Mittra, C. H. Chan, and T. Cwik, "Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review," *Proc. IEEE*, vol. 76, no. 12, pp. 1593–1615, Dec. 1988, doi: 10.1109/5.16352.
- [10] H. Boutayeb, A.-C. Tarot, and K. Mahdjoubi, "FOCUSING CHARACTERISTICS OF A METALLIC CYLINDRICAL ELECTROMAGNETIC BAND GAP STRUCTURE WITH DEFECTS," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 66, pp. 89–103, Nov. 2006, doi: 10.2528/PIER06100504.

- [11] H. Boutayeb, T. A. Denidni, K. Mahdjoubi, A.-C. Tarot, A.-R. Sebak, and L. Talbi, "Analysis and Design of a Cylindrical EBG-Based Directive Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 1, pp. 211–219, Jan. 2006, doi: 10.1109/TAP.2005.861560.
- [12] M. N. Jazi and T. A. Denidni, "Frequency Selective Surfaces and Their Applications for Nimble-Radiation Pattern Antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 7, pp. 2227–2237, Jul. 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2048877.
- [13] A. Edalati and T. A. Denidni, "High-Gain Reconfigurable Sectoral Antenna Using an Active Cylindrical FSS Structure," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 7, pp. 2464–2472, Jul. 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2152327.
- [14] M. Niroo-Jazi and T. A. Denidni, "Electronically Sweeping-Beam Antenna Using a New Cylindrical Frequency-Selective Surface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 2, pp. 666–676, Feb. 2013, doi: 10.1109/TAP.2012.2223440.
- [15] G. Kumar and K. P. Ray, "Broadband microstrip antennas," Artech House Boston. London, 2003.
- [16] V. Planisamy and R. Garg, "Analysis of arbitrarily shaped microstrip patch antennas using segmentation technique and cavity model," *IEEE Transactions on Antennas and Propagations*, Vol. AP-34, N°. 10, Octobre 1986.
- [17] C.A. Balanis «Analysis Design, Third Edition» John Wiley & Sons, Inc. page 811,2015.
- [18] I. Germain, U. Emmanuel, "Etude et Conception d'une antenne patch Rectangulaire pour les Réseaux Personnels Sans fils _WPAN à 60 GHz", Mémoire de MASTER, Houari Boumediene, Algérie, Juin 2011.
- [19] CH.LEILA, " Contribution à l'étude d'antennes imprimées rectangulaires double bande et multibandes tenant compte de l'effet de couplage ", Mémoire de Magister, 2009.
- [20] Baudrand, H. and R. S. N'Gongo, —Application of wave concept iterative procedure in planar circuits,| Special Issue on Recent Research Developments in Microwave Theory and Techniques, Vol. 1, 187–197, Trans world Research Network, January 1999.
- [21] S. Wane, H. Baudrand , «A new full-wave hybrid differential-integral approach for the investigation of multiplayer structures including non-uniformly doped diffusion| », *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, n°1, pp. 200-213, January 2005.
- [22] Méjri Fathi « Modélisation électromagnétique des structure active planaires par une méthode itérative avec une source auxiliaire localisée ». Thèse de doctorat, février 2006.

- [23] J. Q. Howell, —Microstrip Antennas, in Dig. Int. Symp. Antennas Propogat. Soc., Williamsburg, VA, Dec. 1972, pp. 177-180.
- [24] M. Ayari, T. Aguilí and H. Baudrand —An EM Simulation Software Based on Transverse Wave Approach (TWA) for EM Field Modeling of Planar Structures. IJCSS, Vol.1, No.1, 2009 ISSN: 1803-8336 © USAR Publications.
- [25] K.A. Carver and J.A. Mink, "Microstrip antenna technology," *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, Vol. 29, January 1981.
- [26] Fayçal REJIBA « Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques en milieux hétérogènes- Application au Radar Sol- ». Thèse de doctorat PARIS VI 2002.
- [27] <http://www.infcom.rnu.tn/content/pdf/cours/aline-saidane/chapitre2-antennes-2dni.pdf>
- [28] Mohamad HAJJ, "Conception, réalisation et caractérisation de nouveaux types d'antennes sectorielles à base de matériaux BIE métalliques pour télécommunications terrestres ", Thèse doctorat de l'université de Limoges, Octobre 2009.
- [29] Euloge Budet Tchikaya, "Modélisation électromagnétique des Surfaces Sélectives en Fréquence finies uniformes et non-uniformes par la Technique par Changements d'Echelle (SCT) ", Thèse doctorat l'université Toulouse III-INP Toulouse, Octobre 2010.
- [30] Farhad Bayatpur, "Metamaterial-Inspired Frequency-Sélective Surfaces ", Thèse doctorat de l'université Michigan, 2009.
- [31] Mahmoud Niroo-Jazi, Nimble Radiation-Pattern Antennas Using Agile Frequency Selective Surfaces, Thesis, 2012.
- [32] T. K. Wu, Frequency Selective Surface and Grid Array, John Wiley and Sons, 1995.
- [33] K. Joseph, "Développement et implantation d'un modèle de diode par VHDL-AMS. Discrétisation selon la méthode Scharfetter-Gummel", Mémoire de doctorat, L'Université Libanaise, INSA de LYON, Le 11 Septembre 2015, page 80 et 82
- [34] CH. Amel, "Etude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN", Mémoire de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF, M'SILA , 2018.
- [35] J. Li, T. A. Denidni, and Q. Zeng, "Beam switching antenna based on active frequency selective surfaces," in 2015 IEEE MTT-S International Conference on Numerical

Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Aug. 2015, pp. 1–3,
doi: 10.1109/NEMO.2015.7415099.

Résumé—Une nouvelle antenne à faisceau reconfigurable à base des surfaces sélectives en fréquence actives (AFSS) est présentée. L'antenne se compose d'une antenne monopole à rayonnement omnidirectionnel et une nouvelle surface sélective en fréquence active entourant l'antenne monopole. La cellule unitaire de la structure contient deux patchs circulaires reliés entre eux par une diode PIN haute fréquence. Les éléments du panneau AFSS sont conçus à l'aide du logiciel de simulation CST Microwave studio. Les diodes PIN sont appliquées pour réaliser une commutation de faisceau. La commutation entre les états ON et OFF des diodes sur les panneaux AFSS offre des caractéristiques de réflexion et de transmission dans la bande WIFI 5 GHz. Les panneaux AFSS sont placés dans une structure triangulaire avec différentes combinaisons des diodes, la commutation du faisceau est obtenue dans trois directions qui sont : $\theta = 180^\circ$, 300° et 60° . En plus, le gain est amélioré de 2.2 dBi à 5.71 dBi, dans une configuration plus compacte par rapport à la littérature.

Mots clés—Surface sélective en fréquence active (AFSS), diagramme de rayonnement directionnel, diagramme de rayonnement omnidirectionnel, antenne à faisceaux reconfigurable, diode PIN.

Abstract—A novel beam switching antenna based on active frequency selective surfaces (AFSS) is presented. The antenna consists of a monopole antenna with omnidirectional radiation pattern and a novel active circular frequency selective surface surrounding the monopole antenna. Each unit cell in the AFSS structure contains two circular shaped patches connected with each other by a high frequency PIN-diode. The AFSS elements are designed using CST microwave studio. The PIN-diodes are applied to achieve beam switching. By switching between ON and OFF states of PIN-diodes, exhibit reflection and transmission characteristics within the WIFI band of 5 GHz. The AFSS unit cells are arranged in a triangular structure with different combinations of the diode states, the beam switching is achieved at three directions which are $\theta = 180^\circ$, 300° and 60° . In addition, the gain is improved from 2.2 dBi to 5.71 dBi within compact configuration compared to the literature.

Keywords—Active frequency selective surface (AFSS), directional radiation pattern, omnidirectional radiation pattern, switched-beamforming antenna, PIN-diode.

ملخص—يتم تقديم هوائي جديد لتبديل الحزمة يعتمد على الأسطح النشطة الانتقائية للتردد (AFSS). يتكون الهوائي من هوائي أحادي القطب مع مخطط إشعاع شامل الاتجاهات و سطح انتقائي جديد للتردد على شكل دائري يحيط بالهوائي أحادي القطب. تحتوي الخلية العنصرية في بنية AFSS على بقعتين دائريتين متصلتين ببعضهما البعض بواسطة صمام ثنائي PIN عالي التردد. تم تصميم عناصر AFSS باستخدام CST. يتم تطبيق الصمامات الثنائية PIN لتحقيق تبديل الحزمة. من خلال التبديل بين حالات التشغيل والإيقاف الخاصة بالصمامات الثنائية PIN، تظهر خصائص الانعكاس والإرسال داخل نطاق 5 WIFI جيجاهرتز. يتم ترتيب AFSS في هيكل مثلث مع الأخذ بعين الاعتبار مختلف حالات الصمام الثنائي، ويتم تحويل الحزمة في ثلاثة اتجاهات وهي 180° و 300° و 60° . بالإضافة إلى ذلك، تم تحسين الكسب من 2.2 dBi إلى 5.71 dBi ضمن حجم مضغوط مقارنة بالهوائيات المنجزة.

الكلمات المفتاحية—الأسطح النشطة الانتقائية للتردد (AFSS)، انتشار موجه، انتشار دائري، هوائي ذو انتشار متعدد، الصمامات الثنائية PIN.