

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la Technologie*

*Département Electronique*

# **Mémoire**

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Télécommunication**

**Spécialité : Système des Télécommunications**

Par

- ZITOUNI Yazid
- SAHRAOUI Abdelalim

*Intitulé*

## **Sujet**

**Etude et conception d'une surface sélective en fréquence double  
bande étroite**

***Soutenu le : 04/07/2023***

***Devant le Jury composé de :***

<b><i>Nom &amp; Prénom</i></b>	<b><i>Grade</i></b>	<b><i>Qualité</i></b>	<b><i>Etablissement</i></b>
<i>Mme. ADOUI Ibtissem</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. FLISSI Mustapha</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Melle. BOULARAS Assia</i>		<i>Co-Encadreur</i>	<i>Univ-Boumerdès</i>
<i>Mme. BENDIB Sarra</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Melle. FENENICHE Wafa</i>		<i>Invité</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2022/2023*



***Dédicace***

*Je dédie ce travail*

*À bon dieu qui m'a donné la patience et le courage de continuer sans cesse et de réaliser ce travail modeste.*

*À ma famille, elle, qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.*

*À mes parents qui ont été toujours à mes côtés*

*À mon frère*

*À mes amis*

*À mon binôme et meilleur ami Abdelalim.*

*À notre cher promoteur Dr. Flissi Mustapha et cher Co-Encadreur Melle.*

*BOULARAS Assia*

*À tous les professeurs qui m'ont enseigné tout au long de mon parcours*

*Académique.*

*À tous ceux que j'aime*

**ZITOUNI YAZID**

## ***Dédicace***

*Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU  
De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Je tiens à dédier cet humble travail à :*

*Ma tendre mère et mon cher père*

*Mes sœurs et mon frère Mohamed Ziad*

*Toute ma famille*

*Yazid, chère ami avant d'être binôme*

*Mes meilleurs amis*

*Spécial dédicace à notre cher encadreur :*

*Dr. Flissi Mustapha et cher Co-encadreur Melle. BOULARAS Assia*

*Tous ceux qui m'aiment et que j'aime*

***SAHRAOUI ABDELALIM***

## *Remerciement*

Nous remercions tout d'abord Dieu le tout puissant qui nous a accordé la volonté et le courage pour l'accomplissement de ce travail.

Nous exprimons nos remerciements avec un grand plaisir et un grand respect à notre cher promoteur M Flissi Mustapha, et Co-Encadreur *Melle. BOULARAS Assia* pour leur patience, et surtout pour leur confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude. Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques, A tous mes enseignants qui m'ont initié `aux valeurs authentiques, en signe d'un profond respect et d'un profond amour.

## Table des matières

Introduction générale : .....	1
<b>Chapitre I</b> .....	2
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique des FSS.....	3
I.3. Les structures FSS.....	3
I.4. Différents types des FSS .....	4
I.4.1. Les FSSs à motifs gravés .....	4
I.4.2. Les FSSs à grille .....	5
I.5 Réponses fréquentielles.....	5
I.5.1 FSS de type passe-bas .....	5
I.5.2 FSS de type passe-haut.....	6
I.5.3 FSS de type passe-bande.....	7
I.5.4 FSS de type coupe-bande : .....	8
I.6 Différents motifs des FSS : .....	9
I.6.1 Groupe 1- N pôles : .....	9
I.6.2 Groupe 2-Types en forme anneaux .....	10
I.6.3 Groupe 3- Intérieure rempli .....	10
I.6.4 Groupe 4 : Combinaison .....	11
I.7 Paramètres de conception des FSS.....	11
I.8 Les applications des FSS.....	12
I.8.1Les radômes .....	13
I 8.2 Les antennes.....	13
I.8.3Domaine militaire .....	15
I.9 Conclusion : .....	16
<b>Chapitre II État de l'art</b> .....	17
II.1 Introduction.....	18
II.2 Techniques de conception des FSS à bandes multiples .....	18
II.2.1 FSS multicouches ou empilés .....	18
II.2.2 FSS à une seule couche.....	18
II.3 Active Frequency Selective Surface (AFSS) .....	19
II.4 FSS Multi-bande.....	21
II.5 Conclusion .....	29
<b>Chapitre III : étude et simulation FSS a double bande étroite</b> .....	30
III.1. Introduction .....	31
III.2 Présentation du simulateur CST WMS.....	31

III.2.1 Cadre de propriétés (Floquet mode) :.....	31
III.3 Problématique.....	32
III.4 Solution proposée.....	32
III.5 Conception de cellule unitaire.....	32
III.6 Conception de réseaux FSS.....	35
III.7 Etude paramétrique.....	37
III.7.1 Effet de certains paramètres sur le coefficient de réflexion et de transmission.....	37
III.8 Conclusion :.....	43

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>FIGURE I.1</b> STRUCTURE PLANE PERIODIQUE BIDIMENSIONNELLE .....	4
<b>FIGURE I.2</b> FSS DE TYPE PASSE-HAUT. ....	6
<b>FIGURE I.3</b> FSS DE TYPE PASSE-HAUT .....	7
<b>FIGURE I.4</b> FSS DE TYPE PASSE-BANDE .....	8
<b>FIGURE I.5</b> FSS DE TYPE COUPE-BANDE.....	9
<b>FIGURE I.6</b> N POLES .....	10
<b>FIGURE I.7</b> TYPES EN FORME ANNEAUX .....	10
<b>FIGURE I.8</b> INTERIEURE REMPLI .....	11
<b>FIGURE I.9</b> COMBINAISON .....	11
<b>FIGURE I.10</b> RADOMES.....	13
<b>FIGURE I.11</b> EXEMPLE D'APPLICATION DE LA FSS DANS LE GUIDE FAISCEAU D'UNE ANTENNE A GRAND REFLECTEUR.....	14
<b>FIGURE I.12</b> EXEMPLE D'APPLICATION DE LA FSS [36] .....	15
<b>FIGURE I.13</b> FURTIVITE D'AVION D'ATTAQUE. ....	16

## Chapitre II

<b>FIGURE II. 1</b> TRANSMISSION PAR UN RESEAU DE STRUCTURES SRR COURT-CIRCUITEES ET NON RACCOURCIES. ....	19
<b>FIGURE II. 2</b> VALEURS DE TRANSMISSION NORMALISEES MESUREES POUR LE RESONATEUR SRR COURT-CIRCUITE.....	20
<b>FIGURE II. 3</b> LA STRUCTURE SCFSS PROPOSEE POUR LES APPLICATIONS GNSS.....	21
<b>FIGURE II. 4</b> S21 DE LA STRUCTURE SCFSS PROPOSEE.....	22
<b>FIGURE II. 5</b> REPOSE DE TRANSMISSION DES ONDES POLARISEES TE AVEC DIFFERENTS ANGLES D'INCIDENT (0°, 30°, 60° ET 90°).....	22
<b>FIGURE II. 6</b> REPOSE DE TRANSMISSION DES ONDES POLARISEES DE MT POUR DIFFERENTS ANGLES D'INCIDENT (0°, 30°, 60° ET 90°).....	23
<b>FIGURE II. 7</b> (A) MODELES NUMERIQUES AVEC PORTS FLOQUET, (B) POLARISATION TE, (C) POLARISATION TM.....	24
<b>FIGURE II. 8</b> (A) LA TRANSMISSION COEFFICIENT POUR LES ONDES INCIDENTES POLARISEES DE TE. 24	
<b>FIGURE II. 9</b> (B) LA TRANSMISSION COEFFICIENT POUR LES ONDES INCIDENTES POLARISEES DE MT 25	
<b>FIGURE II. 10</b> (C) CELLULE DE LA FSS, (D) CELLULE UNITAIRE EN ORIGAMI AVEC BOUCLES CARREES DEFORMEES $\Gamma = 80$ , (E) CELLULE UNITAIRE FSS EN ORIGAMI AVEC BOUCLES CARREES DEFORMEES $\Gamma = 45$ .....	25
<b>FIGURE II. 11</b> DISTRIBUTION ACTUELLE POUR UNE ONDE D'IMPACT .....	26
<b>FIGURE II. 12</b> VUE 3D DE LA STRUCTURE DE L'ANTENNE AVEC LE FSS ET LE PLAN DE MASSE. ....	27
<b>FIGURE II. 13</b> MAGNITUDE DU COEFFICIENT DE REFLEXION ACTIF DU DIPOLE CONNECTE ANTENNE RESEAU AVEC LE PLAN DE MASSE. ....	28
<b>FIGURE II. 14</b> MAGNITUDE ET PHASE DU COEFFICIENT DE REFLEXION DU FSS POUR DIFFERENTS ANGLES DE BALAYAGE DANS LE PLAN Y-Z.....	28
<b>FIGURE II. 15</b> MAGNITUDE ET PHASE DU COEFFICIENT DE REFLEXION DU FSS POUR DIFFERENTS ANGLES DE BALAYAGE DANS LE PLAN Y-Z.....	28
<b>FIGURE II. 16</b> GEOMETRIE DU FSS PROPOSE ET DE SA CELLULE UNITAIRE.....	29

## Chapitre III

<b>FIGURE III. 1</b> GEOMETRIE DE LA STRUCTURE FSS PROPOSEE.....	33
--	----



<b>FIGURE III. 2</b> TOPOLOGIE DE LA CELLULE UNITAIRE.....	34
<b>FIGURE III.3</b> COEFFICIENT TRANSMISSION ET DE REFLEXION INCIDENCE DE LA CELLULE UNITAIRE..	35
<b>FIGURE III. 4</b> GEOMETRIE DE LA CELLULE PRINCIPALE .....	36
<b>FIGURE III. 5</b> TOPOLOGIE DE LA STRUCTURE FINALE.....	36
<b>FIGURE III. 6</b> COEFFICIENT DE TRANSMISSION ET DE REFLEXION DE RESEAUX FSS. ....	37
<b>FIGURE III. 7</b> EFFET DE LONGUEUR LT SUR S11. COEFFICIENT DE REFLEXION S11 EN DB.....	38
<b>FIGURE III. 8</b> EFFET DE LONGUEUR LT SUR S21. ....	38
<b>FIGURE III.9</b> EFFET DU MATERIEL DU SUBSTRAT SUR LE S11. ....	39
<b>FIGURE III.10</b> EFFET DU MATERIEL DU SUBSTRAT SUR LE S21. ....	39
<b>FIGURE III.11</b> EFFET DE LA LONGUEUR L2 SUR LE S11. ....	40
<b>FIGURE III.12</b> EFFETS DE LA LONGUEUR L2 SUR LE S21. ....	40
<b>FIGURE III.13</b> EFFET DE LA LONGUEUR L3 SUR LE S11. ....	41
<b>FIGURE III.14</b> EFFET DE LA LONGUEUR L3 SUR LE S21. ....	41
<b>FIGURE III. 15</b> EFFET DE LA LONGUEUR L5 SUR LE S11. ....	42
<b>FIGURE III.16</b> EFFET DE LA LONGUEUR L5 SUR LE S21. ....	42

## Liste des tableaux

<b>TABLE 1 : DIMENSIONS GEOMETRIQUES DE LA STRUCTURE FSS PROPOSEE.....</b>	<b>33</b>
<b>TABLE 2 : CAHIER DES CHARGES DU FSS CONÇU.....</b>	<b>34</b>

## Liste des abréviations

RF : Radio Fréquence

FSS : Surface Sélective en Fréquence

CPW : guides d'ondes Coplanaires

TE : Transverse Electrique

TM : Transverse Magnétique

TEM : Transverse Electrique Magnétique

HE : Champ Electrique.

HM : Champ Magnétique

EM : Electromagnétique.

VR : Reverse Voltage

f : Fréquence (en Hz)

FFT : Transformations de Fourier rapide

FMT : Transformations Modales rapides

S : L'opérateur de diffraction

FDTD : Finit Différence Time Domain (la méthode des Différences Finies dans le  
Domaine Temporel)

GHz : Gigahertz

## Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude et l'implémentation d'une surface sélective en fréquence (FSS) à double bande étroite et de fréquence sélective à chaque bande de fonctionnement. Des résonateurs compacts bidimensionnels à fente en forme de U sont utilisés dans chaque cellule FSS pour obtenir cette capacité. En outre, chaque logement résonateur est composé de droite section de fente au centre reliée à deux bras en forme de U à chaque extrémité. Les dimensions des résonateurs de fente sont optimisées via des simulations électromagnétiques à ondes complètes utilisant CST Micro Waves Solver. La structure FSS réalisée est indépendante de polarisation incidente et l'angle en raison de la rotation de  $90^\circ$  de la cellule. La validité de cette structure FSS est confirmée par les résultats de simulation et de mesure qui montrent le fonctionnement de celle-ci aux fréquences prévues de 8,80 et 9,54 GHz, qui sont très proches l'un de l'autre.

## ملخص

يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بدراسة وتنفيذ سطح انتقائي للتردد بنطاق ضيق مزدوج وانتقائي للتردد في كل نطاق لتحقيق هذه الإمكانية. FSS في كل خلية U تشغيل. تُستخدم رنانات ذات فتحات مدمجة ثنائية الأبعاد على شكل حرف في كل U بالإضافة إلى ذلك ، يتكون كل غلاف مرنان من قسم فتحة مستقيم في المركز متصل بذراعين على شكل حرف CST Micro Waves طرف. تم تحسين أبعاد الرنانات الشق باستخدام محاكاة الموجة الكهرومغناطيسية الكاملة باستخدام المحققة مستقلة عن استقطاب الحادث والزاوية بسبب دوران الخلية بزواوية 90 درجة. يتم تأكيد صحة FSS بنية 8.80 بنية الخدمة الثابتة الساتلية هذا من خلال نتائج المحاكاة والقياس التي توضح تشغيلها على الترددات المخططة البالغة 8.80 و 9.54 جيجا هرتز ، وهي قريبة جدًا من بعضها البعض.

## Abstract

The work presented in this thesis concerns the study and implementation of a frequency selective surface (FSS) with double narrow band and frequency selective at each operating band. Compact two-dimensional U-shaped slot resonators are used in each FSS cell to achieve this capability. In addition, each resonator housing is composed of a straight slot section in the center connected to two U-shaped arms at each end. The dimensions of the slit resonators are optimized using full wave electromagnetic simulations using CST Micro Waves Solver. The realized FSS structure is independent of incident polarization and angle due to the  $90^\circ$  rotation of the cell. The validity of this FSS structure is confirmed by the simulation and measurement results which show its operation at the planned frequencies of 8.80 and 9.54 GHz, which are very close to each other.

# **Introduction général**

## **Introduction générale :**

Les FSS disposent d'une large gamme d'applications dans le spectre électromagnétique (EM), y compris réduction de la section radar des cibles militaires ; réduction des interférences dans les environnements sans fil intérieurs, filtrage spatial, dômes radar (radômes), la communication spatiale, les réflecteurs d'antennes, les filtres quasi-optiques, polariseurs et commutateurs [1]. Les structures de la FSS, similaires aux filtres à micro-ondes, peuvent être conçus comme en types passe-bas, passe-haut, passe-bande ou coupe-bande [2]. Les caractéristiques de ces deux derniers types de filtrage sont utilisées plus que les autres types. D'autre part, outre la réponse en fréquence de la structure du FSS, la sensibilité à l'angle d'incidence de l'onde EM et sa polarisation sont importants [3].

Une nouvelle structure FSS à double bande étroite est proposée par les auteurs de la référence [4]. La fréquence de chaque bande de fonctionnement est sélective de l'ordre de 8,80 et 9,54 GHz. Cette sélectivité en fréquences est obtenue par l'utilisation des résonateurs compacts bidimensionnels à fente en forme de U. L'objectif de notre travail est l'étude, l'implémentation et la validation des résultats de cette structure FSS proposée afin de déterminer son efficacité.

Le reste de ce mémoire est organisé autour de trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la théorie des FSS à savoir leurs structures, ses types, leurs réponses fréquentielles, ses motifs, ses paramètres de conception et ses applications.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons l'état de l'art sur les techniques de conception des FSS multi-bandes.

Le troisième chapitre est consacré à la conception et l'implémentation de la structure FSS proposée et aux discussions des résultats de validation obtenues par simulations.

Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale

# **Chapitre I**

# **Surfaces sélectives en**

# **fréquence FSS**

## **I.1. Introduction**

Ce mémoire se place dans l'étude des Surfaces sélectives en fréquence FSS qui ont été utilisées pour contrôler et façonner les ondes électromagnétiques. Dans ce chapitre, nous allons présenter, en premier lieu, l'historique et la définition des FSS. Nous donnerons ensuite leurs caractéristiques et leurs types, techniques et outils d'analyse des FSS et enfin, pour finaliser ce chapitre, nous présenterons les différentes applications des FSS.

## **I.2. Historique des FSS**

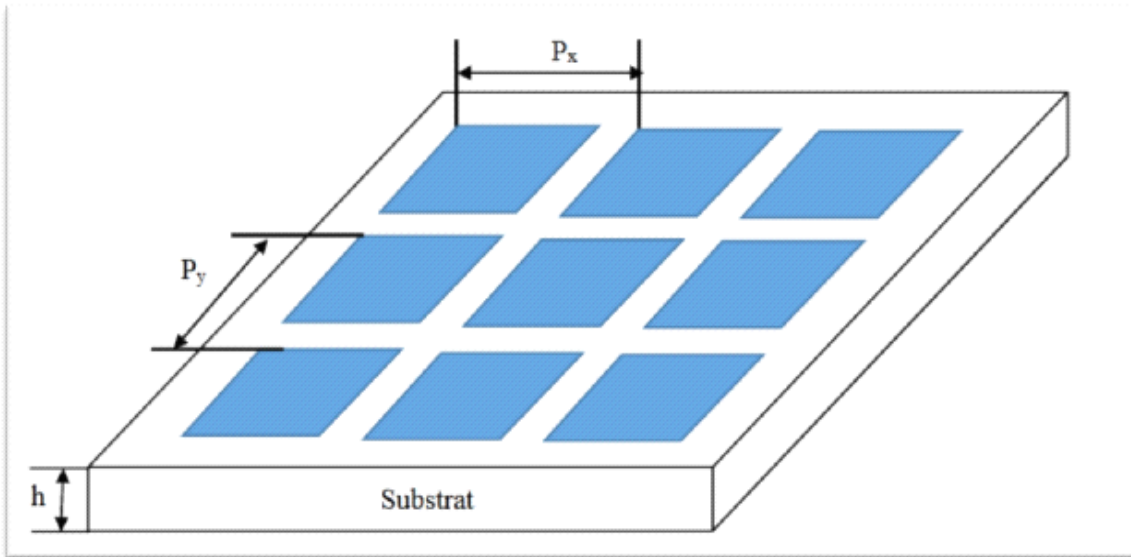
Historiquement, l'utilisation des structures périodiques pour contrôler la propagation d'une onde électromagnétique, a commencé avec les travaux de Lord Rayleigh en 1887 sur les couches diélectriques [5] et William Lawrence Bragg en 1915 qui réalisa le premier matériau Bande Interdite Photonique (BIP) représentant le miroir de Bragg [6]. Ce dernier permet, par l'emploi d'un empilement périodique de plusieurs couches diélectriques, de réfléchir totalement l'onde incidente. Depuis cette époque, les physiciens se sont beaucoup intéressés aux propriétés de ces structures. Par conséquent, ils ont procédé à leur utilisation originelle dans le domaine de l'optique puis dans le domaine des Micro-ondes particulièrement dans le domaine des antennes. En 1960, les structures périodiques de type surfaces sélectives en fréquences ont été utilisées pour la première fois dans le domaine militaire afin de rendre les objets non détectables par les radars. Également, les structures de type surfaces hautes impédances planaires ou AMC ont été découvertes par Sievenpiper depuis les années 1999 où elles ont été insérées aussi dans les radômes pour la protection des antennes des intempéries [7].

## **I.3. Les structures FSS**

Les surfaces sélectives en fréquence sont des structures périodiques bidimensionnelle ou tridimensionnelle, composées d'un élément périodique conducteur basé sur un substrat diélectrique [8]. La caractéristique la plus importante de ces structures est leur sélectivité de fréquence comme leurs noms l'indique. La FSS contrôle les ondes électromagnétiques qui touchent sa surface et agit comme filtre en fonction de la conception de la structure [9]. Ces propriétés de filtrage sont classées dans les filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande et coupe-bande.



La figure 1 illustre un exemple de structure plane périodique à deux dimensions où  $P_x$  et  $P_y$  sont les périodicités des axes  $x$  et  $y$ , respectivement et  $h$  est l'épaisseur du substrat



**Figure 1.1** Structure plane périodique bidimensionnelle[10]

Une surface sélective en fréquence est généralement formée soit d'un plan métallique perforé périodiquement avec des ouvertures (grille métallique), soit d'un réseau périodique de motifs métalliques imprimés sur un substrat. Pour chaque type de FSS, les ondes électromagnétiques structurées en deux polarisations distinctes, TE (transverses électriques) et TM (transverses magnétiques), peuvent être étudiées [44].

## I.4. Différents types des FSS

### I.4.1. Les FSSs à motifs gravés

Les surfaces sélectives à motifs gravés peuvent généralement être pareil à un filtre passe bas. La structure diélectrique de l'écran pour les fréquences basses provoque une atténuation de l'onde dépendant de la permittivité et de la tangente de pertes. Pour les hautes fréquences, le motif entre alors en résonance, le courant induit sur les métallisations cause la réflexion de l'onde incidente. L'efficacité de la réflexion dépend de la géométrie des gravures, leur taille vis-à-vis de la période du réseau et de la permittivité ou de l'épaisseur du substrat[37].

Lorsque l'on varie la période du réseau, la variation est surtout présente au niveau de la largeur de bande de la réponse. Pour une même taille de motif, plus la période est petite, plus la largeur de bande sera importante [8].

La variation de l'épaisseur du substrat provoque un décalage de la fréquence de résonance du motif. Ce déplacement tend vers une limite lorsque le substrat a une épaisseur de quelques millimètres [8].

Une variation de la permittivité du substrat a les mêmes conséquences qu'une modification des dimensions du motif. En augmentant la permittivité du substrat, la fréquence de résonance des patches baisse. Ce constat est très problématique, car la plupart des fabricants ne peuvent certifier la valeur de permittivité de leurs matériaux à moins de  $\pm 2\%$  près pour les forts indices [8].

#### **I.4.2. Les FSSs à grille**

Les grilles ou plaques métalliques trouées ont un comportement fréquentiel de type passe haut. Pour les basses fréquences, la grille dichroïque est vue comme un plan parfaitement conducteur, l'onde incidente est donc totalement réfléchi. Pour les fréquences hautes, l'effet prépondérant est celui des trous. La fréquence de l'onde incidente étant supérieure à la fréquence de coupure du guide, nous avons donc, une propagation guidée. Le signal est alors principalement transmis [2]-[4].

Les FSSs à grille sont largement utilisées dans le domaine des micro-ondes. La forme et la taille des ouvertures, leur périodicité, l'épaisseur de l'écran métallique, déterminent le comportement fréquentiel de la FSS. Les ouvertures les plus courantes sont rectangulaires ou circulaires [32]; des ouvertures en forme de Croix sont également utilisées. Des ouvertures ayant des formes plus complexes et des grilles à écrans multiples sont parfois utilisées en vue de parvenir à des performances spécifiques, ou pour satisfaire des spécifications de conception très serrées].

### **I.5 Réponses fréquentielles**

Les surfaces sélectives en fréquences sont des structures périodiques gravées dans une surface diélectrique ou un groupe de structures métalliques dans le vide. Ses formes résonnent avec certaines fréquences en fonction des longueurs et du type de matériaux. Les FSS sont classées en fonction de leurs réponses spectrales de types passe-bas, passe-haut, passe-bande et coupe-bande [08].

#### **I.5.1 FSS de type passe-bas**

Cette structure est le dual de la structure passe haut c.à.d. que la proportion du métal est plus importante que l'air. Elle est complètement réfléchissante pour les hautes fréquences dans

lesquelles elle se comporte comme un miroir quasi parfait. Cette structure est composée de patchs déconnectés comme la montre la figure (1.2), elle présente une réflectivité qui tend vers 1 pour les hautes fréquences.

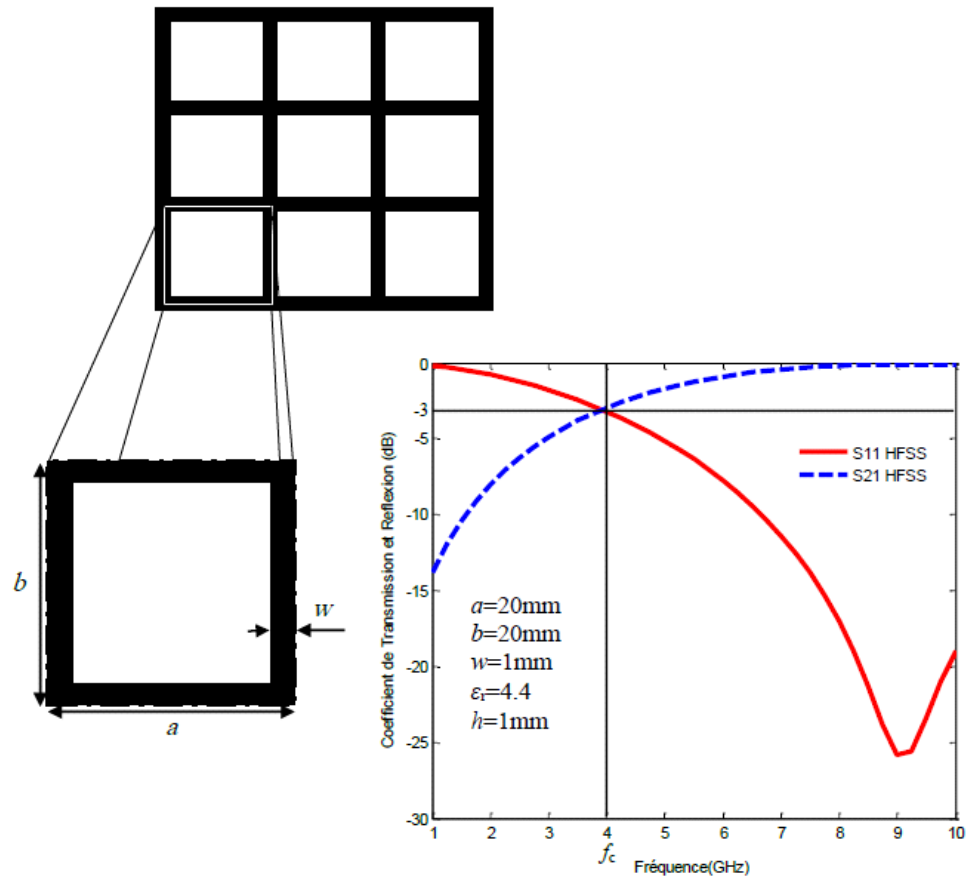


Figure I.2 FSS de type passe-haut.[11]

### I.5.2 FSS de type passe-haut

Ces structures se comportent comme un miroir quasi parfait, elles sont complètement réfléchissantes pour les basses fréquences. Pour réaliser ces structures métalliques à bipolarisation de l'onde, il suffit d'utiliser des grilles métalliques, comme illustré sur la figure (1.3). Le coefficient de réflexion de cette structure répond d'une manière identique en polarisation TE et TM. Cette structure est transparente pour les hautes fréquences et réfléchissante pour les basses fréquences et ceci pour les deux polarisations.

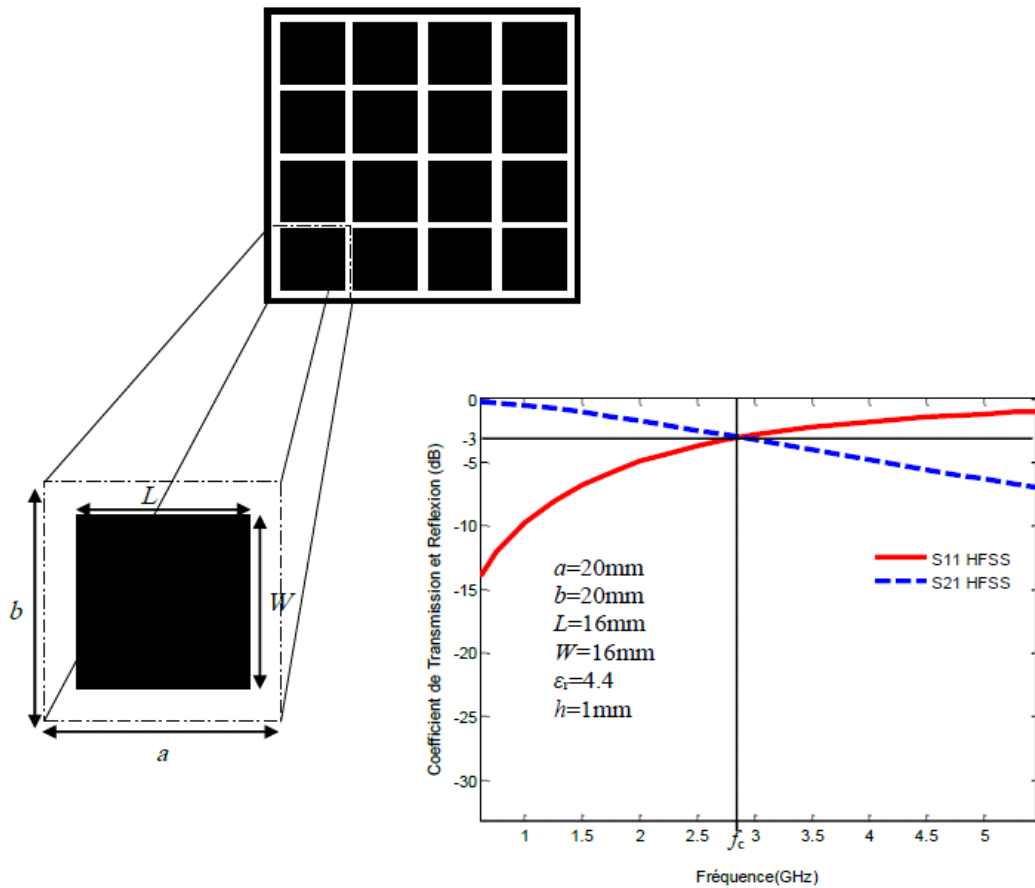


Figure I.3 FSS de type passe-haut[11]

### I.5.3 FSS de type passe-bande

Cette structure est le dual de la structure précédente, elle présente donc un comportement de type filtre passe-bande et elle est composée d'un arrangement de fentes en anneaux, comme illustré sur la figure (1.4). Cette structure est quasiment transparente autour d'une fréquence de résonance, tandis qu'elle est réfléchissante pour les autres fréquences et ceci pour les deux polarisations. Donc, elle peut être assimilée à un plan métallique sauf pour une bande de fréquence et ceci pour les deux polarisations.

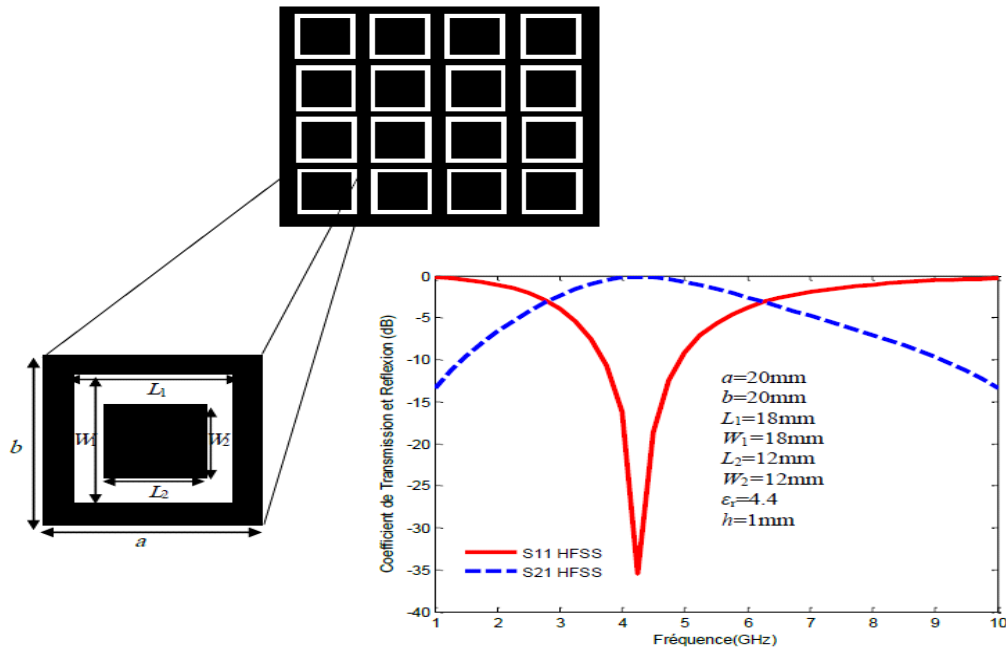


Figure I.4 FSS de type passe-bande[11]

### I.5.4 FSS de type coupe-bande :

Ces structures offrent un comportement de filtre coupe-bande. Elles sont composées d'un agencement périodique de boucles métalliques (figure 1.5). Cet agencement permet d'obtenir une structure avec un comportement identique de type coupe-bande pour les deux polarisations. Ce type de structures est complètement réfléchissant autour de la fréquence de résonance des boucles couplées tandis qu'il est quasiment transparent pour les autres fréquences.

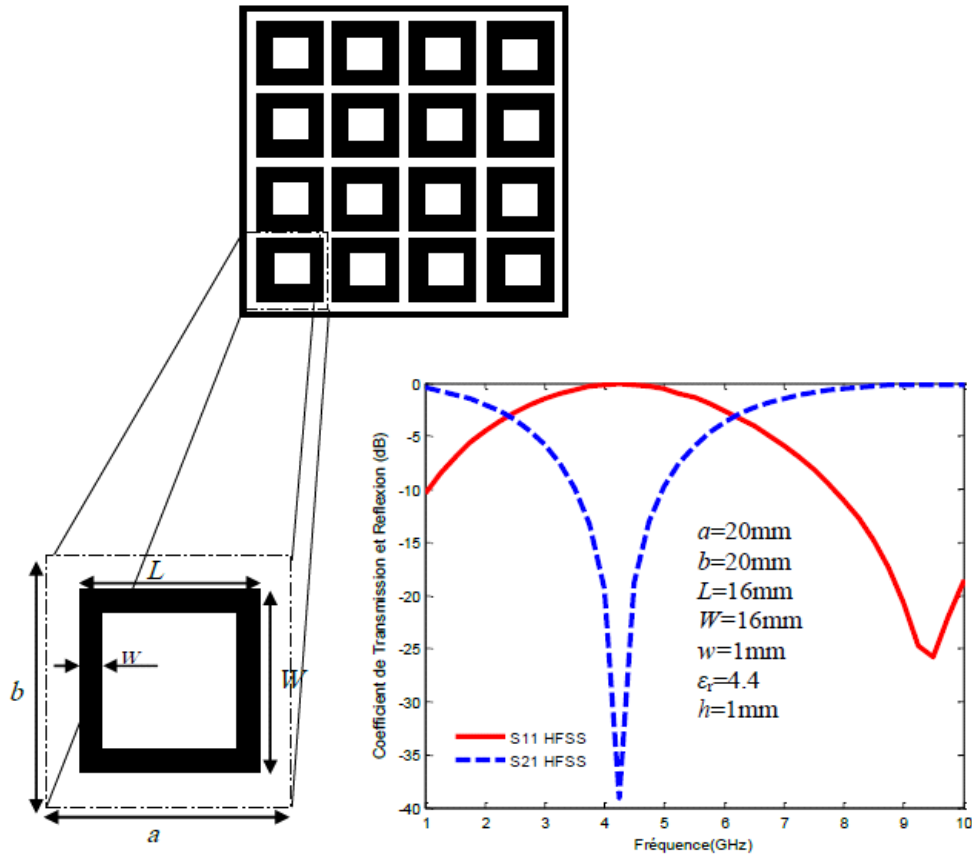


Figure I.5 FSS de type coupe-bande.[11]

## I.6 Différents motifs des FSS :

Les motifs utilisés dans les FSS sont classés en quatre groupes de base formé des éléments connectés au centre. Il s'agit du groupe 1- N pôles, groupe 2- Types en forme anneaux, le groupe 3- Intérieur rempli et le groupe 4-Combinaison [15-18].

### I.6.1 Groupe 1- N pôles :

Le groupe Ce groupe est formé des éléments connectés au centre, ayant N pôles comme: 1-N pôles sont les dipôles, les tripodes et les croix de Jérusalem. Les éléments les plus populaires de ce groupe sont les croix de Jérusalem et les tripodes. Certains de ces éléments ont été combinés avec d'autres types d'éléments pour produire de nouvelles configurations de FSS [3].

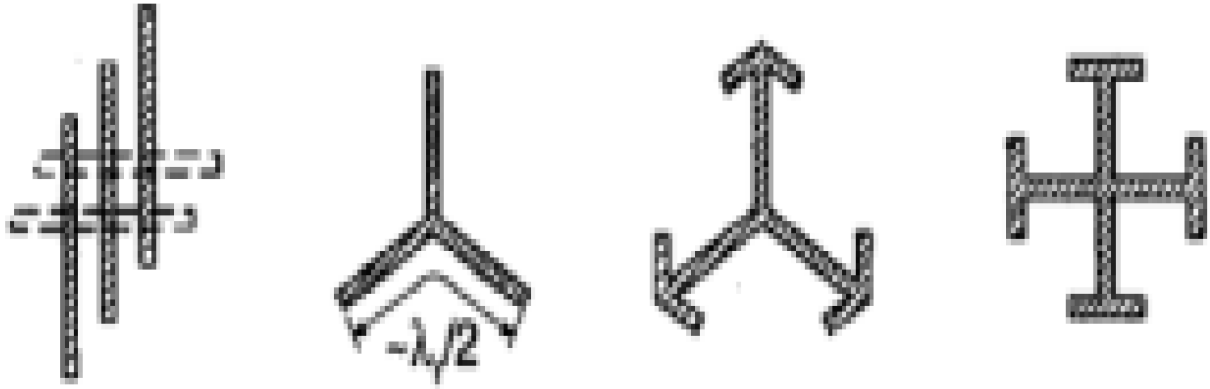


Figure I.6 N pôles[2]

### I.6.2 Groupe 2-Types en forme anneaux

Ce groupe est le plus populaire dans la littérature scientifique [2][17][19][20]. Il utilise des types en formes anneaux simple et concentriques. On trouve généralement, l'anneau circulaire, l'anneau carré, l'anneau hexagonal et L'anneau tripolaires.

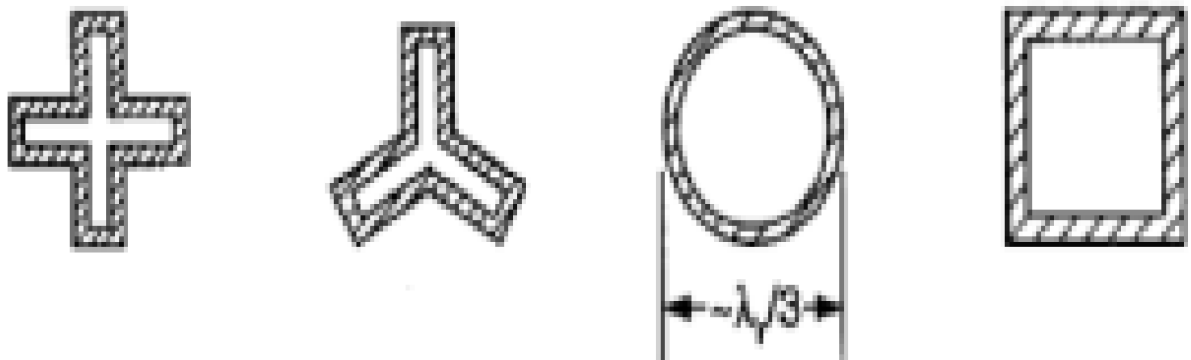


Figure I.7 Types en forme anneaux[2]

### I.6.3 Groupe 3- Intérieure rempli

Formé par des ouvertures de forme quelconque dans un plan conducteur ou des patches de formes diverses imprimés sur du substrat. Ces structures prennent généralement, la forme d'ouvertures ou de patches. Ils peuvent apparaître dans des configurations multi-couches ou à couche unique [19]. La configuration à simple couche avec des ouvertures est utilisée comme filtres dichroïques [18].



Figure 1.8 Intérieure rempli[2]

#### I.6.4 Groupe 4 : Combinaison

Des combinaisons de différents types d'éléments des FSSs ont été employées au cours de ces dernières années afin d'atténuer certains des problèmes liés à des FSSs constituées par un seul type d'élément (motif). Par exemple, une FSS formée par des anneaux carrés avec des fentes a été employée pour tenter de surmonter les problèmes de sensibilité angulaire observés dans les FSSs formées par les anneaux carrés seuls [12][13]. Ces nouvelles structures ont également été utilisées pour réduire la SER (Section Équivalente Radar) des radômes [14].

Ces quatre modèles de base peuvent être combinés pour générer de nombreuses nouvelles FSS dont les caractéristiques sont uniques.

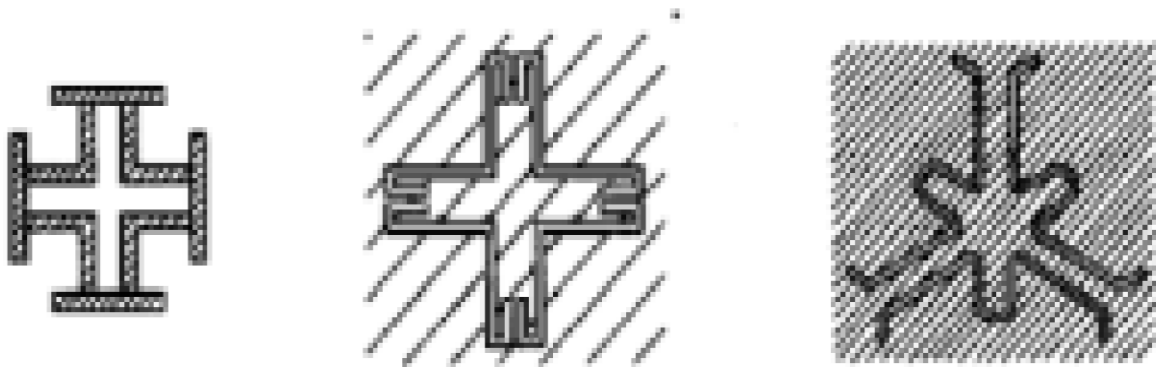


Figure 1.9 Combinaison[2]

#### I.7 Paramètres de conception des FSS

Les principaux paramètres de conception de la FSS sont la fréquence centrale, la transmittance et 3 dB bande passante. Une bonne structure FSS devrait avoir des caractéristiques de transmission stables avec différents angles d'incidence et de polarisation. De nombreux facteurs influent sur la transmission du FFS. Caractéristiques, y compris la



structure de la cellule, la manière et la période de disposition, l'épaisseur de la diélectrique, constante Diele premièrement, la cellule de l'unité FSS est le principal facteur affectant la fréquence centrale de l'FSS, qui détermine la performance de la FSS. Pour certaines structures simples de cellule unitaire, Le Centre les fréquences peuvent être estimées. Par exemple, pour une structure dipôle, une demi-onde de résonance se produit lorsque la longueur de la cellule unitaire est un multiple entier de la demi-longueur d'onde de l'onde incidente. Dans plus la symétrie de toute cellule unitaire est élevée, plus la stabilité de polarisation et stabilité angulaire, perte diélectrique, nombre de couches.

En second lieu, la structure périodique et le mode d'organisation de FSS sont également des paramètres importants pourrait avoir une incidence sur la réponse finale de transmission/réflexion de la FSS. Par conséquent, selon les caractéristiques de l'application, les structures et le mode de disposition du FSS doivent être soigneusement choisis pour répondre à toutes les demandes. La distance des éléments et la position géométrique des éléments adjacents affectent considérablement la fréquence centrale, la bande passante, la sensibilité angulaire et la polarisation croisée niveler. Troisièmement, les écrans FSS doivent être supportés par un substrat diélectrique en pratique en raison de raisons mécaniques. En général, la fréquence de résonance des dérives diélectriques à la haute fréquence lorsque l'angle de l'incident augmente, tandis que la fréquence de résonance FSS se déplace vers la basse fréquence lorsque l'angle d'incidence augmente. Par conséquent, la liaison du FSS d'un côté à diélectrique ou en l'incorporant avec diélectrique des deux côtés change considérablement sa transmission et peut améliorer la stabilité structurale de l'angle [5]. En outre, la charge diélectrique Les structures FSS ont une bande passante disponible plus large. L'épaisseur de diélectrique a également une influence sur la réponse FSS avec le changement de l'angle d'incident et la polarisation. Pour atteindre un angle angulaire fente à résonance stable, l'épaisseur du diélectrique des deux côtés de la FSS doit être un multiple d'un quart de longueur d'onde. Lorsque la FSS est chargée avec un côté diélectrique, son épaisseur doit être un multiple d'une demi-longueur d'onde pour éliminer la perte de correspondance

## **I.8 Les applications des FSS**

Les FSS trouvent de nombreuses applications dans le domaine des micro-ondes et dans la gamme de THz, pour des fins à la fois scientifiques et commerciales, qui vont de systèmes d'antennes pour la recherche en radioastronomie, aux portes de l'écran de fours à micro-ondes. Certaines des applications les plus pertinentes sont brièvement décrites ci-dessous.

En micro-onde, les FSS sont utilisées comme des miroirs dichroïques dans les antennes à grand réflecteur pour les applications de radioastronomie. Le réseau d'alimentation de telles antennes se compose généralement, d'un faisceau de systèmes de guide d'ondes. Ces faisceaux générés par des sources fonctionnant à des fréquences différentes sont combinés par les FSS et centrés sur le réflecteur principal [31][32] (voir figure I.10). Une autre application des FSS dans la gamme de GHz est le radôme passe-bande où le signal passe à travers les radômes avec une perte d'insertion minimum à la fréquence de fonctionnement, alors qu'à l'extérieur de la bande de fréquence le signal est réfléchi [59][35].

### **I.8.1 Les radômes**

Les FSS peuvent être insérées dans les Radômes qui sont principalement conçus pour protéger une antenne des intempéries. Dans ce cas, la FSS sera utilisée par exemple comme un filtre passe-bande qui réduit la surface équivalente radar (SER) d'une antenne en dehors de sa bande de fréquence de fonctionnement.



*Figure I.10* radômes[10]

## I 8.2 Les antennes

Les FSS peuvent être utilisés pour contrôler les caractéristiques d'une antenne. Les performances de l'antenne peuvent être améliorées de différentes façons si nous ajoutons des FSS à la conception. Le FSS modifiera les performances de l'antenne à de nombreux égards en fonction de la structure utilisée et la méthode d'intégration.

La figure 11 illustre un exemple d'application de la FSS dans le guide faisceau d'une antenne à grand réflecteur. Les deux faisceaux en bande X et en bande Ka sont combinés par une FSS et centrés sur le réflecteur principal [32].

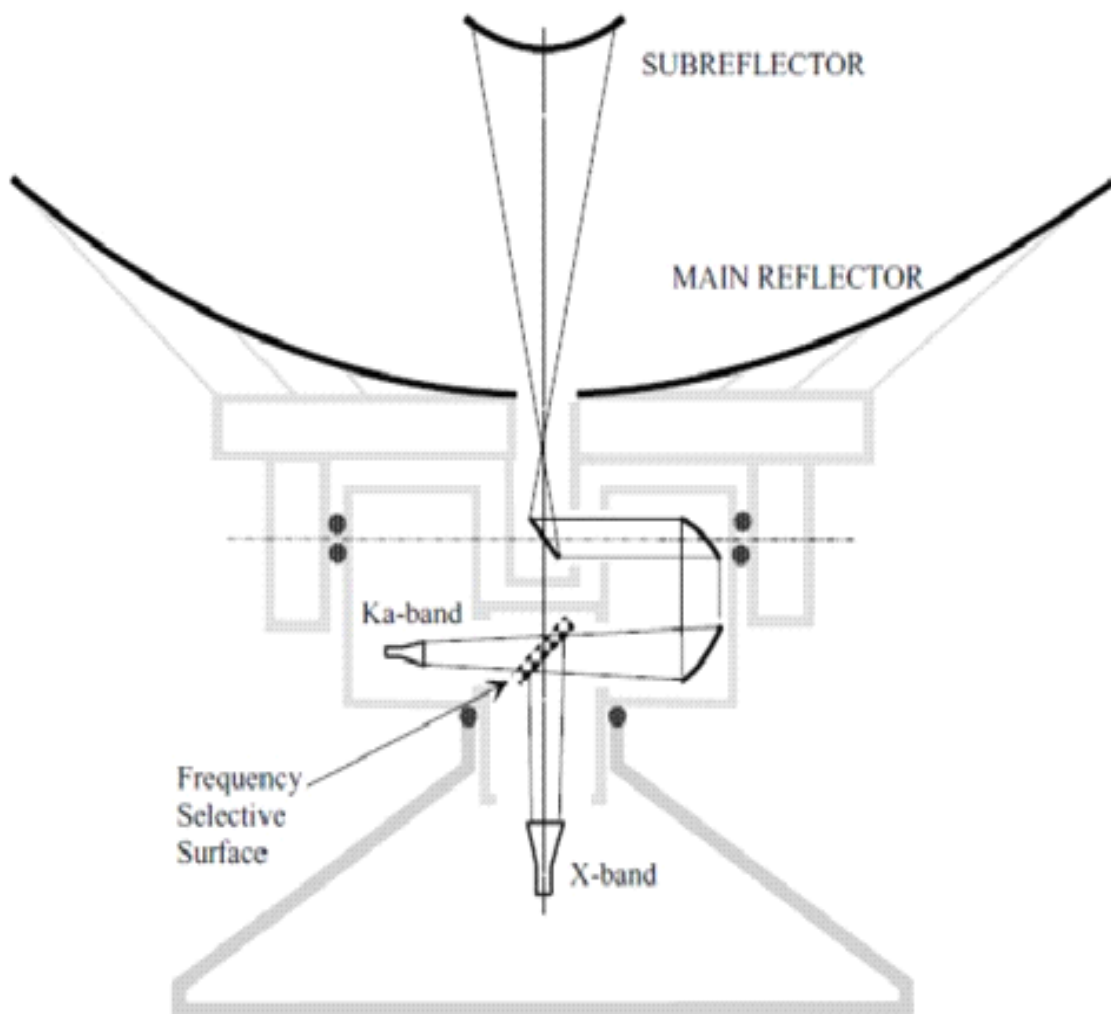


Figure I.11 Exemple d'application de la FSS dans le guide faisceau d'une antenne à grand Réflecteur [32]

- **Mission antenne Spot Mobile en face Terre**

Les FSS trouvent également des applications dans les antennes spatiales. La figure 12 illustre un exemple d'application des FSS dans ce type d'antenne.

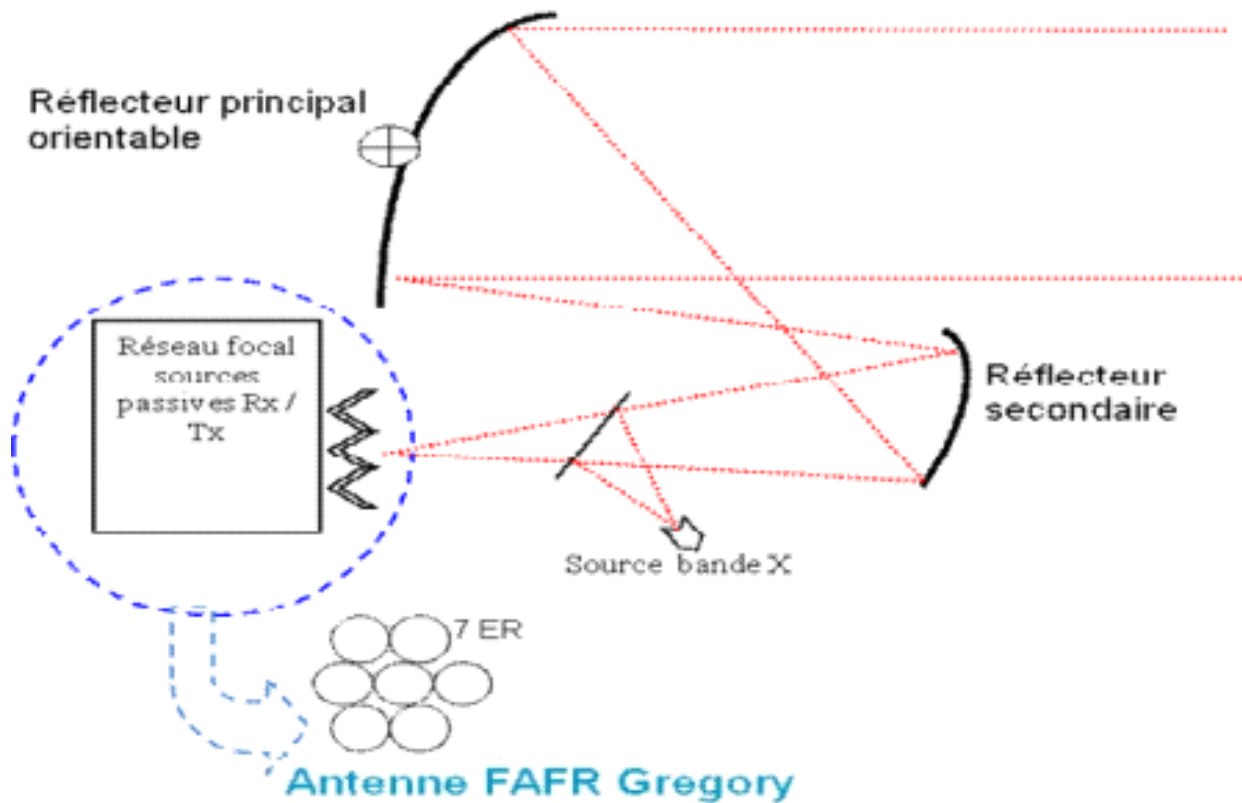


Figure I.12 Exemple d'application de la FSS [36]

Composée d'un Réflecteur Principal orientable, d'un Réseau de sources passives 20/30 GHz placées sur la face Terre, et sélectionnables permettant de réaliser des spots plus directifs, d'une Source en bande X placée sur le mat du réflecteur secondaire. La séparation des signaux bande Ka et X est réalisée par une FSS.

### I.8.3 Domaine militaire

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 FSS 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. Afin de minimiser la détection, les couches de FSS couvrent les installations afin de réduire la RCS. [1]



**Figure I.13** Furtivité d'avion d'attaque.[10]

### **I.9 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les FSS en mentionnant leurs caractéristiques, leurs types, sa réponse fréquentielle, ses outils d'analyse, ses différentes applications, ses différents motifs.

# **Chapitre II**

# **État de l'art**

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les techniques de conception des FSS multi-bandes, ensuite on va donner un état de l'art sur les surfaces sélectives en fréquence, communément appelée FSS (Frequency Sélective Surface).

## II.2 Techniques de conception des FSS à bandes multiples

Un FSS multi-bandes est caractérisé par plusieurs bandes passantes et plusieurs bandes d'arrêt dans la gamme de fréquence dans laquelle ils sont utilisés. Comme mentionné dans [5], deux approches principales peuvent être distingués pour la conception des FSS multi-bandes : multicouches ou empilés FSS monocouche avec éléments multi-résonants. En outre, ces deux approches peuvent être mis en œuvre de différentes manières.

### II.2.1 FSS multicouches ou empilés

Cette configuration se compose de la cascade de deux ou plusieurs FSS, chacun montrant l'un des bandes d'arrêt requises et la transparence à d'autres fréquences. En ce qui concerne solution monocouche, le FSS empilé est généralement plus lourd et plus complexe à fabriquer (nécessite le collage des différentes couches). Depuis chaque couche peut être conçu avec les périodicités les plus adaptées pour obtenir le comportement de fréquence souhaité, l'apparence des lobes du réseau peut être évitée. Un FSS double couche conçu pour un réflecteur antenne est décrite dans [46] et se compose d'un écran transparent dans les bandes S-X- et Ku et réfléchissant en bande Ka, et un autre écran transparent en bandes S et Ku et réfléchissant en bande X.

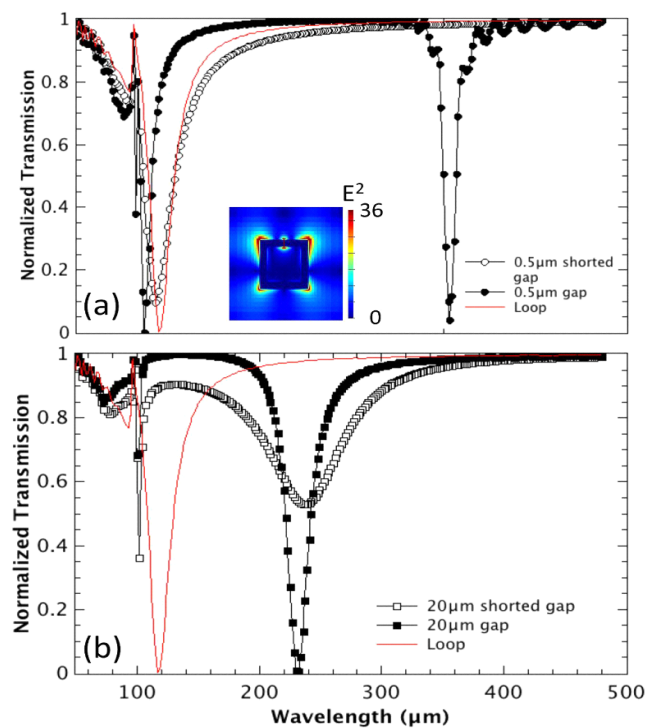
### II.2.2 FSS à une seule couche

La conception de FSS multi-bandes d'une seule couche nécessite d'organiser sur se superposer différents éléments avec une fréquence de résonance différente ou des éléments qui montrent fréquences de résonance multiples. Les principaux avantages de cette configuration en ce qui concerne les FSS empilées sont de faible poids, à volume réduit et à diélectrique limité pertes (pas besoin de séparateur entre les différentes couches). Cependant, la conception nécessite dans ce cas, une définition plus précise de la séparation entre les différents éléments : l'espacement devrait être assez grand pour accueillir les différents multi-résonants éléments, mais encore plus petits que la valeur correspondant à l'apparition des lobes du réseau [46].

### II.3 Active Fréquence Sélective Surface (AFSS)

Walter R. Buch Wald et al. ont publié un article [38] intitulé Active Frequency Sélective Surfaces dans le journal Progress In Electromagnétique Research en 2015. Dans cet article, les auteurs présentent un état de l'art sur les technologies AFSS, en mettant sur les travaux récents menés dans ce domaine.

La figure II.1 (a) illustre la transmission par un réseau de structures SRR court-circuitées et non raccourcies de 2deg avec une largeur d'écart SRR de 0,5 $\mu\text{m}$ . La suppression de la résonance SRR est vue avec le 0.5 $\mu\text{m}$  court ainsi que l'introduction de la boucle caractéristique résonance. La figure II.1 (b) illustre la transmission par un réseau de structure SRR 2 degrés court-circuitée et non raccourcie avec une largeur d'intervalle de 20 $\mu\text{m}$ . Ici, seule la suppression partielle de la résonance SRR est vue sans l'introduction de la résonance de boucle. La résonance caractéristique de la boucle est indiquée en rouge à des fins de comparaison.

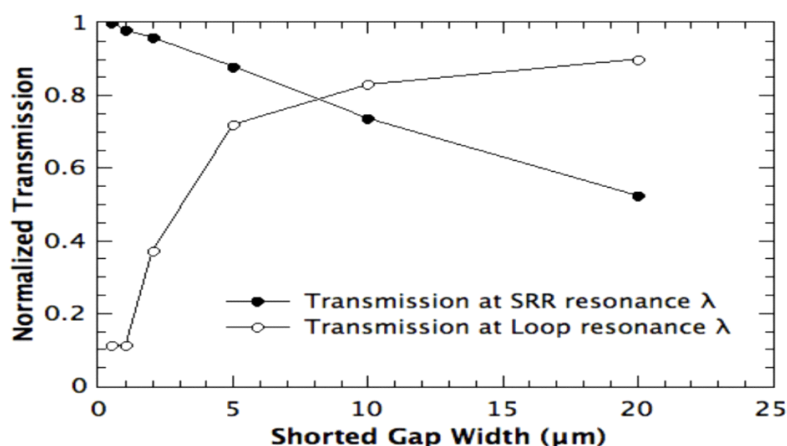


**Figure II. 1** Transmission par un réseau de structures SRR court-circuitées et non raccourcies.[38]

La figure II.2 illustre les valeurs de la transmission normalisées mesurées pour le résonateur SRR court-circuité de 2deg en fonction de la largeur d'écart SRR. Pour le SRR carré avec une



longueur de côté de 40mm, seulement à des largeurs d'écart inférieures à 1mm est suppression complète de la résonance SRR et l'introduction de la résonance de boucle.



**Figure II. 2** Valeurs de transmission normalisées mesurées pour le résonateur SRR court-circuité.[38]

L'article [39] publié dans la revue IEEE Transactions on Antennas and Propagation en avril 2021, par M. Pasian, M. Ettorre, A. Neto, S. Monni et G. Gerini, a pour objectif d'étudier les surfaces sélectives en fréquence (FSS) utilisées comme réflecteurs de fond à large bande pour les antennes. Dans cet état de l'art, Une série de simulations FDTD ont été présentées motivant l'utilisation d'un HEMT pour convertir la plasmon résonance localisée d'un SRR à celle d'une structure de boucle en court-circuitant efficacement l'écart SRR avec le 2deg de l'HEMT. Il a été constaté que la capacité de supprimer la résonance SRR caractéristique en faveur d'une résonance de boucle dépend de la fréquence de plasma de 2deg, de la géométrie SRR et de la largeur d'écart SRR. Pour une largeur minimale de  $0,5\mu\text{m}$ , une longueur latérale minimale de  $8\mu\text{m}$  a été trouvée pour permettre la suppression complète de la résonance SRR et l'introduction de la résonance de boucle. On s'attend à ce que les surfaces à fréquence sélective basées sur HEMT soient utilisées comme séparateurs de faisceau, réflecteurs actifs et modulateurs à des fréquences inférieures à celles correspondant au rayonnement IR à ondes longues.

En résumé, l'article de Buch Wald et al. Offre un état de l'art complet sur les technologies AFSS actives, en mettant en évidence les avantages, les inconvénients et les défis associés à cette technologie prometteuse. Les résultats expérimentaux présentés dans l'article montrent que l'AFSS active a un fort potentiel pour une large gamme d'applications, ce qui en fait un domaine de recherche en évolution rapide et d'intérêt croissant pour les scientifiques et les ingénieurs travaillant dans le domaine des ondes électromagnétiques

## II.4 FSS Multi-bande

L'article [40] propose une surface sélective en fréquence (SCFSS) miniaturisée et auto-complémentaire pour les applications du système mondial de navigation par satellite (GNSS). Ici, une structure en croix de Jérusalem en spirale en conjonction avec son ouverture complémentaire est gravée dans le dessus du substrat. Les résultats obtenus montrent que le SCFSS atteint une bonne stabilité angulaire pour différents angles d'incidence dans la plage de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  pour les polarisations TE et TM. En outre, la structure SCFSS proposée s'avère avoir une bonne propriété de polarisation sélective, un profil bas, une symétrie acceptable en bande passante et en bande stop.

La conception de la structure SCFSS proposée est présentée sur la figure II.3. La structure est conçue sur du roide RT 6010 avec  $\epsilon_r = 10,2$  et  $h = 1,27$  mm, avec une taille totale de  $L_{SC} \times L_S$  mm<sup>2</sup>. La structure SCFSS a une seule couche qui est gravée sur la face supérieure du diélectrique. Le soi-structure complémentaire est divisée en deux parties. La première, placée dans le demi-plan gauche du diélectrique, est la combinaison de la croix de Jérusalem et des structures en spirale. Cette combinaison atteint deux objectifs. En effet, l'utilisation de Jérusalem la structure croisée permet la création du multi-bande polarisation. De plus, l'intégration de la structure en spirale, dans la même cellule unitaire, permet la miniaturisation de la structure. En effet, la première partie a une taille très compacte avec  $L_{SC} \times L_{SC}$  mm<sup>2</sup>. La deuxième partie de la structure proposée, placée du côté droit du diélectrique, est une structure d'ouverture avec les mêmes caractéristiques que la première. C'est donc sa structure complémentaire de Babinet. Rappelons-nous que la structure en croix de Jérusalem en spirale est la solution pour créer un SCFSS miniaturisé avec séparation de polarisation multi bande.

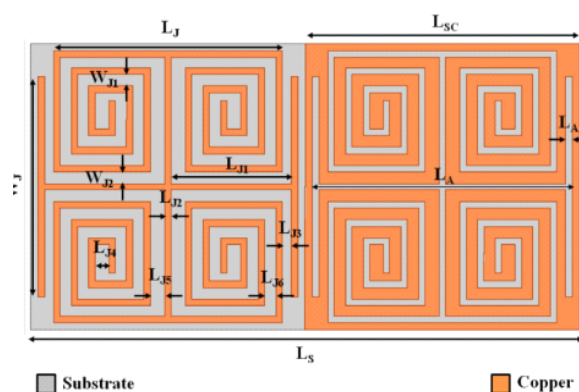


Figure II. 3 La structure SCFSS proposée pour les applications GNSS.[40]

Les résultats simulés sont réalisés en utilisant Studio CST (Computer Simulation Technology).  
 Les figures II.4, 5, 6 illustre ces résultats.

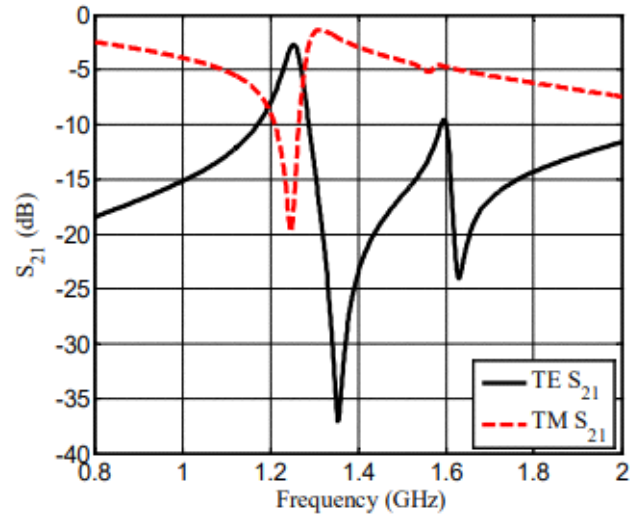


Figure II. 4  $S_{21}$  de la structure SCFSS proposée[40]

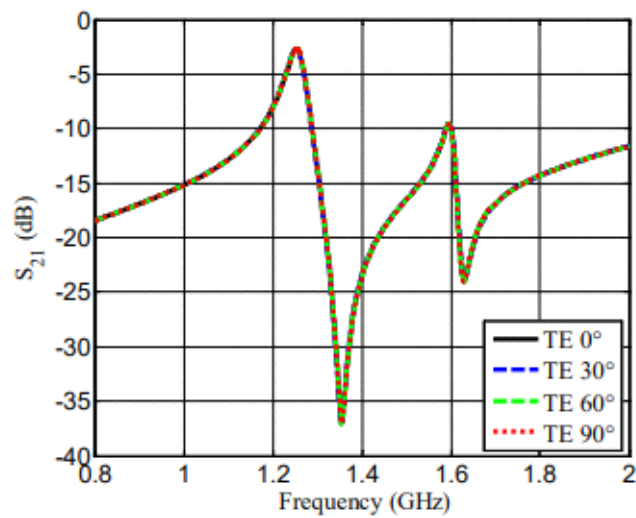
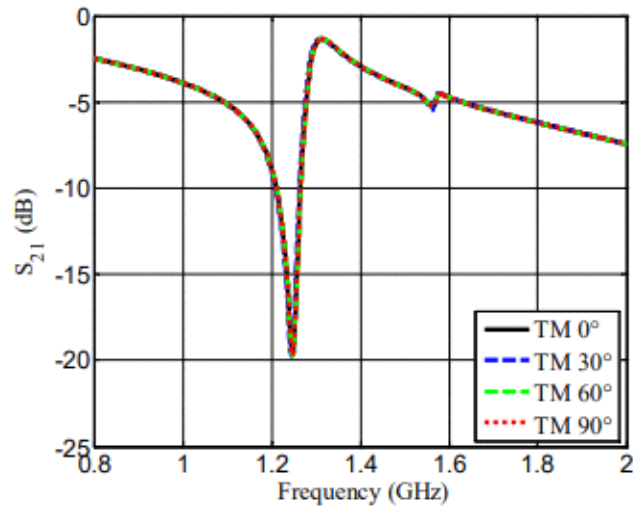


figure II. 5 Réponse de transmission des ondes polarisées TE avec différents angles d'incident ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $90^\circ$ ).[40]



**Figure II. 6** Réponse de transmission des ondes polarisées de MT pour différents angles d'incident ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $90^\circ$ ).[40]

Dans cet article, une auto-complémentaire miniaturisée de la surface sélective en fréquence, pour les applications GNSS, est conçue en utilisant une structure métallique en croix de Jérusalem en spirale à une seule couche et son ouverture Babinet complémentaire. La structure SCFSS proposée a une taille très compacte par rapport aux autres travaux précédents. Sa dimension est égale à  $LS \times LSC \times h$  mm<sup>3</sup>. De plus, la bande d'arrêt TM et la bande passante TE sont produites dans la plage de 1,2108 GHz à 1,2655 GHz correspondant à la bande GPS L2. La bande L1 pour les applications GPS sont choisies pour générer les secondes ondes polarisées pour la bande passante TM et la bande d'arrêt TE dans la plage de 1,29 GHz à 1,5895 GHz. Les résultats obtenus montrent que la structure proposée présente les meilleures performances en termes de polarisation, de stabilité angulaire et de symétrie de la bande.

Dans l'article [41], les auteurs proposent une méthode basée sur l'origami pour transformer une FSS statique à bande unique en une FSS dynamique à double bande. L'origami est un art japonais du pliage du papier, mais dans ce contexte, il est utilisé pour créer des structures pliables et flexibles qui peuvent changer leur configuration spatiale.

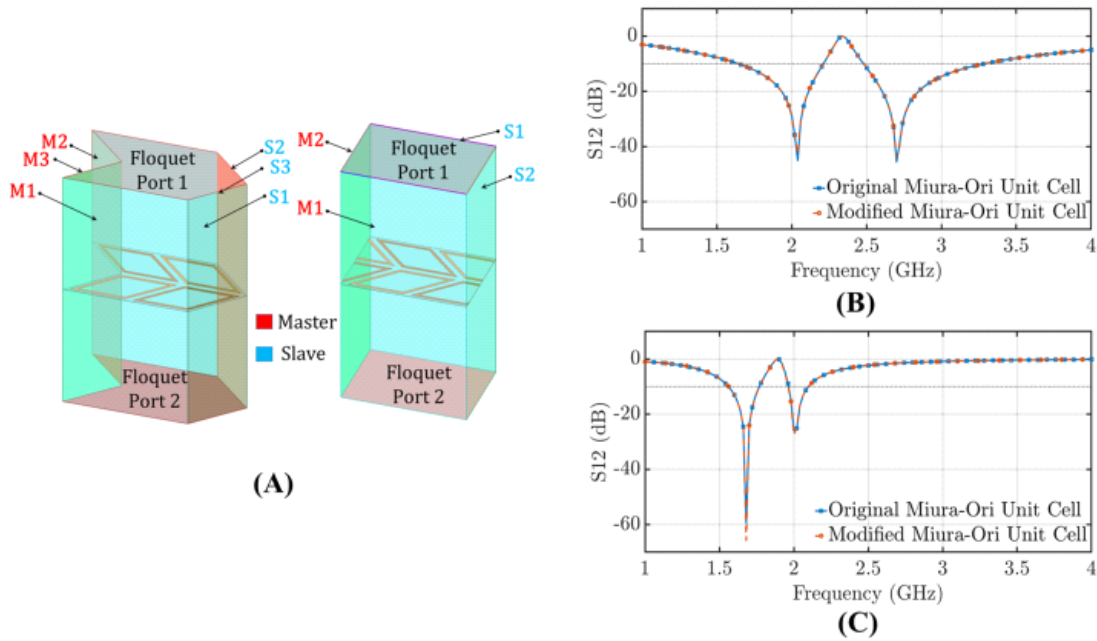


Figure II. 7 (A) Modèles numériques avec ports Floquet, (B) polarisation TE, (C) polarisation TM.[41]

On trouve sur la figure II.8 (A) coefficient du transmission pour les ondes incidentes polarisées de TE ; comme l'angle relatif entre les éléments change une seconde résonance apparaît. (B) coefficient du transmission pour les ondes incidentes polarisées de MT : comme l'angle relatif entre les éléments change une seconde résonance apparaît. (C) Cellule de la FSS à boucle carrée standard. (D) Cellule unitaire en origami de la FSS avec boucles carrées déformées conformes à la conception Miura-Ori  $\gamma = 80$ . (E) Cellule unitaire FSS en origami proposée avec boucles carrées déformées conformes à la conception Miura-Ori  $\gamma = 45$

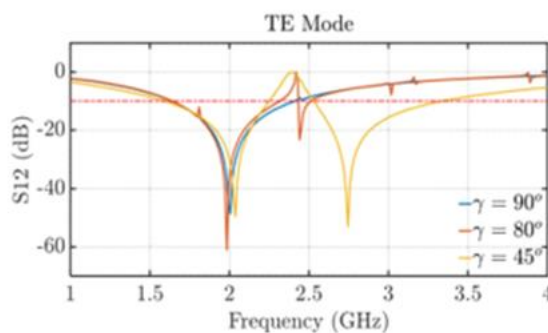


Figure II. 8 (A) La transmission coefficient pour les ondes incidentes polarisées de TE. [41]

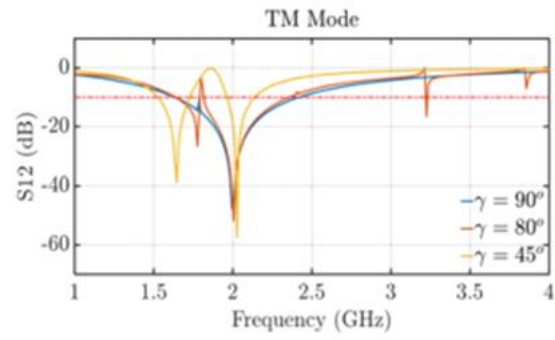


Figure II. 9 (B) La transmission coefficient pour les ondes incidentes polarisées de MT[41]

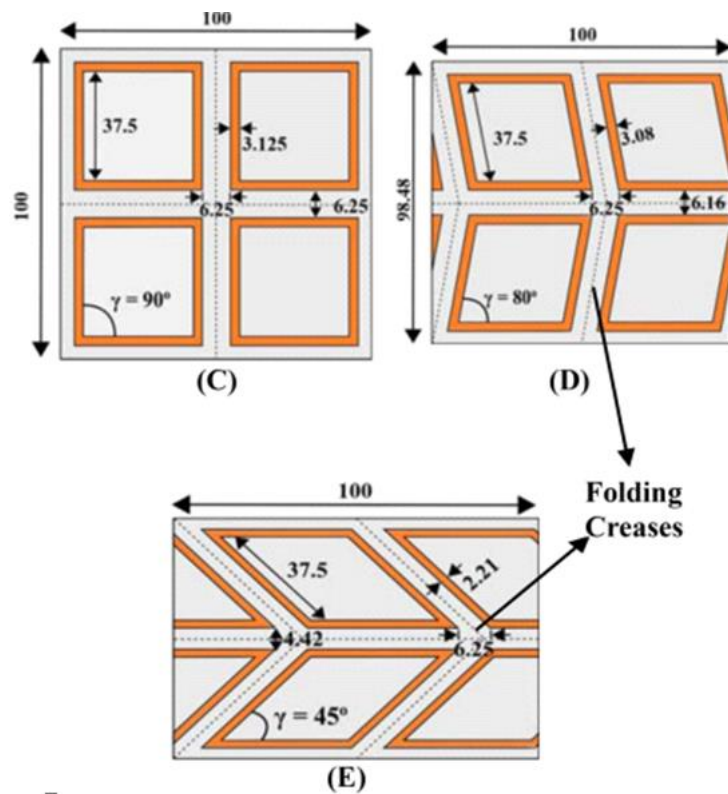


Figure II. 10 (C) Cellule de la FSS, (D) Cellule unitaire en origami avec boucles carrées déformées  $\gamma = 80^\circ$ , (E) Cellule unitaire FSS en origami avec boucles carrées déformées  $\gamma = 45^\circ$ [41]

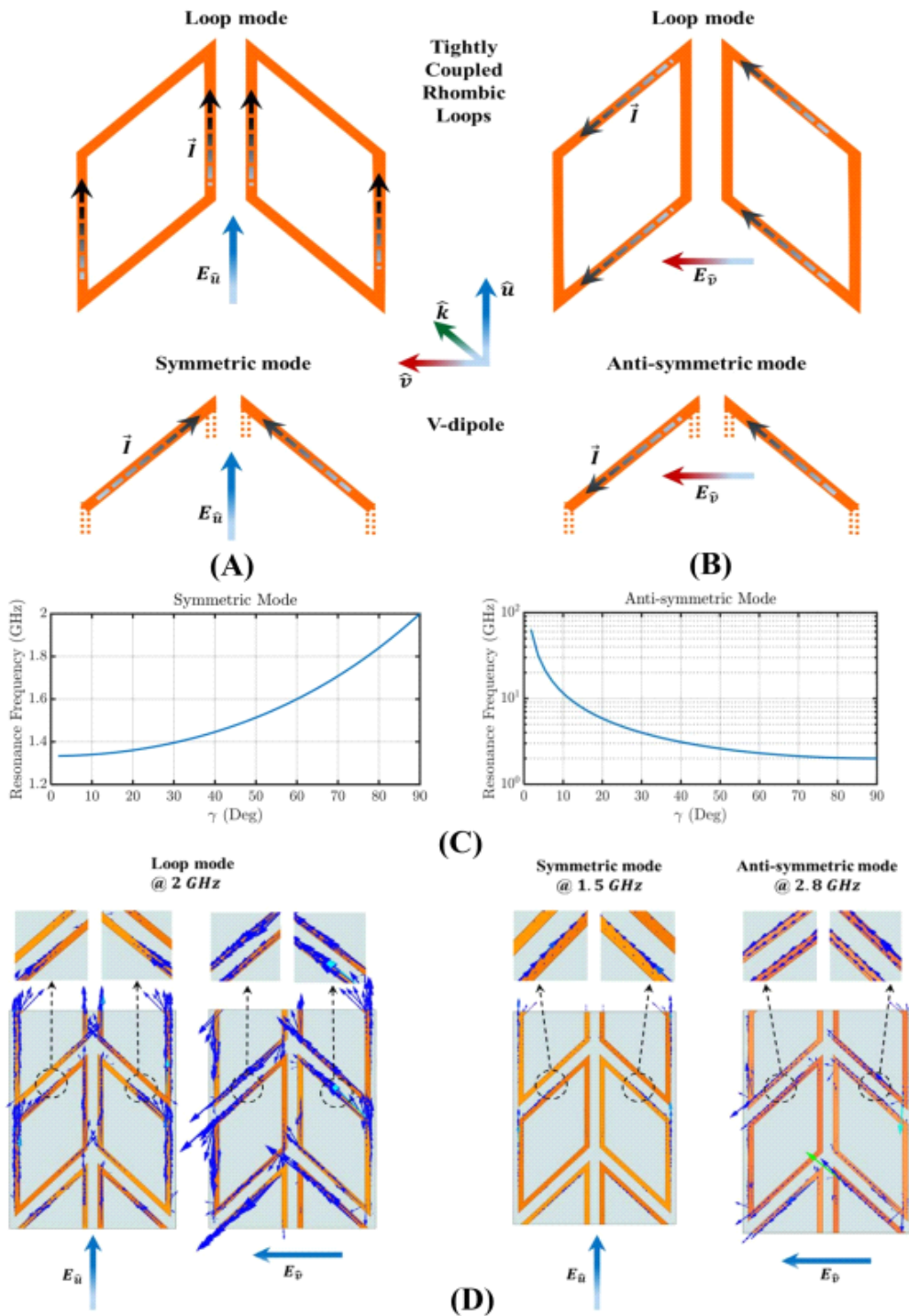


Figure II. 11 Distribution actuelle pour une onde d'impact [41]

La figure II.9 (A) illustre la petite distance entre les boucles rhombiques permet à leurs côtés inclinés de s'accoupler fortement et de créer une configuration V-dipôle. La figure II.9 (B) illustre la distribution de courant pour une onde impactante qui excite à la fois le mode boucle de premier ordre et le mode V-dipôle antisymétrique des deux boucles rhombiques étroitement couplées. La petite distance entre les boucles rhombiques permet à leurs côtés inclinés de

s'accoupler fortement et de créer une configuration V-dipôle. La figure II.9 (C) illustre la dépendance de fréquence résonante du dipôle en V en termes d'angle  $\gamma$  pour une onde d'impact  $E_u$  (gauche) et une onde d'impact  $E_v$  (droite), respectivement. La distribution actuelle des modes de boucle du premier ordre et des modes V-dipôle symétriques et antisymétriques basés sur une analyse propre aux fréquences correspondantes (La figure II.9 (D)). Les intensités actuelles des modes de boucle dominante sont, comme prévu, supérieures aux intensités actuelles des modes V-dipôle. Cela permet de passer d'une configuration à bande unique à une configuration à double bande, offrant ainsi une plus grande flexibilité dans la manipulation des ondes électromagnétiques.

L'article [42], traite de l'utilisation de la fréquence sélective Surfaces (FSS) pour augmenter le produit Efficacité  $\times$  Bande passante dans les réseaux d'antennes Ultra-Wide Band (UWB), dont l'efficacité est limitée par le rapport avant/arrière. Si le réflecteur arrière pour l'antenne est réalisée dans une solution plane métallique, son emplacement sera ne convient que sur une gamme de fréquences relativement limitée, en particulier si un balayage grand angle est requis. Afin d'étendre la gamme de fréquences d'utilisation, un FSS peut être pris en sandwich entre l'antenne et le plan de masse (figure II.12), fournissant un plan réfléchissant supplémentaire pour une bande de fréquences plus élevée. La possibilité d'intégrer dans l'antenne différentes fonctionnalités, sinon effectuée par plusieurs antennes, est également abordée dans l'article. La structure d'appui proposée se compose de la FSS et Le plan de masse a été conçu pour être utilisé en conjonction avec une antenne UWB composée d'un réseau de dipôles connectés. Un démonstrateur matériel de la structure de support a également été fabriqué et testé. Les résultats de simulation sont illustrés sur les figure II.13, 14 et 15.

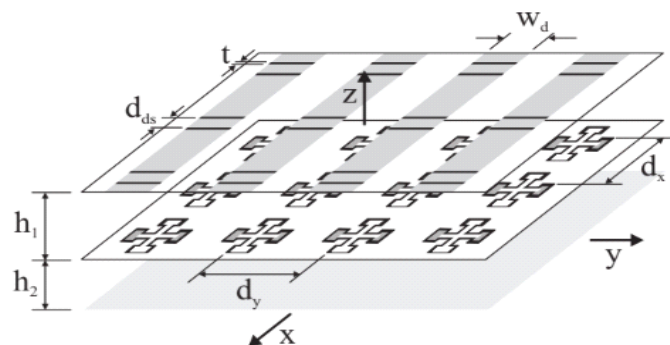


Figure II. 12 Vue 3D de la structure de l'antenne avec le FSS et le plan de masse.[42]



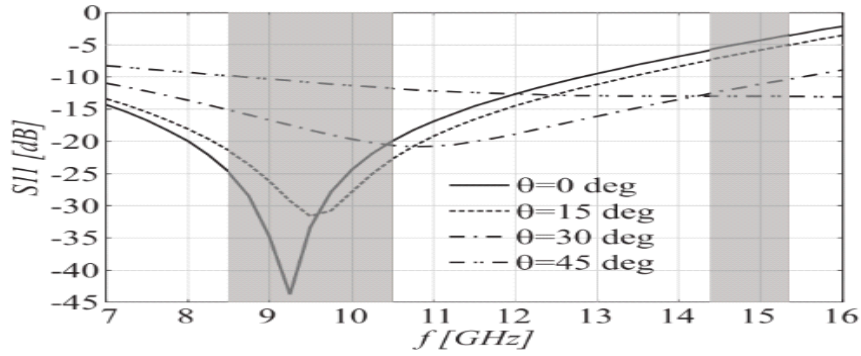


Figure II. 13 Magnitude du coefficient de réflexion actif du dipôle connecté à une antenne réseau avec le plan de masse.[42]

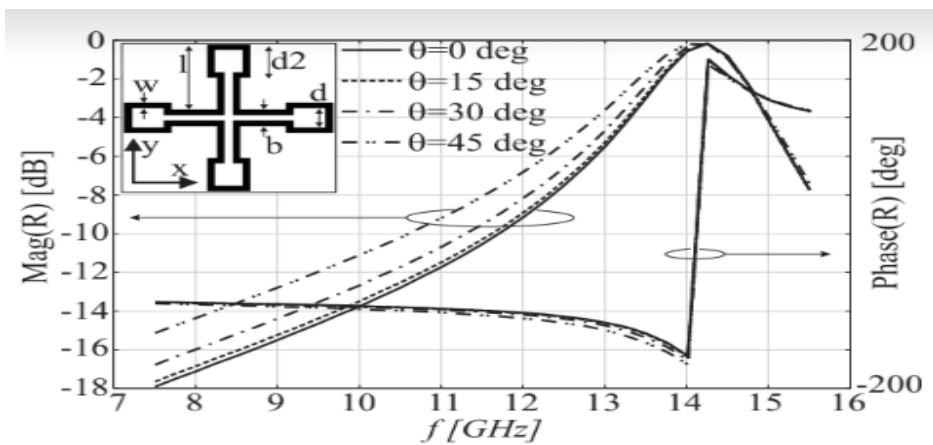


Figure II. 14 Magnitude et phase du coefficient de réflexion du FSS pour différents angles de balayage dans le plan y-z [42]

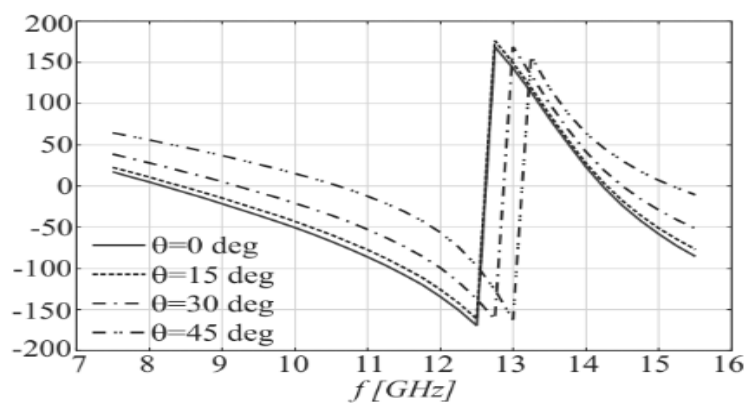


Figure II. 15 Magnitude et phase du coefficient de réflexion du FSS pour différents angles de balayage dans le plan y-z [42]

La structure FSS proposée dans l'article [43] consiste en trois couches séparées l'une de l'autre par deux substrats diélectriques minces, comme illustré sur la figure II.16 (a). Pour plus

de simplicité, seules quatre cellules unitaires sont présentées. La cellule unitaire est illustrée sur les figures II.16 (b) et (c). Sur la couche supérieure, chaque cellule contient deux boucles carrées concentriques avec différentes dimensions. La couche intermédiaire est une structure de grilles métalliques. Le fond calque a le même motif que celui du haut. Le F4B-2 avec rel-la permittivité active et la tangente de perte sont utilisé comme substrat. Tous les paramètres de conception sont également illustrés sur la figure II.16.

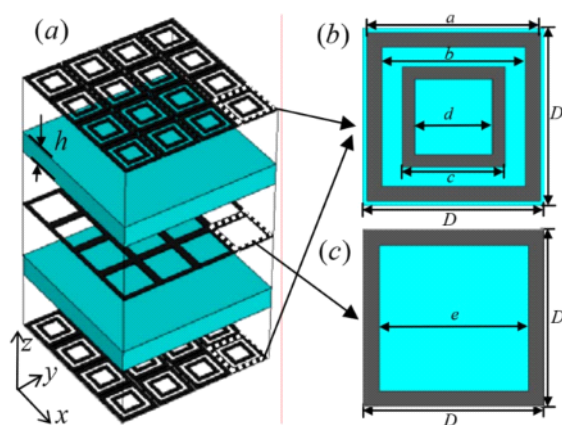


Figure II. 16 Géométrie du FSS proposé et de sa cellule unitaire.[43]

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les surfaces sélectives en fréquence qui inclue les différentes techniques utilisées pour la conception des FSS multi-bandes.

# **Chapitre III**

## **Étude et simulation FSS a double bande étroite**

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier, analyser et valider les résultats de simulation concernant la conception d'une FSS à double bande étroite proposée dans la référence [45]. Les résultats obtenus seront commentés et Par ailleurs, une étude paramétrique sera établie afin de montrer l'effet de certains paramètres de FSS sur ses principales caractéristiques.

### III.2 Présentation du simulateur CST WMS

Le logiciel CST Micro Waves studio (CST MWS) est un outil spécialisé pour la simulation 3D des composants à haute fréquence. Sa performance a fait de lui le premier choix en matière de technologie et de simulation. C'est un logiciel commercial qui calcule les champs électromagnétiques dans le domaine fréquentiel en résolvant localement les équations de Maxwell. Pour cela, il faut construire des objets en trois dimensions (3D) et leur assigner des caractéristiques (type de matériau, taille, épaisseur, ...). Il est ensuite nécessaire de spécifier le type de sources électromagnétiques. Il est possible de paramétrer le système et de faire varier ces paramètres lors de la simulation. Les résultats sont visibles sous forme de graphes ou de représentations dans l'espace. Un des intérêts de CST MWS est sa capacité à donner directement les paramètres S en fonction de la fréquence.

#### III.2.1 Cadre de propriétés (Floquet mode) :

**Modifier le port Floquet :** Spécifiez le port Floquet pour lequel les paramètres suivants sont valides.

**Nombre de modes Floquet :** définissez le nombre de modes Floquet qui seront pris en compte pour la simulation.

**Distance au plan de référence :** Spécifie la distance à votre plan de référence qui est ensuite utilisée pendant la simulation pour obtenir les informations de phase correctes pour les paramètres S (phase deemedbedding). Les valeurs positives déplacent le plan de référence vers l'extérieur, les valeurs négatives vers l'intérieur. La présomption pour les ports Floquet ne peut être définie qu'avant le calcul.

**Polarisation indépendante de l'angle de balayage phi :** La polarisation des modes Floquet est généralement donnée implicitement en fonction de l'angle de balayage phi. Si la case à cocher est activée, les modes fondamentaux TE (0,0) et TM (0,0) seront combinés linéairement de sorte que la polarisation du premier mode résultant soit alignée sur l'angle de polarisation donné (en degrés, par rapport à l'axe U du port, comme pour les ports de guide d'onde.) Cette

valeur de polarisation ne peut être définie qu'avant le calcul. Il s'applique à tous les ports Floquet si  $Z_{min}$  et  $Z_{max}$  existent. Veuillez noter que le second mode n'a pas nécessairement une polarisation qui entoure un angle de quatre-vingt-dix degrés par rapport à la polarisation du premier mode.

### III.3 Problématique

Les FSS multibandes peuvent être utilisés lorsque les canaux sont situés proches dans le domaine fréquentiel. Cependant, conventionnellement les structures multibandes ont des bandes de fonctionnement largement espacées. Certains de ces conceptions présentent des inconvénients en pratique. Le dégagement doit être très faible lorsque la bande est proche un espacement est nécessaire. Aussi dans grands panneaux FSS, les panneaux nécessiteront de nombreux chargements éléments qui limitent la fabrication. En plus, Le profil mince ou la propriété de structure légère prend une majeure importance notamment lorsque ces structures sont utilisées en blindage applications.

### III.4 Solution proposée

Pour surmonter ces problèmes, nous présentons un nouvel FSS double bande avec des bandes de fonctionnement rapprochées. La conception du FSS à double bande est réalisée à l'aide d'une fente en forme de U résonateur dans chaque pièce rapportée carrée. La cellule les dimensions sont  $0,146\lambda$ ,  $0,146\lambda$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde à la bande inférieure d'opération. En outre, la structure FSS conçue a une épaisseur globale très mince de  $0,022\lambda$  Par conséquent, le FSS conçu a un extrêmement mince profil, structure plus légère, taille réduite et conception simplifiée par rapport aux techniques précédentes des FSSs à double bande. La structure du FSS conçu a un second ordre à double bande caractéristique de passe-bande qui n'est pas sensible à l'angle de la vague incidente.

### III.5 Conception de cellule unitaire

Dans la référence [45] les auteurs ont proposé une conception FSS, résonateurs à fente compacte sont utilisés comme résonateurs électriques. Ces types de résonateurs sont plus adaptés aux conceptions FSS avec une bande passante de transition étroite ;

La géométrie générale du FSS à double bande étudiée y compris les paramètres de conception est présenté dans Fig. 1. Le réseau FSS est conçu sur un substrat ArlonDi clad 880, avec une permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) de 2,2, une tangente de perte de 0,0009 et une épaisseur  $h$  de

0,762 mm. Les totales longueurs de la cellule sont 5mm× 5mm dans le sens (x, y). Les dimensions de la structure illustrée à la Figure III.1 sont énumérés dans Tableau 1. Ils sont choisis pour la bande X caractéristiques. La structure du FFS s’intégrera alors correctement dans les brides du guide d’ondes de la bande X et activer l’utilisation système de mesure par guide d’ondes pour validation

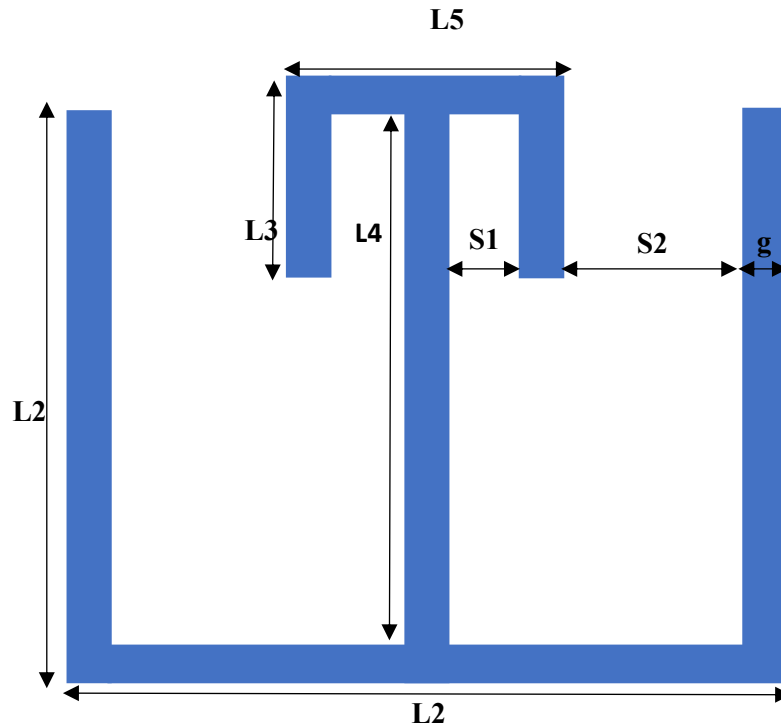


Figure III. 1 Géométrie de la structure FSS proposée.

La structure étudiée du FSS est indépendante de l’incident polarisation en raison de la rotation de 90° de la cellule

La structure proposée du FSS était en tant que structure périodique infinie sur le plan (x, y) dans les simulations CST. A cet effet, la limite conditions ont été appliquées sur les quatre côtés de la cellule. L’excitation d’onde plane avec l’incident différent angles a été utilisé.

Les tableaux III.1 et III.2 nous informe des dimensions géométriques de la structure FSS proposée et son cahier des charges.

Table 1 : Dimensions géométriques de la structure FSS proposée

L1	L2	L3	L4	L5	S1	S2	G
4.4 mm	4.4 mm	2mm	3.6mm	0.2mm	0.4mm	0.8mm	0.4mm

Table 2 : Cahier des charges du FSS conçu.

	Matériel	Épaisseur	Longueur et largeur	Positionnement
<b>Substrat</b>	ArlonDielad 880	0,762 mm	5mm× 5mm	Première couche
<b>Design</b>	Copper (annealed)	0	5mm× 5mm	Au-dessus du design

La figure III.2 représente la géométrie de la cellule unitaire sous CST.

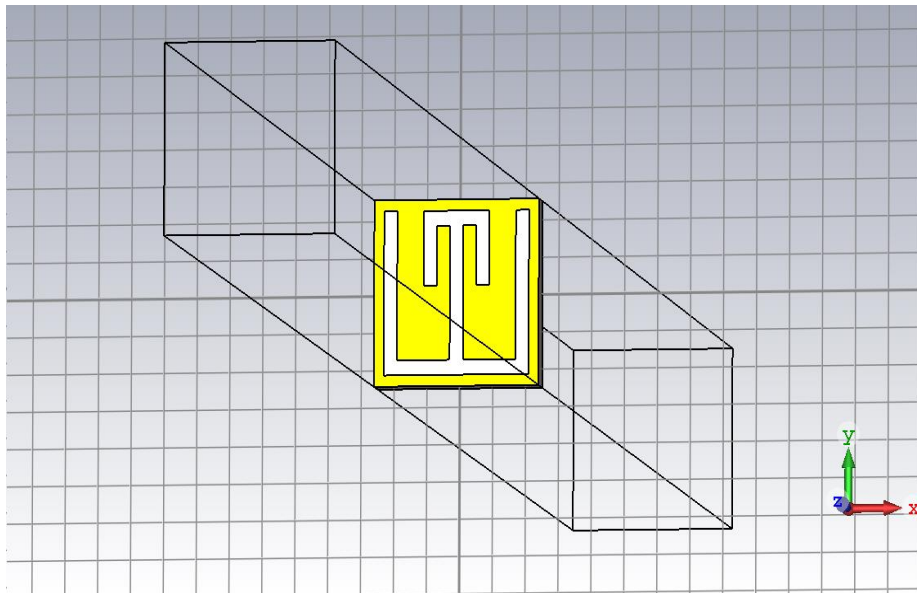


Figure III. 2 Topologie de la cellule unitaire.

Les principaux paramètres qui permettent d'évaluer et déterminer les performances d'un FSS sont le coefficient de réflexion, et coefficient de transmission, la largeur de la bande ou des bandes interceptées. La figure III.3 représente les résultats de simulation de chacun de ces coefficients.

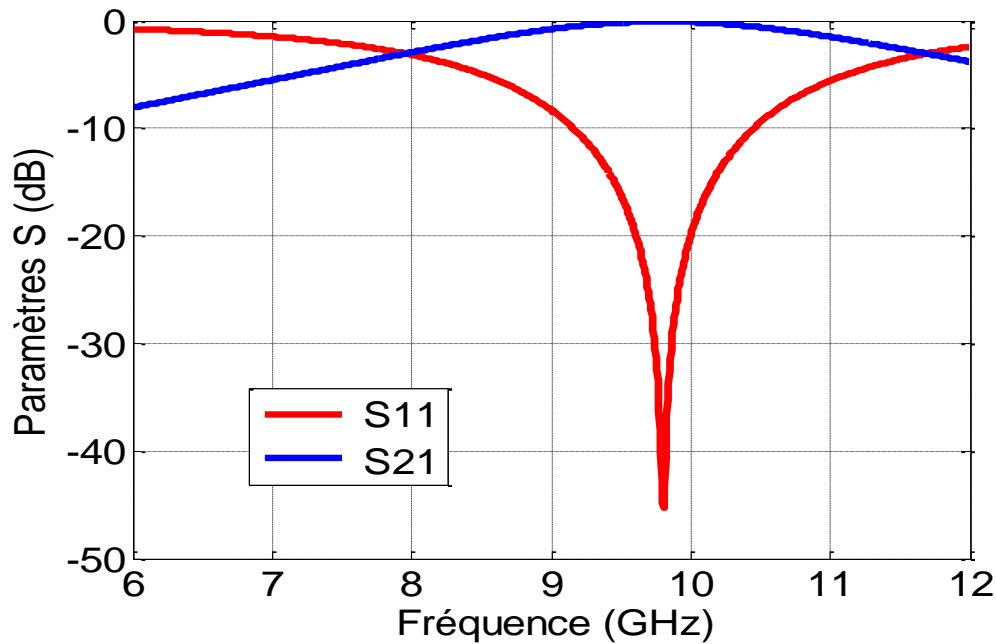


Figure III.3 Coefficient transmission et de réflexion incidence de la cellule unitaire.

D'après les résultats de  $S_{11}$  et  $S_{21}$  obtenus de la simulation de la cellule unitaire, on remarque une seule bande de fréquence de 9.16GHz à 10.449, sa bande passante est 1.289 GHz et sa fréquence de résonance est 9.80 GHz avec une adaptation de -45 dB. Alors que le coefficient de transmission est nul dans la fréquence de résonance.

### III.4 Conception de réseaux FSS

On commence par construire une cellule unitaire en utilisant les longueurs données dans le tableau III.1, en faisant 4 copies de cette dernière puis les mettre l'une à côté de l'autre, appliquant la rotation de  $90^\circ$  sur chaque cellule, on obtient la cellule principale. Ensuite, pour avoir la structure désirée, on crée 16 copies de la cellule principale et on les met l'une à côté de l'autre.

Figure III.4 et Figure III.5 Représente : Géométrie de la cellule principale et Topologie de la structure finale.



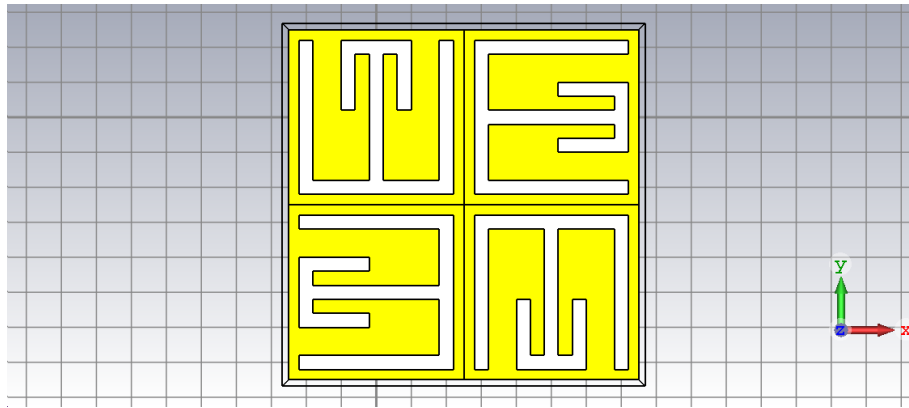


Figure III. 4 Géométrie de la cellule principale

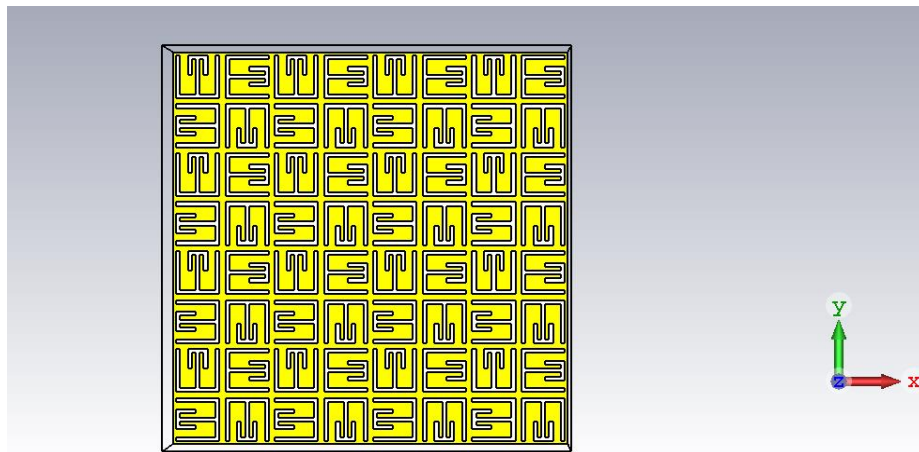


Figure III. 5 Topologie de la structure finale.

La figure III.6 représente les résultats de simulation du coefficient de réflexion et de transmission  $S_{11}$  et  $S_{21}$  de la structure finale.

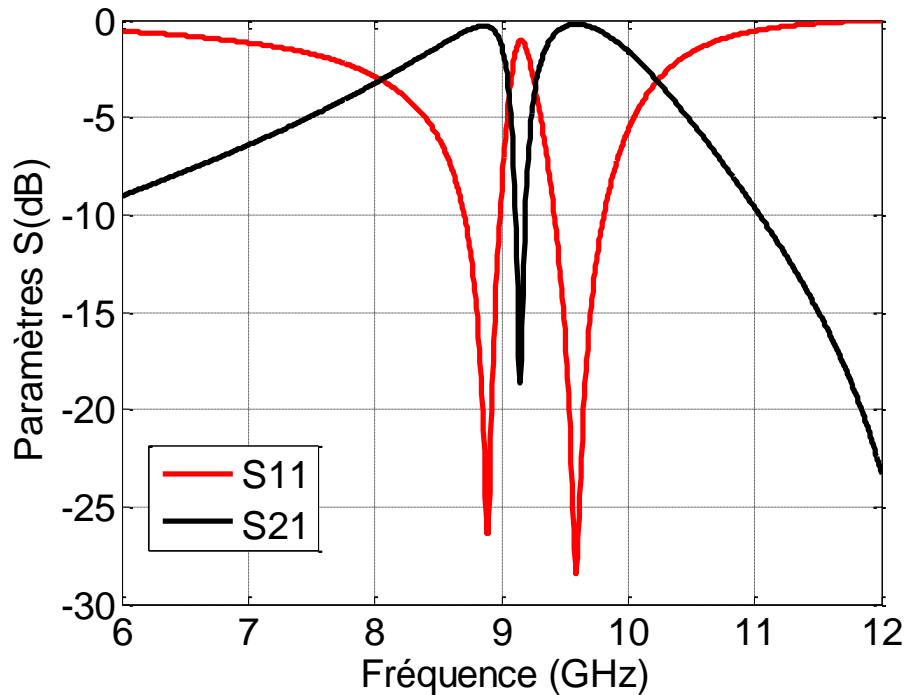


Figure III. 6 Coefficient de transmission et de réflexion de réseaux FSS.

En observant les résultats de simulation de la Phase simulée de transmission et de réflexion en incidence normale, pour  $S_{11}$  on a obtenu deux bandes qui sont, -26dB et -28dB pour les fréquences de résonance 8.9Ghz et 9.58Ghz, respectivement, ce qu'on peut considérer comme des très bons résultats, et pour le  $S_{21}$  on obtient une seule bande qui est -17dB dans la fréquence 9.16 Ghz mais qui est nul dans les deux fréquences de résonance obtenues dans le  $S_{11}$ .

### III.5 Etude paramétrique

#### III.5.1 Effet de certains paramètres sur le coefficient de réflexion et de transmission

##### - La taille de la cellule unitaire LT

Les figures III.7 et III.8 représente une comparaison entre les coefficients de transmission et de réflexion de la conception étudiée qui ont des différentes longueur L pour chacun des résultats obtenus.

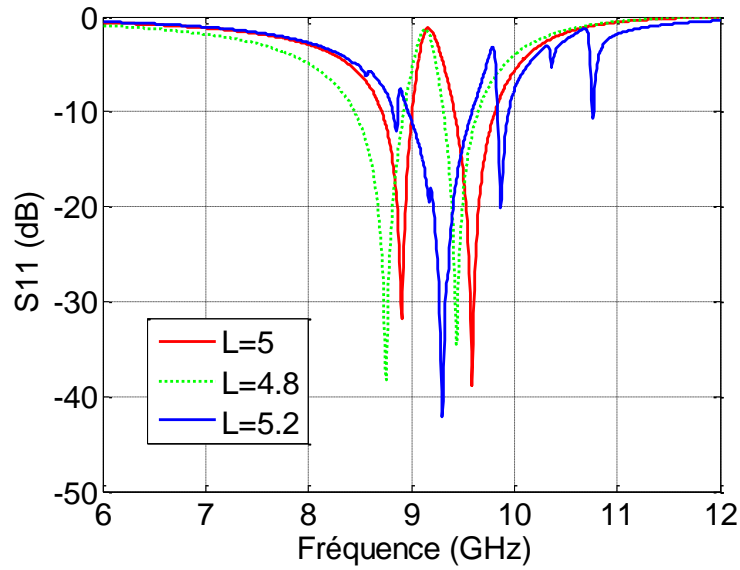


Figure III. 7 Effet de longueur LT sur  $S_{11}$ . Coefficient de réflexion S11 en Db

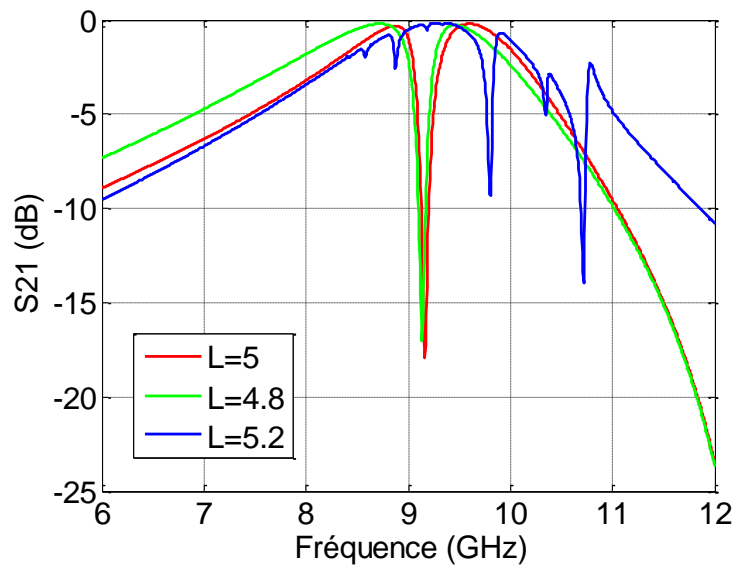


Figure III. 8 Effet de longueur LT sur  $S_{21}$ .

Dans les résultats de  $S_{11}$ , Les fréquences de résonance augmentent avec l'augmentation de la longueur  $L5$ , Mais elles diminuent quand cette devient 3mm. Alors que l'adaptation est différente pour chaque cas comme elle est représentée sur la figure ci-dessous.

Dans les résultats de  $S_{21}$ , la fréquence de résonance de  $L=4.8$ mm et  $L=5$ mm avec l'augmentation de  $L5$  et une nouvelle bande est créée, alors que l'adaptation augmente.

- **Matériel du substrat :**

Les deux figures suivantes III.9 et III.10 représentent une comparaison entre les coefficients de réflexion et transmission de la conception étudiée avec ceux qui ont des matériaux de substrat différents.

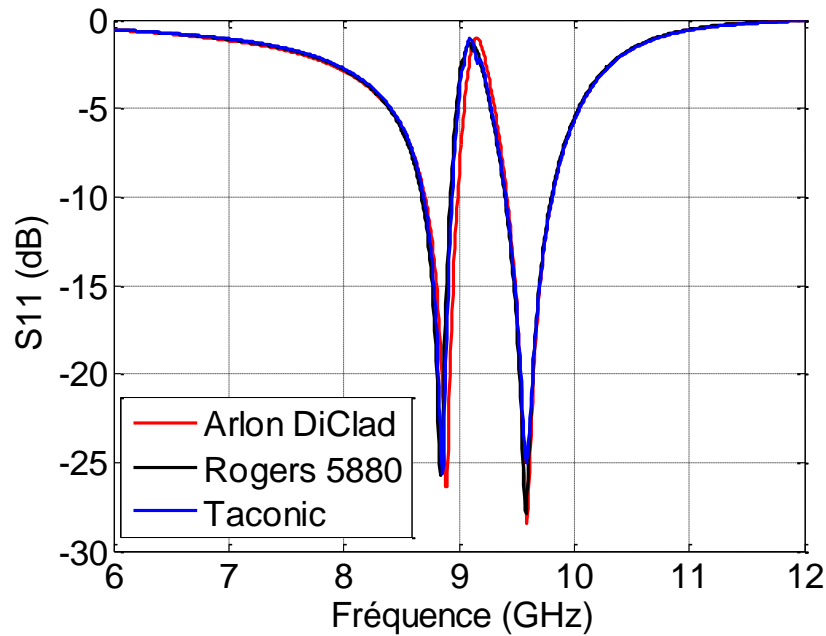


Figure III.9 Effet du matériel du substrat sur le  $S_{11}$ .

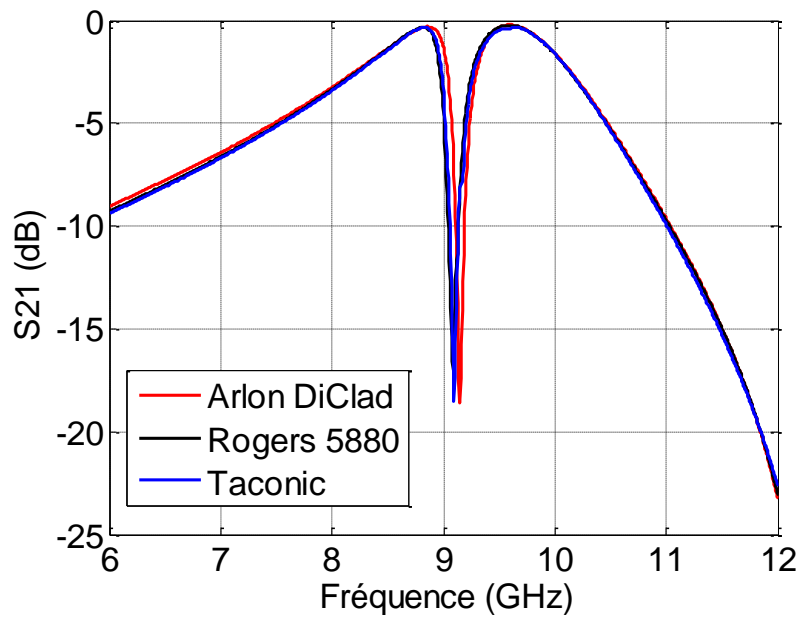


Figure III.10 Effet du matériel du substrat sur le  $S_{21}$ .

D'après les résultats obtenus, on observe que les trois courbes coïncident et qu'elles sont similaires l'une à l'autre.

- **La longueur L2 :**

La figures III.11 et III.12 représentent une comparaison entre les coefficients de réflexion et transmission de la conception étudiée avec ceux qui ont des longueurs L2 différentes.

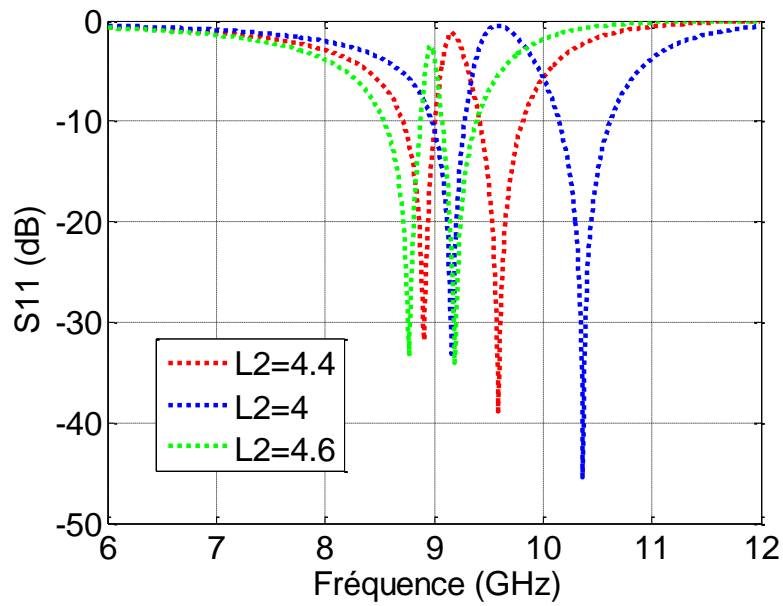


Figure III.11 Effet de la longueur L2 sur le  $S_{11}$ .

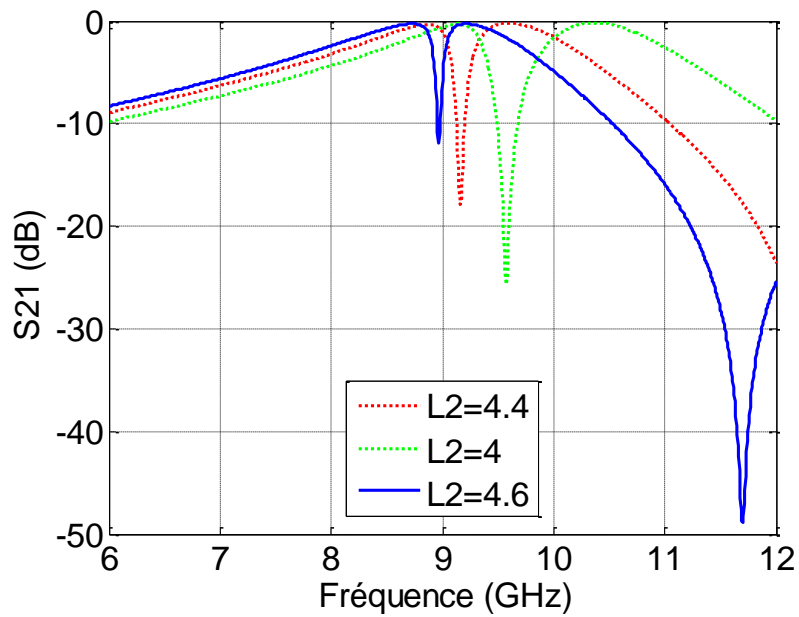


Figure III.12 Effets de la longueur L2 sur le  $S_{21}$ .

Dans les résultats de  $S_{11}$ , Les fréquences de résonance déplacent ou mouvant et l'adaptation diminuent avec l'augmentation de la longueur  $L_2$ .

- **La longueur  $L_3$  :**

La figures III.13 et III.14 font une comparaison entre les coefficients de réflexion et transmission de la conception étudiée avec ceux qui ont des longueurs  $L_3$  différentes.

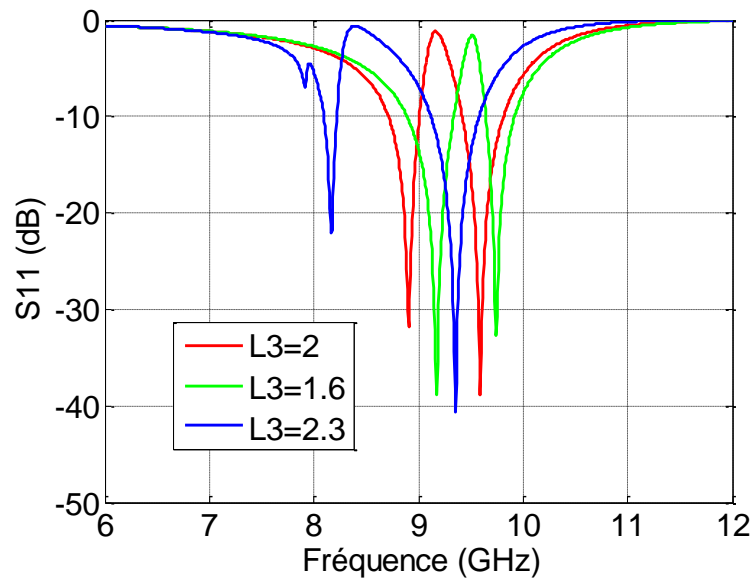


Figure III.13 Effet de la longueur  $L_3$  sur le  $S_{11}$ .

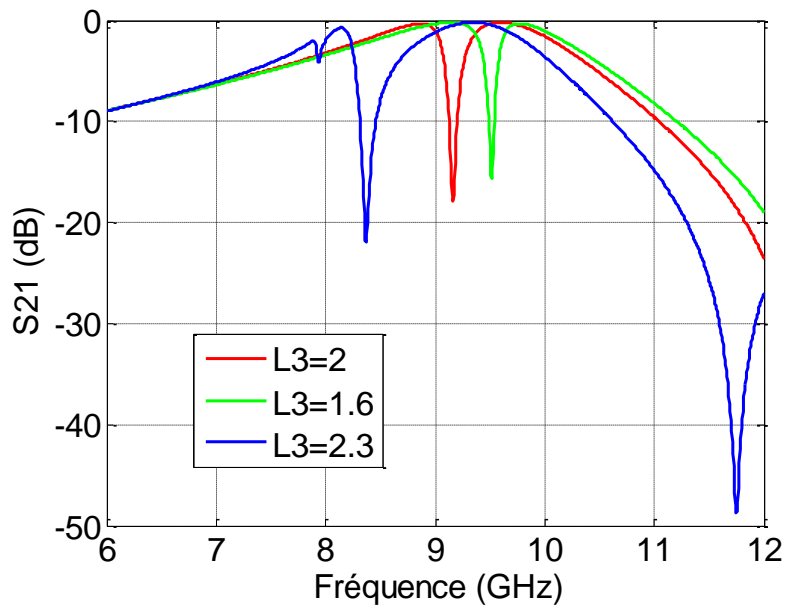


Figure III.14 Effet de la longueur  $L_3$  sur le  $S_{21}$ .

Dans les résultats de  $S_{11}$ , Les fréquences de résonance et l'adaptation diminuent avec l'augmentation de la longueur  $L_3$ .

- **La longueur  $L_5$  :**

La figures III.15 et III.16 font une comparaison entre les coefficients de réflexion et de transmission de la conception étudiée avec ceux qui ont des longueurs  $L_5$  différentes.

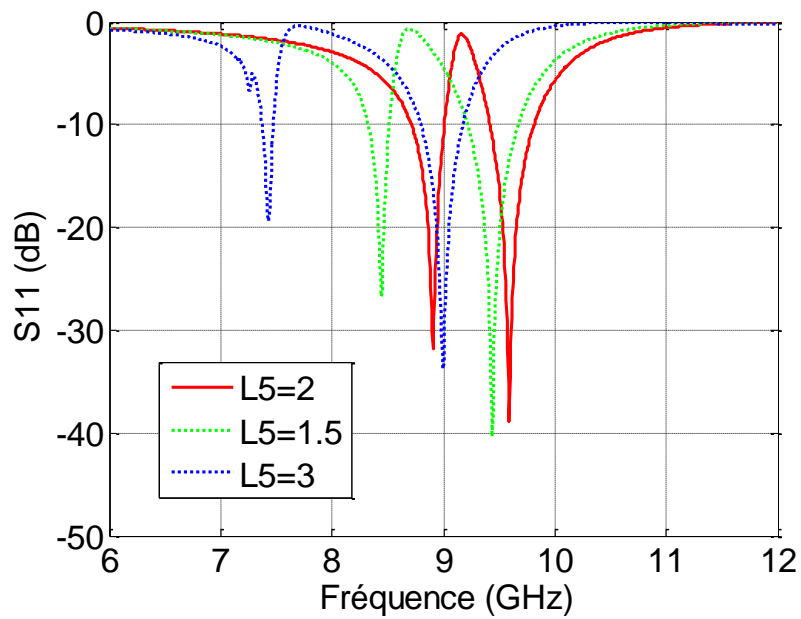


Figure III. 15 Effet de la longueur  $L_5$  sur le  $S_{11}$ .

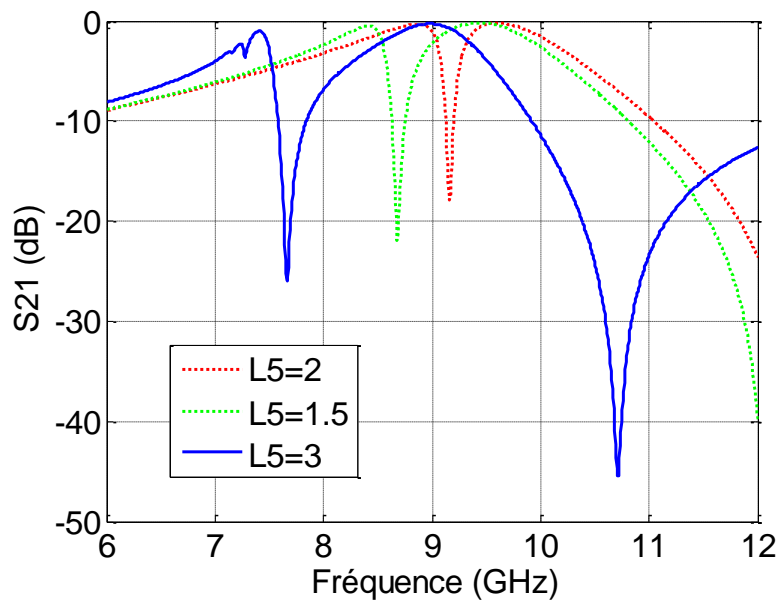


Figure III.16 Effet de la longueur  $L_5$  sur le  $S_{21}$ .

Dans les résultats de  $S_{11}$ , Les fréquences de résonance augmentent avec l'augmentation de la longueur  $L_5$ , Mais elles diminuent quand cette devient 3mm. Alors que l'adaptation augmente avec l'augmentation de  $L_5$  pour les trois cas.

### **III.6 Conclusion :**

D'après les résultats établis dans la simulation de cette FSS, et l'étude sur les paramètres dimensionnels et sur le matériel du substrat, on peut déduire que les données fournis dans la référence [45] sont choisis parfaitement.

Les effets de plusieurs dimensions sur Les performances de fréquence ont été étudiées. Les deux les simulations et les mesures montrent que le FSS étudiée fonctionne à 8,8 et 9,54 GHz

Nous avons obtenu une conception FSS à double bandes étroites avec des bonnes performances ; une très bonne adaptation, donc elle est effective pour faire aider les performances des autres éléments comme les antennes.



# ***Conclusion Générale***

## **Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude et l'implémentation d'une nouvelle structure FSS à double bande étroite basé sur des résonateurs à fente compacte en forme de U. La structure proposée fonctionne de manière sélective aux fréquences 8,8 et 9,54 GHz.

Les deux premiers chapitres ont fourni un aperçu sur les structures et les types des FSS ainsi que leurs réponses fréquentielles, ses motifs, ses paramètres de conception et ses applications. De plus, un état de l'art a été introduit sur un les techniques de conceptions des FSS active et les FSS multi band.

La structure FSS proposée a été implémenté et valider par des simulations et des mesures EM par l'utilisation du logiciel CST. Les effets de plusieurs dimensions sur la structure ont été étudié et discuter dans le dernier chapitre de ce mémoire.

Les résultats de simulation montrent de la structure FSS proposée fonctionne aux fréquences sélectives prévues (8,8 GHz et 9,54 GHz). En outre, les simulation EM montrer que l'FSS conçu a une réponse stable de transmission à l'incidence oblique de polarisation TE et TM. Cette structure sélectivité de fréquences, également appelée filtre sélectif en fréquence, peut être utilisée comme un dispositif ou un matériau pour filtrer ou bloquer sélectivement certaines fréquences de la lumière, des ondes radio, des ondes sonores ou d'autre formes d'onde électromagnétique.

Par rapport au FSS traditionnel à double bande, Ce FSS à double bande étroite a l'avantage d'être facile à fabriquer en utilisant des substrats issus de procédés de circuit imprimé standard. Ces caractéristiques permettent à cette structure FSS d'offrir des applications pratiques dans les systèmes de communication modernes.

# **LES REFERENCES**

**References:**

[1] E. B. Tchikaya , " Modélisation électromagnétique des Surfaces Sélectives en Fréquence finies uniformes et non-uniformes par la Technique par Changements d'Echelle (SCT)" ,14 Dec 2010.

[2] THÈSE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Présentée et soutenue par Romain Garnier Le 30 janvier 2013 Contribution à la résolution des équations de Maxwell dans les structures périodiques par

[3] Munk, B. A.: "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design", Wiley Inter science, 2000.

[5] Vardaxoglou, John C. "Frequency selective surfaces: analysis and design." (*No Title*) (1997).

[6] Nouveau bi-bande planaire étroitement espacé surface sélective en fréquence Publié dans IET Micro Waves, Antennes & Propagation Reçu le 17 septembre 2012

[7] Sievenpiper, D., Zhang, L., Broas, R., Alexopoulos, N, Yablonovitch, E.: "High Impedances electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band", IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, November 1999.

[8] THÈSE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE Présentée et soutenue par Romain Garnier Le 30 janvier 2013 Contribution à la résolution des équations de Maxwell dans les structures périodiques par

[9] B. A. Munk, Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York, NY, USA: Wiley, 2000.

[10] A. K. Rashid and B. Li, Z. Shen, "An overview of three-dimensional frequency-selective structures," IEEE Trans. Ant. Propag. Mag., vol. 56, pp. 43-67, Jun. 2014.

[11] SAIDI Raouia Thèse Contribution à l'étude des filtres planaires microondes à réseaux périodiques et/ou presque périodiques de patches perturbés par la méthode WCIP pour des applications à bandes larges et à double polarisations . Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd Faculté de Technologie Département d'Electronique .

[12] Gustavo Araújo Cavalcante, Développement de circuits planaires sur des substrats textiles, Thèse

De doctorat en génie électrique et informatique, Université fédérale de Rio grande de nord centre

De Technologie, Avril 2014.

[13] B. A. Munk, Finite Antenna Arrays and FSS, John Wiley & Sons, New York, 2003

[14] J. Thirumal Murugan and T. R. Suresh Kumar, "Frequency selective transparent front door for microwave-oven," Int. J. Elec & Electr. Eng & Telecoms, vol. 3, no. 3, pp. 120- 123, 2014.

[15] Knott, Eugene F., John F. Schaeffer, and Michael T. Tuley: Radar Cross Section. SciTech Publishing, Raleigh, NC, 2nd edition, 2004, ISBN 978-1-891121-25-8.[2] T. K. Wu, FrequencySelecti

[16] Kondo A., "Design and characteristics of ring slot type FSS", Electronics Letters, Vol. 27, No. 3, January 1991, pp. 240-241.

[17] Shaker J., Shafai L., "Removing the angular sensitivity of FSS structures using novel Double layer structures." IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 5, No.10, January 1995, pp. 324-325 (Erratum, Vol. 6, No. 1, 1996, p.58).

[18] Wahid M., Morris S.B., "Metal radomes reduced RCS performance", GEC Journal of Research, Vol. 9, No. 3, 1992, pp. 166-171.ve Surface and Grid Array, John Wiley and Sons, 1995

[19] B. A. Munk, Frequency Selective Surfaces: Theory and Design, Wiley Interscience, 2000

[20] Cahill R., Parker E.A., "Concentric ring and Jerusalem cross arrays as frequency selective Surfaces for a 45o incidence diplexer", Electronic Letters, Vol. 18 No. 8, April 1982, pp. 313-314.

[21] Parker E.A., Hamdy S.M.A., Langley R.J., "Modes of resonance of the Jerusalem cross in frequency selective surfaces", IEE Proceedings, Pt. H, Vol. 130, No. 3, April 1983, pp. 203-208..

[22] Mokhtar M.M., Parker E.A., "Conjugate gradient computation of the current distribution on a tripole FSS array element", Electronic Letters, Vol. 26, No. 4, February 1990, pp. 227-228.

- [23] Parker E.A., Antonopoulos C., Simpson N.E., “Microwave band FSS in optically transparent conducting layers: Performance of ring element arrays.” *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 16, No. 2, October 1997, pp. 61-63.
- [24] Lee C.K., Langley R.J., Parker E.A., “Compound Reflector Antennas”, *IEE Proceedings H*, Vol. 139, No. 2, April 1992, pp.13
- [25] Alfredo Gomes Neto et al, ‘Analysis of Frequency Selective Surface with U-Shaped Geometry’, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 14, SI-1, pp 113-122, July 2015
- [26] Thèse ETUDE DE NOUVELLES ANTENNES PLANAIRES ENTENANT COMPTE DES SURFACES SELECTIVES EN FRQUENCE , Mme. BELMESSAOUD Djaouida 14/06/2020 UNIV MSILA FREQUENCE
- [27] Mohammed Titaouine, Alfrêdo Gomes Neto, Henry Baudrand, Farid Djahli, ‘WCIP Method Applied to Active Frequency Selective Surface’, *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, Vol. 6, No.1, pp 1-16, June 2007.
- [28] Anderson, I., On the theory of self-resonant grids, *BSTJ*, AU:2 54(10), 1725–31, Dec.
- [29] 1975. 8. R. J. Lagley and A. J. Drinkwater, Improved empirical model for the Jerusalem cross, *IEE Proc. H* 129(1):1–6 (Feb. 1982)
- [30] R. Mittra, C. Chan, and T. Cwik, Techniques for analyzing frequency selective surfaces—a review, *IEEE Proc.* 76(23):1593–1615 (Dec. 1988).
- [30] . S. W. Lee, Scattering by dielectric-loaded screen, *IEEE Trans. AP*-19(5):656 (Sept. 1971).
- [31] J. A. Roden et al., Time domain analysis of periodic structures at oblique incidence: orthogonal and non-orthogonal FDTD implementations, *IEEE Trans. MTT*-46:420–427 (April 1998).
- [32] L. W. Henderson, Introduction to PMM, OSU/ESL Technical Report 715582-5, Feb. 1986.
- [33] FREQUENCY-SELECTIVE SURFACES TE-KAO WU Northrop-Grumman Redondo Beach, California
- [34] R. T. K. Jaldehag, P. S. Kildal, and B. O. Ronnang, “Dual-Band Reflector Feed System for Classical Cassegrain Radio Telescopes,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-41,

No. 3, pp. 325-332, Mar. 1993.

[35] P. Besso, M. Bozzi, M. Formaggi, S. Germani, M. Pasian, and L. Perregrini, "A Novel Approach for the Design of Dichroic Mirrors for Deep Space Antennas," 35th European Microwave Conference 2005 (EuMC 2005), Paris, France, October 3-7, 2005.

[36] P. Besso, M. Bozzi, M. Brenner, S. Junker, R. Maddue, L. Perregrini, and L. Salghetti Drioli, "Electrical and Mechanical Performance of a S/X/Ka-Band Dichroic Mirror," Proc. of 2000 European Microwave Conference, 2000.

[37] E. L. Pelton and B. A. Munk, "A Streamlined Metallic Radome," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-22, No. 11, pp. 799-803, Nov. 1974.

[38] T. K. Wu, "High Q Bandpass Structure for the Selective Transmission and Reflection of High Frequency Radio Signals," US Patent 5,103,241, 1992.

[39] H. Legay, "Mission pour les FSS dans une antenne spot mobile" Thales Alenia Space, Juin 2007.

[40] E. B. Tchikaya, "Modélisation électromagnétique des Surfaces Sélectives en Fréquence finies uniformes et non-uniformes par la Technique par Changements d'Echelle (SCT)", 14 Dec 2010.

[41] Active FSS

[42] "Frequency Sélective Surfaces for Extended Band width Backing Réflecteur Fonctions"

[43] Surface sélective de fréquence auto-composite miniaturisée pour Applications du GNSS

[44] Transformation du SFS statique à bande unique en FSS dynamique à double bande en utilisant l'origami :

[45] Surfaces sélectives en fréquence pour fonctions de réflecteur de support de bande passante :

[46] Un FSS bi-bande miniaturisé avec second ordre Réponse et séparation large bande

[47] A. G. D'Assunção Jr., "A New Proposal for Multiband Planar Antenna for Mobile Communications," in portugês, Master Dissertation, UFRN, Natal, 2007.

[48] Multi-band Frequency Selective Surfaces: Author(s) A. Fraartril.vjIa. M Sc Dr S. Monni  
Dr 1). Lckers N. Fiscantte. MSc August 2008