

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

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

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'électronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : TELECOMMUNICATION

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par

LARAIB ABDELGHAFOUR

DISSA AYOUB

Intitulé

*L'étude des antennes microondes ajustables à switches
MEMS*

Soutenu le : 10 Septembre 2023

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mme. Bendib Sarra</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme. Adoui Ibtissem</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme Melizi Nora</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2022/2023

Remerciement

الحمد لله الذي بنعمته
تم الصالحات

Nous tenons en premier lieu remercier ALLAH le tout puissant qui nous a donné le pouvoir, Le courage et la patience à l'élaboration de cette œuvre.

Un spécial remerciement à notre encadreur Dr ADON Ibtissem qui a supervisé ce travail.

Sans oublier nos familles, nos proches et nos amis qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire

En fin, nos remerciements les plus respectueux aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail.

Dédicace

À mes parents, mes frères et ma sœur et toute la famille pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices inestimables tout au long de ce voyage académique.

À mes amis et camarades de classe, pour les précieux moments de partage, de rire et d'encouragement qui ont rendu cette expérience mémorable.

À mes professeurs et mentors, pour leur inspiration, leurs conseils éclairés et leur dévouement à l'excellence académique.

À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, je vous adresse ma plus profonde gratitude.

Merci à tous ceux qui ont fait de ce voyage éducatif une aventure exceptionnelle. Ce mémoire est dédié à vous tous.

LARAIB ABDELGHAFOUR

Dédicace

*À ma famille, pour leur amour, leur soutien
inconditionnel et leur patience tout au long de cette
aventure académique.*

*À mes amis, pour les moments de détente, les
encouragements et la camaraderie qui ont rendu cette
période d'études inoubliable.*

*À mes professeurs et mentors, pour leur enseignement
précieux, leur inspiration et leur guidance tout au long
de mon parcours académique.*

*Merci à tous ceux qui ont rendu cette réalisation
possible. Cette dédicace est une reconnaissance de
votre soutien et de notre succès collectif.*

DISSA AYOUB

ملخص:

تتناول مذكرة الماستر هذه الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل، والتي أثار اهتمامًا كبيرًا، خاصة في مجال الاتصالات. يمكن لهذه الهوائيات تغيير خصائصها باستخدام مكونات نشطة مثل الثنائيات PIN ومفاتيح MEMS، وبالتالي التكيف معبيئتها. تركز الدراسة بشكل أساسي على الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل من حيث التردد. ويبدأ بتعريف الهوائيات بشكل

عام، ثم الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل، ويستكشف تقنيات إعادة تشكيل التردد. يتم عرض أمثلة على الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل، إلى جانب التصنيفات وطرق التصميم. تتضمن الدراسة تصميم وتوصيف هوائي متعدد النطاقات قابلًا لإعادة تشكيل التردد، بالإضافة إلى نمذجة الهوائيات باستخدام الثنائيات ومفاتيح MEMS. **الكلمات المفتاحية:** الهوائيات القابلة لإعادة التشكيل، التردد، الثنائيات PIN، مفاتيح MEMS

Abstract:

This Master's thesis examines reconfigurable antennas, which have aroused great interest, especially in telecommunications. These antennas can change their characteristics using active components like PIN diodes and MEMS switches, thus adapting to their environment. The study focuses mainly on reconfigurable antennas in terms of frequency. It begins by defining antennas in general, then reconfigurable antennas, and explores frequency reconfiguration techniques. Examples of reconfigurable antennas are presented, along with classifications and design methods. The study includes the design and characterization of a frequency reconfigurable antenna, as well as the modeling of antennas using diodes and MEMS switches.

Key words: reconfigurable antennas, PIN diodes, MEMS switches, frequency-reconfigurable antenna

Résumé :

Ce mémoire de Master examine les antennes reconfigurables, qui ont suscité un grand intérêt, en particulier dans les télécommunications. Ces antennes peuvent changer leurs caractéristiques en utilisant des composants actifs comme les diodes PIN et les switches MEMS, s'adaptant ainsi à leur environnement. L'étude se concentre principalement sur les antennes reconfigurables en termes de fréquence. Elle commence par définir les antennes en général, puis les antennes reconfigurables, et explore les techniques de reconfiguration en fréquence. Des exemples d'antennes reconfigurables sont présentés, avec des classifications et des méthodes de conception. L'étude comprend la conception et la caractérisation d'une antenne reconfigurable en fréquence, ainsi que la modélisation d'antennes utilisant des diodes et des commutateurs MEMS.

Mots clé : les antennes reconfigurables, diodes PIN, switches MEMS, antenne reconfigurable en fréquence

Sommaire

Sommaire

REMERCIEMENTS	
Dédicace.....	
Dédicace.....	
Resume.....	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abreviations	
Introduction générale	1

CHAPITRE 1: Généralités sur les antennes

1.1 Introduction	15
1.2 Définition d'une antenne	15
1.3 Les caractéristiques d'une antenne	15
1.3.1 L'impédance d'entrée	15
1.3.2 Diagramme de rayonnement	16
1.3.3. Angle d'ouverture	17
1.3.4 La polarisation	18
1.3.5 Taux d'onde stationnaire (TOS)	18
1.3.6 Directivité	19
1.3.7 Gain	19
1.3.8 Le coefficient de réflexion et la bande passante	20
1.3.9 Rendement	21
1.4 Les Différents types des antennes :	22
1.5 Conclusion	22

CHAPITRE 2 Les antennes reconfigurables

2.1 Introduction	25
2.2 Définition	25
2.3 Les caractéristiques des antennes reconfigurables	26
2.4 La nécessité de la reconfigurabilité :	26
2.5 Classifications des antennes reconfigurables :	27
2.5.1 La reconfiguration en fréquence :	27
2. 5.2La reconfiguration du rayonnement	28

2.5.3 La reconfiguration de polarisation	29
2.5.4 La reconfiguration composée	30
2.6 Les techniques de reconfigurabilité	31
2.6.1 Les Diode Varicap	31
2.6.2 Les Diodes PIN	32
2.6.3 Les RF MEMS	33
2.7 Simulation des antennes reconfigurable par l'utilisation des Diodes PIN	34
2.7.1 L'outil de simulation :	34
2.7.2 Modélisation de la diode PIN :	34
2.7.3 Conception d'une antenne a patch circulaire	35
2.7.3.1 La géométrie de l'antenne proposée	35
2.7.3.2 Le coefficient de réflexion	36
2.7.4 Conception d'une antenne reconfigurable par l'insertion des Diode PIN	37
2.7.4.1 La géométrie	37
2.7.4.2 Résultats de simulation de l'antenne reconfigurable en fréquence à 3 Diodes PIN.....	38
2.8 Conclusion.....	38
CHAPITRE 3 : Les antennes reconfigurables par Switches RF-MEMS	
3.1 Introduction	41
3.2 Définition	41
3.3 Les Micro-Commutateurs (Switches) MEMS	41
3.4 Principe de fonctionnement et implémentation du commutateur RF MEMS :	43
3.5 Modélisation des antennes reconfigurable utilisant les Switches RF-MEMS	44
3.5.1 La géométrie de l'antenne proposée.....	44
3.5.2 Modélisation du MEMS	45
3.5.3 Les résultats de simulation pour le coefficient de réflexion	46
3.6 Conclusion	62
Conclusion general	63
Bibliographies	64

Liste des figures

Liste des Figures

Figure 1-1: Représentation de l'impédance de l'antenne	16
Figure 1-2 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne	17
Figure 1-3 : Exemple de diagramme de rayonnement d'une antenne (antenne log-périodique).	17
Figure 1-4 : Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture	18
Figure 1-5 : les types de polarisation, linéaire (a), circulaire (b) et Elliptique (c)	18
Figure 1-6 : Signification de la directivité	19
Figure 1-7 : Exemple $ S_{11} $ d'une antenne en dB en fonction de la fréquence et représentation de la bande passante à -10dB	20
Figure 2-1 : schéma des types d'antennes reconfigurables [8].....	25
Figure 2-2 :Illustration de l'agilité fréquentielle	26
Figure 2-3 : La reconfigurabilité de fréquence en utilisant une antenne rectangulaire vue du dessus (a) et du dessous (b).....	26
Figure 2-4 : La reconfigurabilité du rayonnement en utilisant une antenne filaire à spirale carrée	27
Figure 2-5 : Antenne PASS de l'UCLA	28
Figure 2-6 :Les différentes techniques de reconfigurabilité.....	29
Figure 2-7 : Schéma équivalent d'une diode Varicap	30
Figure 2-8 :Schéma équivalent simplifié d'une diode PIN.(ON) Polarisation directe ; (OFF) Polarisation inverse.....	30
Figure 2-9 : (a) Antenne imprimée chargée par un stub coplanaire à base de MEMS(b) photographie de l'antenne.....	31
Figure 2-10 : Fenêtre de démarrage de simulateur HFSS	32
Figure 2-11 : Modèle de diode PIN et ses circuits équivalents pour les états ON et OFF.....	33
Figure 2-12 : l'antenne utilisée avec ses dimensions.....	34
Figure 2-13 : le coefficient de transmission en fonction de la fréquence pour la structure d'antenne initiale.....	35
Figure 2-14 :(a) Insertion des Diodes A, B et C. (b) Diode B dans HFSS	35
Figure 2-15:L'évolution du coefficient de réflexion pour les 8 états des Diodes PIN	37
Figure 3-1 : MEMS et son environnement.....	40
Figure 3-2 : Exemple de commutateur à contact latéral	41
Figure 3-3 : Commutateur série à contact capacitif	41
Figure 3-4 : Commutateur série à contact ohmique	42
Figure 3-5 : Le principe du commutateur RF MEMS utilise une paire de contacts métalliques (appelés source et drain) avec le contact mobile sur un faisceau en porte-à-faux (grille), qui est déplacé par une force électrostatique.	42
Figure 3-6 : Structure de l'antenne proposée	43
Figure 3-7 : Le coefficient de Réflexion en fonction de la fréquence après l'ajustement.....	44
Figure 3-8 : (a) La structure finale du l'antenne a quatre MEMS (M1, M2, M3 et M4) (b) MEMS 1 en gros plan avec ses dimensions.....	45
Figure 3-9 : Les résultats de simulations pour les 16 états des quatre Switches MEMS..	53
Figure 3-10 : L'ajustement des deux résonances ensembles	54

Figure 3-11 : Gain de la structure de l'antenne pour les tests 3, 4,5,6,11,14 te 15lorsque $\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$	55
Figure 3-12 : L'ajustement de la première fréquence de résonance	56
Figure 3-13 : Gain de la structure de l'antenne pour les tests 10 et 16 lorsque $\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$...	57
Figure 3-14 : L'ajustement de la deuxième fréquence de résonance.....	58
Figure 3-15 :Gain de la structure de l'antenne pour les tests 8 ,9 et 16 lorsque $\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$...	59

Liste des tableaux

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 : la différence entre les techniques de reconfiguration en fréquence.....	33
Tableau 2.2 : Chaque état de diode avec valeurs correspondantes des composants RLC.....	35
Tableau 2.3 : chaque état des diodes avec les changements survenus.....	38
Tableau 3.1 : chaque état des Switch MEMS avec les changements survenus.....	58

Liste des abréviations

Liste des Abréviations

PIN: photodiode intrinsèque

MEMS: (Micro-Electro-Mechanical Systems) - Systèmes Micro électromécaniques

RF: (Radiofrequency) Fréquence Radio

dB: Décibel

GHz: Gigahertz

TOS: Taux d'onde Stationnaire

WILAN :(Wireless Local Area Network) abréviation moins courante, généralement synonyme de Wifi

Wi-Fi: (Wireless Fidelity) Fidélité sans fil

GSM: (Global System for Mobile Communications) - Système Global pour les Communications Mobiles

ISM: (Industriel, Scientifique et Médical) Industriel, Scientifique et Médical

FET: (Field-Effect Transistor) Transistor à Effet de Champ

HFSS: (High-Frequency Structure Simulator) Simulateur de Structures en Haute Fréquence

3D: (Tridimensional) Trois-Dimensionnel

FEM: (Finite Element Method) Méthode des éléments finis

SOI: Silicium sur Isolant

SiO₂: Oxyde de Silicium

nH: Nano henry (unité de mesure de l'inductance, équivalant à un milliardième de henry)

pF: Picofarad (unité de mesure de la capacité électrique, équivalant à un millionième de farad)

Ohm : Ohm (unité de mesure de la résistance électrique)

Introduction générale

Introduction générale

Les antennes jouent un rôle fondamental dans la communication sans fil, qu'il s'agisse de téléphonie mobile, de réseaux Wi-Fi, de radars ou de satellites. Elles sont responsables de la transmission et de la réception des signaux électromagnétiques, permettant ainsi la connectivité essentielle dans notre monde moderne. L'évolution constante des technologies de communication exige des antennes toujours plus performantes et polyvalentes. C'est dans ce contexte que les antennes reconfigurables ont émergé comme une innovation significative.

Les antennes reconfigurables sont conçues pour offrir une flexibilité et une adaptabilité accrues dans leurs performances. Contrairement aux antennes conventionnelles, dont les caractéristiques de rayonnement sont généralement fixes, les antennes reconfigurables peuvent être ajustées pour s'adapter à diverses conditions de transmission ou de réception. Cette capacité à modifier leur comportement électromagnétique en temps réel les rend particulièrement précieuses dans les environnements où les conditions de communication sont changeantes ou difficiles.

Parmi les différentes technologies utilisées pour rendre les antennes reconfigurables possibles, les commutateurs MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) se sont avérés être une solution prometteuse. Les commutateurs MEMS sont de minuscules dispositifs mécaniques qui peuvent être activés ou désactivés électroniquement. Lorsqu'ils sont intégrés dans une antenne, ils permettent de modifier la configuration de l'antenne en ajustant la longueur, la forme, la fréquence de résonance ou d'autres paramètres critiques. Cette reconfigurabilité dynamique des antennes à l'aide de commutateurs MEMS permet d'optimiser la communication sans fil en temps réel, en adaptant l'antenne aux exigences spécifiques de la transmission ou de la réception.

Dans cette mémoire, nous explorerons en détail les antennes reconfigurables à l'aide de commutateurs MEMS, en examinant leur fonctionnement, leurs avantages et leurs applications potentielles. Nous mettrons en lumière les innovations actuelles dans ce domaine passionnant et les perspectives futures pour cette technologie qui continue de jouer un rôle crucial dans l'amélioration des systèmes de communication sans fil.

CHAPITRE 1

Généralités sur les antennes

1.1 Introduction

Les antennes jouent un rôle fondamental dans le domaine des communications sans fil et de la transmission des signaux électromagnétiques. Elles servent d'interfaces vitales entre les systèmes électroniques et le monde extérieur, en permettant la transmission et la réception des ondes électromagnétiques. Les antennes se trouvent partout, de nos téléphones mobiles à nos télévisions, en passant par les réseaux sans fil, les satellites et même les dispositifs médicaux.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les antennes d'une manière générale tout en mettant le point sur les caractéristiques des antennes, forme et dimensions et les différents types d'antenne.

1.2 Définition d'une antenne

Une antenne est un dispositif électromagnétique conçu pour transmettre ou recevoir des ondes électromagnétiques, telles que des ondes radio, des micro-ondes ou des signaux de télévision. Il se compose généralement d'un conducteur métallique ou d'un groupe de conducteurs métalliques pouvant émettre ou capter des ondes électromagnétiques dans une plage de fréquences spécifique. Les antennes peuvent être utilisées dans une grande variété d'applications, notamment la radiodiffusion, les télécommunications, la navigation et la surveillance.

1.3 Les caractéristiques d'une antenne

Les caractéristiques d'antenne sont des caractéristiques communes à tous les types d'antennes utilisées pour décrire leur fonctionnement. La théorie des antennes est basée sur le rayonnement causé par des charges ou des courants à la surface d'un conducteur. Voici quelques caractéristiques importantes :

1.3.1 L'impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne peut être définie comme la relation entre la tension et le courant traversant l'antenne ou en comparant les composantes pertinentes des champs électriques et magnétiques. Pour exprimer l'impédance d'entrée d'une antenne de Z_{ant} , il est possible de la décomposer en une partie réelle de R_{ant} et une partie imaginaire de X_{ant} , ce qui donne l'expression suivante : [12]

$$Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant}$$

$$R_{ant} = R_{pertes} + R_{ray}$$

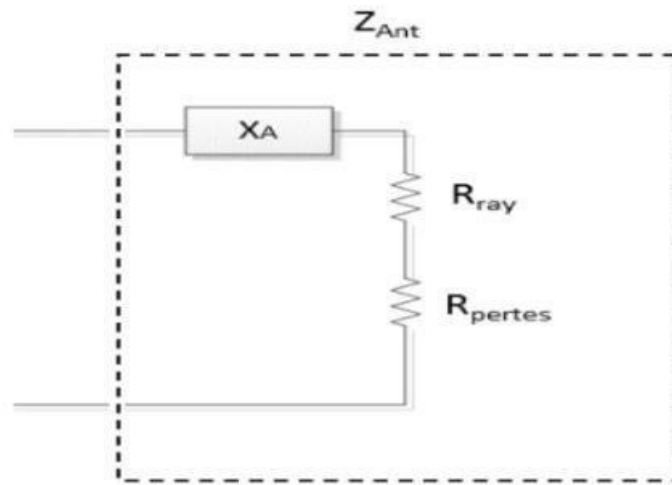


Figure 1.1: Représentation de l'impédance de l'antenne [10]

Afin de s'assurer que l'alimentation a correctement transmis la puissance à l'antenne, il est nécessaire d'avoir une impédance appropriée. Pour obtenir un transfert de puissance maximal, l'impédance de l'alimentation doit être égale à l'impédance appariée de l'antenne. Cependant, puisqu'elle dépend de la fréquence, la résistance d'entrée varie également avec la fréquence, et sa valeur est donnée par la formule suivante: [12]

$$Z_{ant} = Z_{c1} \frac{S_1}{S_{11}}$$

1.3.2 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement montre comment la puissance rayonnée par l'antenne change dans différentes directions de l'espace, indiquant les angles (θ_0, φ_0) où la puissance rayonnée est maximale. Pour représenter le diagramme de rayonnement, une fonction de rayonnement $r(\theta, \phi)$ est tracée, qui varie entre 0 et 1 selon la direction. Le diagramme de rayonnement peut être présenté sous différentes formes, comme le montre la Fig. 1.2. En général, le diagramme de rayonnement est représenté dans les plans horizontal ($\theta = 90^\circ$) et vertical ($\varphi = \text{constant}$), ou dans les plans E et H. [12]

$$r(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_0(\theta, \phi)}$$

$P(\Theta, \phi)$: puissance rayonnée dans une direction quelconque

$P_0(\Theta, \phi)$: puissance rayonnée max

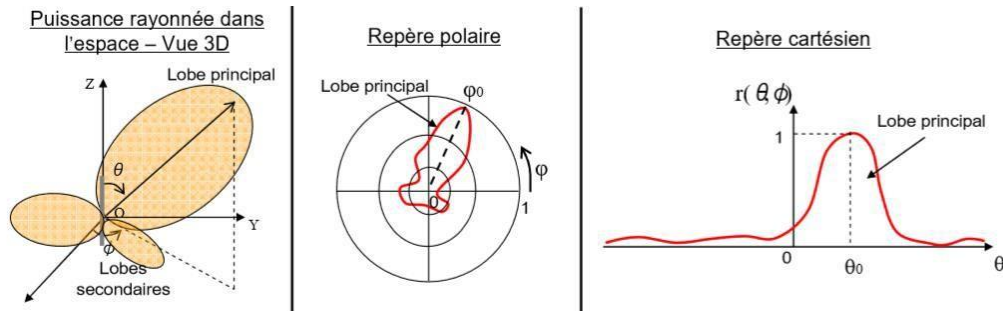


Figure 1.2 : Représentation du diagramme de rayonnement d'une antenne [10]

Le diagramme de rayonnement d'une antenne est principalement déterminé par sa géométrie, mais il peut également varier avec la fréquence. Les antennes ne rayonnent pas l'énergie uniformément dans toutes les directions de l'espace. Dans certains cas, la fonction de rayonnement est égale à 1, quelle que soit la direction considérée. En général, la puissance est concentrée dans un ou plusieurs « lobes », le lobe principal correspondant à la direction préférentielle du rayonnement. Les lobes latéraux sont souvent des lobes indésirables dans lesquels l'énergie rayonnante est perdue, il est donc souhaitable de les amincir. Pour éviter que ces lobes latéraux soient considérés comme nuisibles, il est généralement exigé que le niveau du premier lobe latéral soit inférieur de 20 dB à celui du lobe principal. [12]

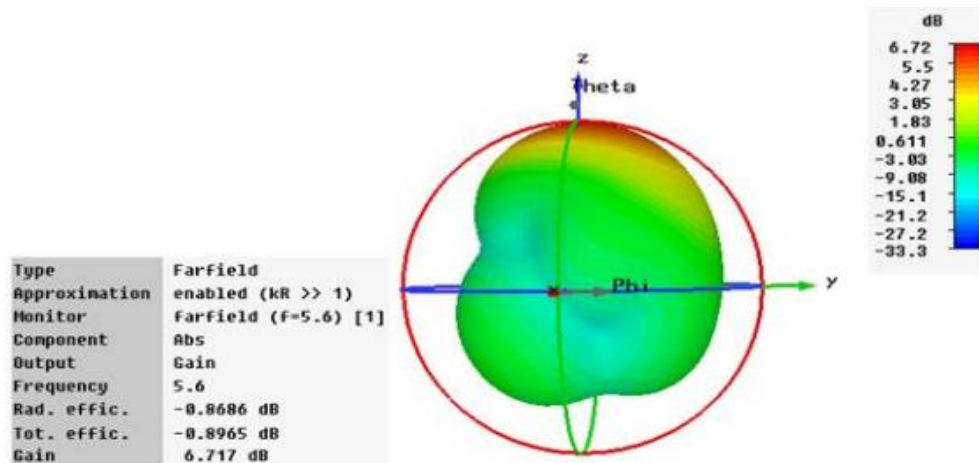


Figure 1-3 : Exemple de diagramme de rayonnement en 3D d'une antenne [12]

1.3.3. Angle d'ouverture

Le terme "angle d'ouverture" fait référence aux dimensions du lobe principal de l'antenne. L'angle d'ouverture de -3 dB décrit la zone où le plus d'énergie est libérée. Cet angle est défini

comme la différence angulaire entre les deux directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction du rayonnement maximal. [10]

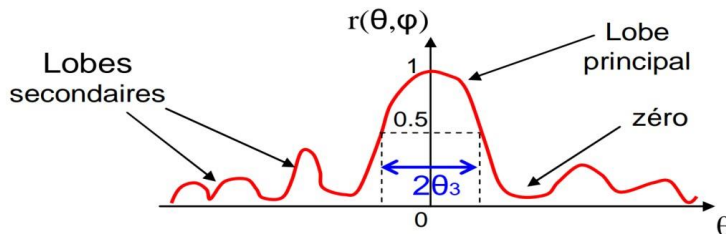


Figure 1.4 : Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture [10]

1.3.4 La polarisation

La polarisation de l'antenne est une propriété qui décrit comment la direction et l'amplitude du champ électrique rayonné par l'antenne changent au fil du temps. Cette différence est observée à partir de la direction de propagation du signal. La polarisation de l'antenne peut être décrite en examinant le chemin décrit par la fin du vecteur champ électrique dans le temps. La polarisation peut être linéaire, circulaire ou elliptique. [12]

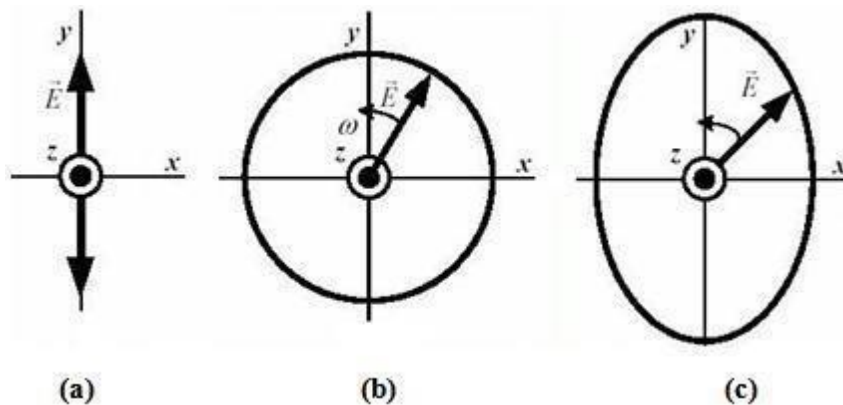


Figure 1.5 : les types de polarisation, linéaire (a), circulaire (b) et Elliptique (c)

1.3.5 Taux d'onde stationnaire (TOS)

En général, les lignes de transmission permettent aux ondes électromagnétiques de se propager dans les deux sens. Si la source, la ligne de transmission et la charge ont la même impédance, l'onde électromagnétique se propagera de la source à la charge sans perdre de

signal. Cependant, si la source a une impédance différente de celle des autres éléments de la chaîne de transmission, une partie de l'onde sera réfléchié lorsqu'elle touchera la charge et reviendra vers la source. Dans ce cas, les ondes réfléchies et incidentes se combinent pour former une onde stationnaire. [10]

1.3.6 Directivité

La directivité décrit les directions où la densité de puissance est supérieure ou inférieure à celle d'une antenne isotrope. Elle est calculée en comparant la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans une direction spécifique (θ, ϕ) avec la puissance qu'une source isotrope de référence rayonnerait par unité d'angle pour une même puissance totale rayonnée. [10]

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{\eta P_a}$$

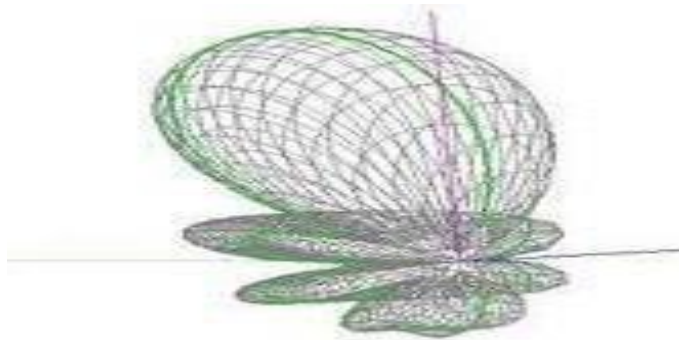


Figure 1.6 : Signification de la directivité [10]

1.3.7 Gain

Le gain G est défini comme le rapport entre l'intensité de rayonnement maximale F_{max} dans la direction principale et l'intensité de rayonnement F_{i0} , et correspond au facteur de directivité. Ce gain peut être obtenu par un radio-isotope sans perte de même puissance d'entrée que P_{t0} .

$$\Delta(\theta) = \frac{F_{F_{maxi0}}}{F_{i0}} \quad \text{Avec} \quad F_{i0} = \frac{P_{4\pi t0}}{4\pi}$$

Le rendement de l'antenne η est défini comme le rapport de gain à la directivité :

$$\eta = \frac{G}{D}$$

Pour une antenne avec un rendement $\eta = 100\%$, cela signifie que le gain et la directivité sont égaux.

Le gain et la directivité sont souvent exprimés sous forme logarithmique :

$$\frac{g}{dB} = 10 \log G \quad \text{Ou} \quad \frac{d}{dB} = 10 \log D$$

Contrairement aux règles et normes courantes, il est de pratique bien établie d'indiquer la référence avec une lettre supplémentaire après dB :

- dBi fait référence au radiateur isotrope.
- dBd fait référence au dipôle demi-onde.

Par exemple, la conversion suivante s'applique : 0 dBd \approx 2,15 dBi. [7]

1.3.8 Le coefficient de réflexion et la bande passante

Le coefficient de réflexion d'une antenne est défini comme le rapport entre l'amplitude de l'onde entrante et l'amplitude de l'onde réfléchie. Pour une antenne d'impédance Z_{ant} reliée à une source par une ligne ayant une impédance caractéristique Z_c , le coefficient de réflexion peut être déterminé comme suit :

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_{ant} - Z_c}{Z_{ant} + Z_c}$$

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

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log(S_{11})$$

Le coefficient de réflexion est un indicateur de la qualité du conditionnement de l'antenne, car plus le coefficient de réflexion tend vers zéro, meilleur est le conditionnement de l'antenne. La fréquence de résonance de l'antenne est souvent le minimum pour le coefficient de réflexion.

La bande passante ou bande passante d'une antenne peut être définie comme la gamme de fréquences pour laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil prédéterminé. Cette gamme de fréquence correspond également à la gamme de fréquence dans laquelle la transmission de puissance entre la source d'alimentation et l'antenne (ou entre l'antenne et le récepteur) dépasse un certain seuil.

La largeur de bande d'une antenne est souvent déterminée à partir de sa courbe de coefficient de réflexion, comme le montre la Fig. 1.7. [10]

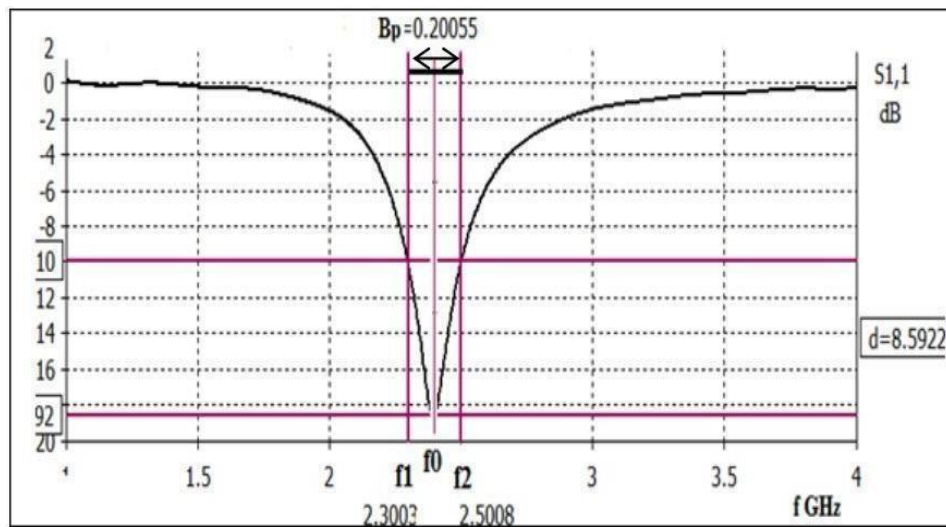


Figure 1.7 : Exemple $|S_{11}|$ d'une antenne en dB en fonction de la fréquence et représentation de la bande passante à -10dB [10]

La bande passante d'une antenne peut être déterminée à l'aide d'un critère couramment utilisé qui est de trouver la gamme de fréquences pour laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à -10dB ou -15dB. La figure ci-dessous montre la variation du coefficient de réflexion (S_{11}) en fonction de la fréquence, ainsi qu'une représentation de la bande passante correspondante [10].

$$BP = \Delta F = F_1 - F_2$$

1.3.9 Rendement

La puissance rayonnée P est généralement inférieure à la puissance d'alimentation P_a . Le rendement d'une antenne est alors défini comme étant le rapport de la puissance totale P qu'elle rayonne à sa puissance d'alimentation P_a . On la note η [10]

$$P$$

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

Et avec d'autre définition le rendement est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle que lui fournit l'alimentation. Elle est exprimée par : [10]

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_p}$$

R_r : Résistance liée a son rayonnement.

R_p : Résistance liée aux pertes de l'antenne.

1.4 Les Différents types des antennes :

Il existe de nombreux types d'antennes, chacun conçu pour répondre à des besoins de communication spécifiques en fonction de la fréquence de fonctionnement, de la direction du faisceau, de la polarisation et d'autres paramètres. Voici quelques-uns des types d'antennes les plus courants :

- Antenne dipolaire
- Antenne cornet
- Antenne à réflecteur parabolique
- Antennes de type Cassegrain
- Antenne à réseau de fentes
- Antenne imprimée

1.5 Conclusion

En conclusion, les antennes jouent un rôle essentiel dans notre monde de plus en plus connecté. Que ce soit pour les communications sans fil, la télévision, la radio ou même la recherche scientifique. Les antennes sont les interfaces clés qui permettent la transmission et la réception d'ondes électromagnétiques. Leur conception et leur optimisation sont cruciales pour assurer des communications fiables et efficaces. De plus, avec l'évolution constante de la technologie, les antennes continueront d'évoluer pour s'adapter aux besoins changeants de la société. Qu'il s'agisse de miniaturisation, d'amélioration des performances ou d'intégration dans des dispositifs de plus en plus compacts. Les antennes joueront un rôle central dans la façon dont nous restons connectés et partageons l'information à travers le monde

CHAPITRE 2

Les antennes reconfigurables

2.1 Introduction

Les antennes reconfigurables sont des composants essentiels dans les systèmes de communication sans fil. Elles offrent la possibilité de modifier leurs caractéristiques de rayonnement pour s'adapter aux besoins spécifiques d'une application donnée. Grâce à leur flexibilité, elles peuvent améliorer la qualité des signaux

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps définir les systèmes reconfigurables et les antennes reconfigurables. Ensuite, nous présenterons les techniques utilisées pour obtenir la reconfigurabilité en fréquence, en diagramme de rayonnement et en polarisation.

La dernière partie de ce chapitre détaille le principe de reconfigurabilité appliqué aux antennes par l'utilisation des Diodes PIN.

2.2 Définition

Une antenne qui peut modifier ses caractéristiques de fonctionnement, telles que la fréquence opérationnelle, la bande passante, la polarisation et le diagramme de rayonnement, après sa fabrication est appelée antenne reconfigurable. Elle peut être modifiée de manière dynamique en utilisant des matériaux commandables tels que des ferrites ou des cristaux liquides, ou en apportant des modifications mécaniques à ses paramètres électriques ou optiques. Cette flexibilité permet à l'antenne de s'adapter aux changements environnementaux et aux contraintes des systèmes de communication, en temps réel.

L'agilité des paramètres peut être envisagée par l'utilisation de composants discrets commutables ou accordables (diodes PIN, RF MEMS, diodes varicap, commutateurs photoconducteurs...), l'intégration de matériaux commandables (ferrites, cristaux liquides) ou par une modification de la structure physique de l'antenne.

L'utilisation d'antennes reconfigurables est en forte croissance, en particulier dans les télécommunications sans fil telles que les réseaux mobiles. Ces antennes offrent une grande flexibilité, ce qui permet d'optimiser l'utilisation des ressources fréquentielles. Les antennes patch reconfigurables sont particulièrement attrayantes pour les applications sans fil en raison de leur simplicité, de leur légèreté, de leur compatibilité avec les processus de fabrication et d'intégration. Elles sont couramment utilisées dans les petits appareils électroniques tels que les téléphones cellulaires, les tablettes et les ordinateurs portables. [2]

2.3 Les caractéristiques des antennes reconfigurables

Les caractéristiques d'une antenne ajustable peuvent varier en fonction de sa conception et de son utilisation spécifique. Cependant, voici quelques caractéristiques communes que l'on peut trouver dans une antenne ajustable :

- **Réglable** : L'antenne est conçue pour être ajustable en longueur ou en forme afin de s'adapter aux différentes fréquences.
- **Polyvalente** : L'antenne peut être utilisée pour plusieurs applications différentes, ce qui peut inclure la réception de signaux de radio ou de télévision, la transmission de signaux de données ou la communication sans fil.
- **Portable** : Certaines antennes ajustables sont conçues pour être facilement transportables, ce qui les rend pratiques pour une utilisation en déplacement.
- **Facile à utiliser** : Les antennes ajustables sont souvent conçues pour être faciles à utiliser, avec des mécanismes simples pour ajuster la longueur ou la configuration de l'antenne.
- **Performante**: Les antennes ajustables sont souvent conçues pour offrir des performances optimales dans les différentes conditions d'utilisation, telles que les interférences électromagnétiques, les obstructions ou les environnements changeants.

2.4 La nécessité de la reconfigurabilité

Les antennes imprimées sont largement utilisées dans les communications mobiles, notamment dans les téléphones portables, les tablettes et les ordinateurs portables. Cependant, ces antennes sont conçues pour fonctionner sur une seule gamme de fréquences, ce qui limite leur capacité à prendre en charge différents services tels que le WIFI, le WLAN et le GSM. L'utilisation de plusieurs antennes pour un seul dispositif n'est pas pratique. La solution consiste à utiliser des antennes capables de changer de gamme de fréquences selon les besoins de l'utilisateur. Cette capacité est appelée reconfigurabilité.

Les antennes reconfigurables offrent un niveau de flexibilité supérieur aux antennes patch simples, dont les paramètres et caractéristiques sont fixes et immuables. Les antennes reconfigurables permettent de régler la fréquence de fonctionnement, de modifier la bande de fonctionnement, de filtrer les signaux indésirables et de diriger le lobe principal dans une direction préférée. Cette capacité accrue des réseaux mobiles à travers la diversité spatiale fournie par ces types d'antennes constitue un avantage significatif. [2]

2.5 Classifications des antennes reconfigurables

Le classement des antennes reconfigurables se base sur des types, selon la fonctionnalité on distingue trois grandes catégories :

- Antennes agiles en fréquence.
- Antennes agiles en polarisation.
- Antennes agiles en diagramme de rayonnement.
- La combinaison de deux fonctionnalités ou plus reste possible (hybride)

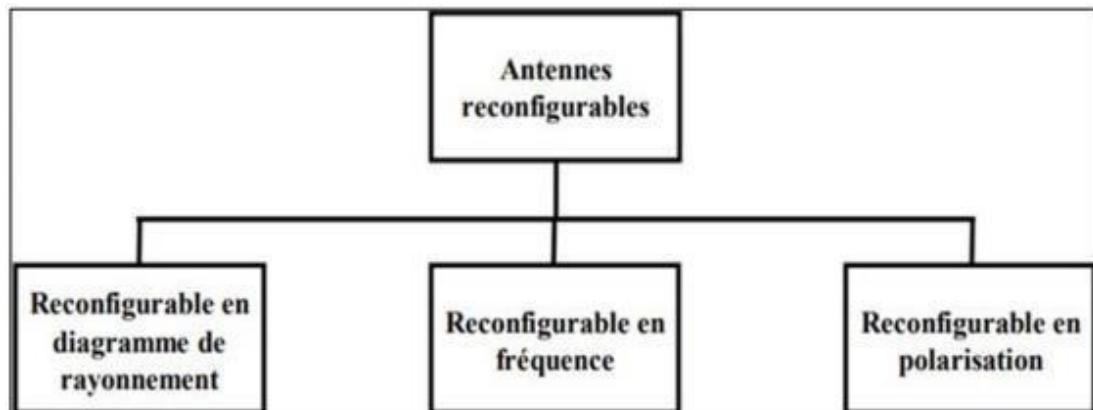


Figure 2-1 : schéma des types d'antennes reconfigurables [8]

2.5.1 La reconfiguration en fréquence

Les antennes reconfigurables en fréquence ont suscité beaucoup d'intérêt en raison de leur capacité à couvrir plusieurs bandes de fréquences, ce qui permet de réduire considérablement le nombre d'antennes nécessaires pour la communication multi-mode. Ces antennes, également appelées antennes accordables, sont classées en deux catégories : continue et discrète. Les antennes accordables continues permettent une transition entre les bandes et offrent la possibilité de varier en continu une ou plusieurs fréquences de résonance.

Cependant la deuxième catégorie permet à l'antenne de commuter entre plusieurs bandes de fréquences.

Pour mieux comprendre la reconfigurabilité en fréquence, prenons l'exemple de l'application WIFI (norme 802.11b à 2,4 GHz). Cette application comprend plusieurs canaux de fréquences ISM. Pour une antenne reconfigurable en fréquence utilisée pour l'application WIFI, il est nécessaire de concevoir une antenne capable de couvrir tous les canaux en commutant entre eux. La bande passante instantanée de l'antenne doit être suffisamment grande pour couvrir chaque canal et la capacité d'agilité fréquentielle permet de se déplacer d'un canal à un autre.

[8]

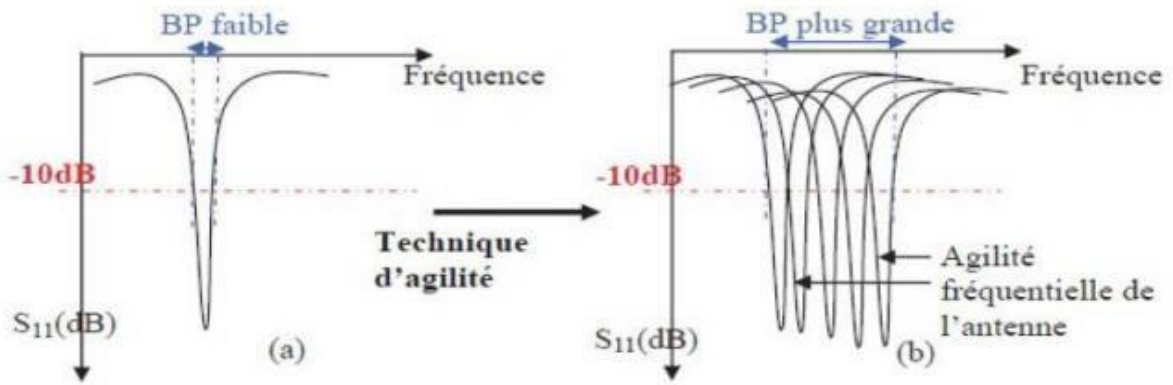


Figure 2.2 : Illustration de l'agilité fréquentielle [8].

Pour obtenir l'agilité fréquentielle, la longueur de résonance du résonateur doit être modifiée. Cela peut être réalisé en chargeant l'antenne avec des éléments actifs dont la réactance peut être contrôlée électroniquement (par exemple, une diode varicap) ou des composants qui agissent comme un commutateur (tels que des diodes PIN, des FET ou des MEMS). Toutefois, ces composants actifs nécessitent des circuits de polarisation pour réaliser la commutation (ON-OFF) [8].

La figure 2.3 illustre un exemple pour la reconfigurabilité de fréquence en utilisant une antenne rectangulaire.

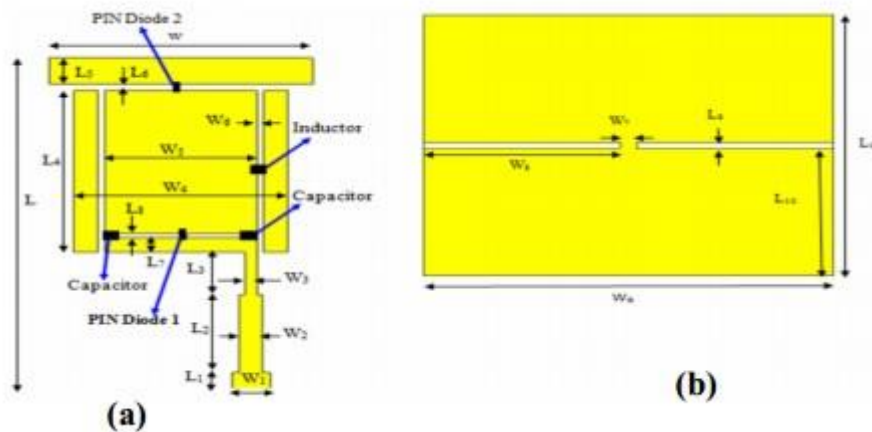


Figure 2.3 : La reconfigurabilité de fréquence en utilisant une antenne rectangulaire vue du dessus (a) et du dessous (b) [8].

2.5.2 La reconfiguration du rayonnement

La capacité d'une antenne à adapter son diagramme de rayonnement pour maintenir sa fréquence de fonctionnement est appelée "reconfigurabilité du rayonnement". Cette

caractéristique est utilisée pour diriger le lobe principal vers des directions utiles et annuler les rayonnements dans les directions des interférences, ce qui permet d'améliorer la capacité du système. La reconfigurabilité du rayonnement permet également à l'antenne de modifier sa forme, sa direction et son gain pour favoriser certaines directions. Les réseaux d'antennes sont souvent utilisés pour cette tâche [2].

La figure 2.4 illustre un exemple pour reconfigurabilité du rayonnement en utilisant une antenne filaire à spirale carrée.

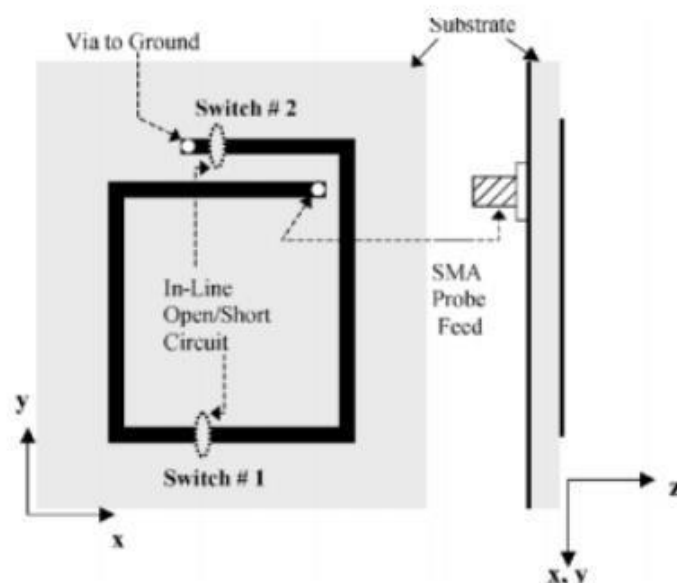


Figure 2.4 : La reconfigurabilité du rayonnement en utilisant une antenne filaire à spirale carrée.1 [2].

La structure de l'antenne doit avoir plusieurs voies de courant reconfigurables, mais ces voies doivent être similaires pour maintenir la fréquence de fonctionnement tout en permettant la modification de la forme du diagramme de rayonnement. [2]

En général, l'ajustement du diagramme de rayonnement repose sur la relation mutuelle entre l'élément principal et les éléments parasites. Ainsi, les modifications dans les diagrammes de rayonnement sont réalisées par des changements dans le couplage entre les éléments, ce qui entraîne des modifications des courants d'alimentation sur l'élément principal ainsi que sur les éléments parasites. [2]

2.5.3 La reconfiguration de polarisation

Les antennes reconfigurables en polarisation peuvent alterner entre différentes orientations de polarisation. Cette capacité de basculer entre les polarisations horizontale, verticale et circulaire peut être utilisée pour minimiser les pertes de polarisation dans les dispositifs

portables. La reconfigurabilité de la polarisation peut être obtenue en ajustant la répartition entre les différents modes d'une structure multi mode.

En réalité, la reconfiguration permet de changer la polarisation de l'élément rayonnant, tout en conservant les mêmes propriétés de l'antenne, telles que la fréquence de fonctionnement et le diagramme de rayonnement. Cette capacité garantit une communication fiable et une bonne immunité aux interférences. Les modes de polarisation disponibles incluent la polarisation verticale/horizontale, la polarisation droite/gauche pour la polarisation circulaire. [5]

L'antenne de l'UCLA est un exemple d'antenne reconfigurable en polarisation. Cette antenne peut être obtenue en ajoutant un commutateur (diode PIN ou FET) au centre de la fente, ce qui permet de contrôler le comportement du courant sur le patch en utilisant un circuit de polarisation pour commuter la diode PIN de l'état ON à l'état OFF et inversement, comme illustré dans la figure (2.5). En utilisant deux fentes orthogonales sur le patch, il est possible d'atteindre une polarisation différente. Cette technique permet de maintenir les mêmes caractéristiques de l'antenne, telles que la fréquence et le diagramme de rayonnement, tout en offrant une bonne fiabilité et une bonne communication avec une immunité aux interférences. [1]

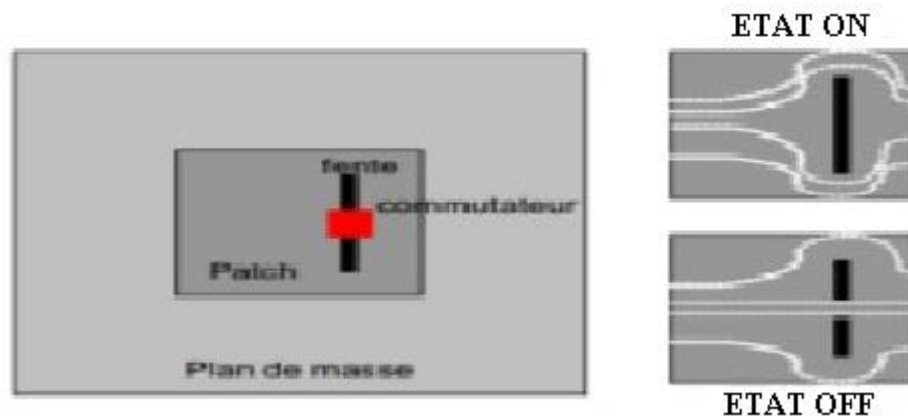


Figure 2.5 : Antenne PASS de l'UCLA [1]

2.5.4 La reconfiguration composée

Cette méthode implique la fusion de deux reconfigurations différentes, telles que la fréquence, le diagramme de rayonnement ou la polarisation. Elle est plus élaborée que les autres techniques et permet de contrôler simultanément deux caractéristiques ou plus, comme la fréquence et la polarisation. [1]

2.6 Les techniques de reconfigurabilité

En parlant des antennes reconfigurables, il s'agit d'antennes capables de modifier au moins une de leurs caractéristiques, telles que la fréquence, la polarisation ou le diagramme de rayonnement, après leur fabrication. Pour atteindre cette reconfigurabilité, diverses techniques peuvent être utilisées, telles que l'ajout de composants actifs tels que les diodes PIN, Les RF-MEMS et les Varactors pour les types électriques, ou l'utilisation d'éléments de commutation optiques comme les photoconducteurs pour les types optiques. En outre, la reconfigurabilité peut être obtenue par des modifications mécaniques dans la structure de l'antenne, connue sous le nom de reconfigurabilité physique. Une autre technique utilise des matériaux intelligents tels que les ferrites et les liquides cristaux pour atteindre la reconfigurabilité [2].

La figure 2.6 résume les différentes techniques de reconfigurabilité.

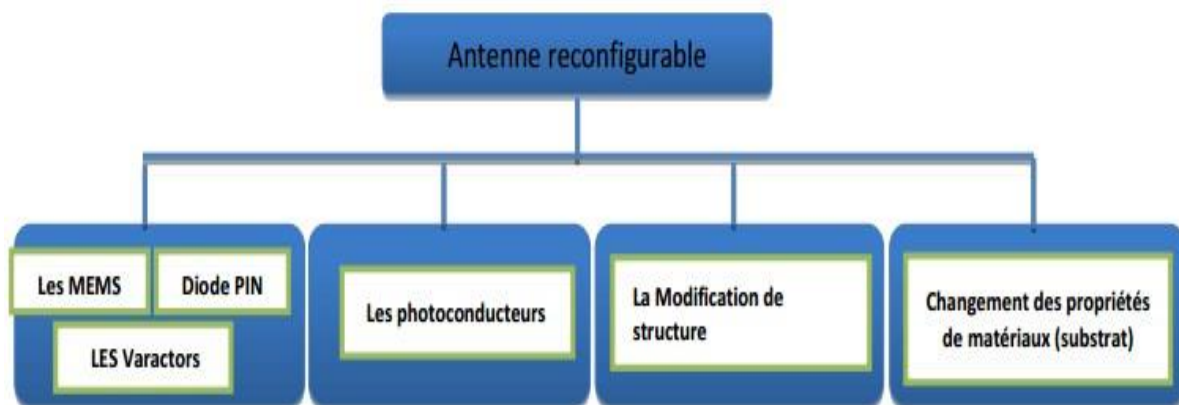


Figure 2.6 : Les différentes techniques de reconfigurabilité [2].

2.6.1 Les Diode Varicap

La diode Varicap est l'un des composants actifs les plus utilisés pour réaliser le pilotage continu en fréquence. La modélisation du comportement électrique de la diode Varicap peut être faite en première approximation par le schéma équivalent de la figure 2.7.

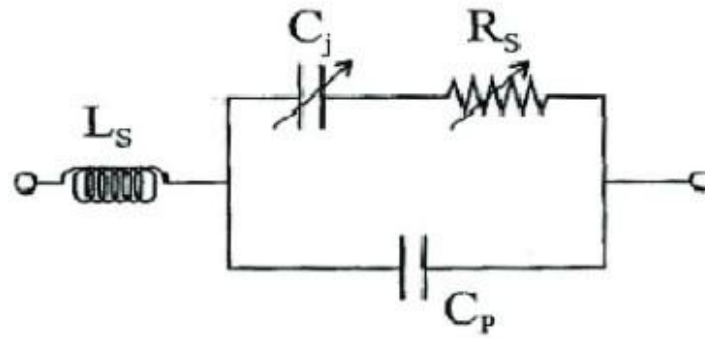


Figure 2.7 : Schéma équivalent d'une diode Varicap [5]

En appliquant une tension inverse élevée aux bornes de la diode Varicap, sa capacité diminue. Cependant, cette relation n'est pas linéaire. Les capacités utilisées sont généralement comprises entre 10 et 1 pf. Dans les composants discrets, la longueur de la diode est d'environ 1 mm. L'un des inconvénients majeurs de la diode Varicap est qu'elle peut réduire l'efficacité et le gain de l'antenne en dissipant une partie importante de l'énergie sous forme de chaleur (effet Joule) plutôt qu'en la rayonnant. Par conséquent, il est important de trouver le meilleur compromis possible entre la tension et le courant pour éviter d'utiliser trop de diodes. [5]

2.6.2 Les Diodes PIN

La diode PIN est un élément couramment utilisé pour la commutation de signaux RF en raison de sa vitesse de commutation très rapide. Dans le contexte des antennes actives, elle est souvent utilisée comme un interrupteur. Les deux modes de fonctionnement, à savoir le mode fermé (ON) et le mode ouvert (OFF), peuvent être représentés par les schémas équivalents suivants. (Figure 2.8) [5]

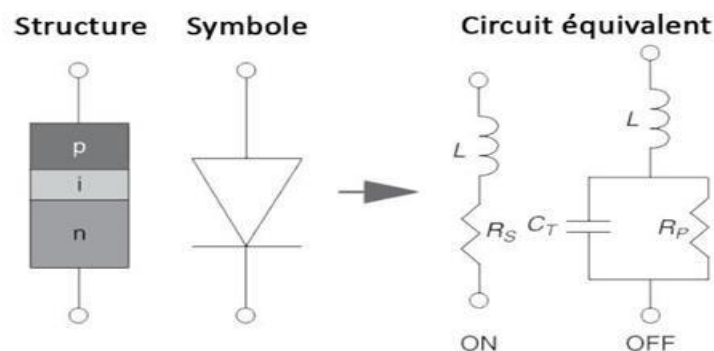


Figure 2.8 : Schéma équivalent simplifié d'une diode PIN.(ON) Polarisation directe ; (OFF) Polarisation inverse. [5]

2.6.3 Les RF MEMS

Le MEMS (Micro Electro-Mécanical System) est un dispositif de commutation qui est utilisé pour reconfigurer les antennes. Il est constitué de microstructures qui peuvent être déformées mécaniquement pour produire un court-circuit ou un circuit ouvert. Bien que son coût soit élevé et sa fiabilité ne soit pas garantie, il est distingué par une faible perte d'insertion et une réponse très rapide, mais nécessite une tension importante pour son activation. [1]

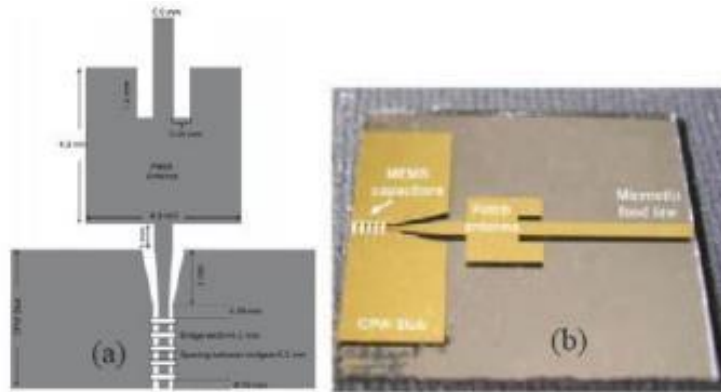


Figure 2.9 : (a) Antenne imprimée chargée par un stub coplanaire à base de MEMS

(b) photographie de l'antenne [1]

Le tableau suivant présente la différence entre les techniques de reconfiguration en fréquence

Tableau 2.1 : la différence entre les techniques de reconfiguration en fréquence [1]

Méthode de reconfigurabilité	Avantages	Inconvénients
Diode varactor	<ul style="list-style-type: none"> •Intégration facile • Accordabilité forte (>50%) • Faible consommation de puissance et Temps de commutation rapide 	<ul style="list-style-type: none"> •Faible tenue en puissance (<5dBm) • Pertes élevées (>20) • Coût moyen
Diode PIN	<ul style="list-style-type: none"> •Bonne tenue en puissance • Accordabilité forte (>50%) • Faible tension de polarisation (<10V) • Temps de commutation rapide (0.001-0.1μs) • Coût bas 	<ul style="list-style-type: none"> •Circuit de polarisation complexe • Pertes élevées (1-50) • Forte consommation de puissance (5-125mW)

MEMS	<ul style="list-style-type: none"> • Accordabilité forte (<50%) • Bonne tenue en puissance (>10dBm), • Faible perte et Faible Consommation de puissance (0.05-0.1mW) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tension de polarisation élevée (>50V) • Coût élevé
------	---	--

2.7 Simulation des antennes reconfigurable par l'utilisation des Diodes PIN

2.7.1 L'outil de simulation

Dans notre étude de simulation, nous avons utilisé le logiciel HFSS (High-Frequency Structure Simulator) est un outil de simulation électromagnétique en 3D développé par Ansys, une société spécialisée dans les logiciels de simulation et d'analyse d'ingénierie. HFSS est largement utilisé dans l'industrie de l'électronique et des télécommunications pour concevoir et analyser des dispositifs électroniques et des systèmes à haute fréquence.

Le logiciel HFSS permet de modéliser et de simuler divers composants et dispositifs à haute fréquence, tels que les antennes, les réseaux d'antennes, les filtres, les guides d'ondes, les circuits imprimés, les dispositifs micro-ondes, etc. Il utilise des méthodes de simulation avancées, comme la méthode des éléments finis (FiniteElement Method - FEM) et la méthode des moments (Method of Moments - MoM), pour résoudre les équations électromagnétiques complexes et prédire les performances des dispositifs à haute fréquence [6].

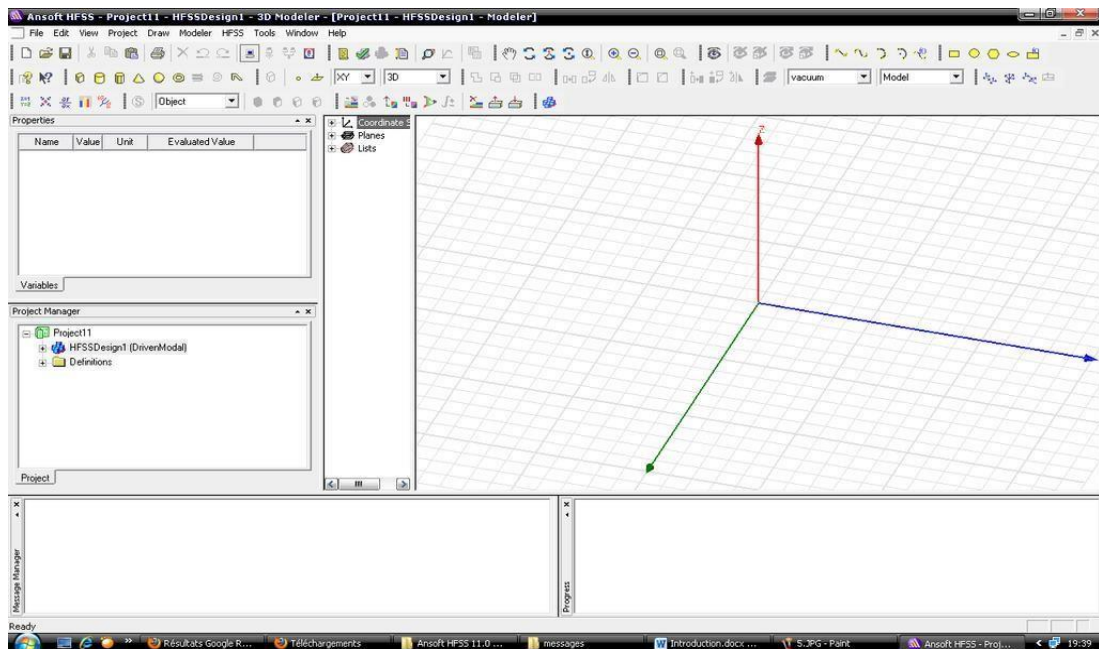


Figure 2.10 : Fenêtre de démarrage de simulateur HFSS

2.7.2 Modélisation de la diode PIN

Pour la fonction de commutation, on fait usage de trois modèles de diodes PIN, précisément les modèles Skyworks SMP1345-079LF. Ces diodes sont choisies en raison de leur capacité à agir comme une résistance variable dans la gamme de fréquences radio (RF). Les diodes PIN imitent les comportements d'un circuit ouvert et d'un court-circuit à leurs positions respectives, ce qui permet de modifier la longueur de résonance effective de l'antenne. Par conséquent, cela conduit à une reconfiguration de la fréquence de fonctionnement de l'antenne. Les schémas équivalents pour les états activé (ON) et désactivé (OFF) d'un commutateur à diode PIN sont illustrés dans la Figure 2.11. [4]

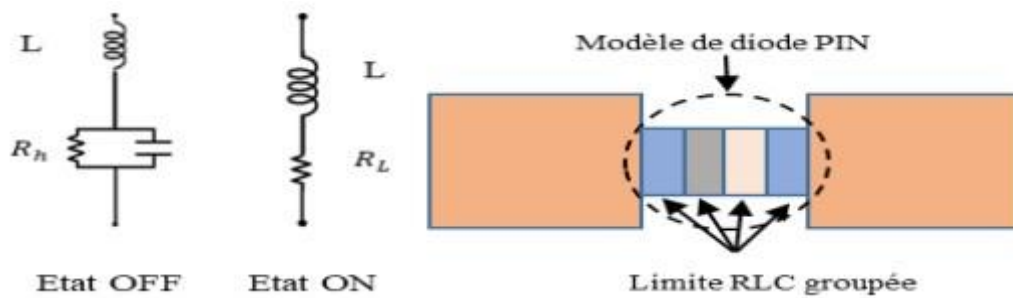


Figure 2.11 : Modèle de diode PIN et ses circuits équivalents pour les états ON et OFF [4]

Etat ON : le circuit électrique équivalent est simplement un circuit RL série ayant une résistance de faible valeur « RL » et une inductance « L ».

Etat OFF : le circuit électrique équivalent est un circuit RLC, ayant une inductance « L » en parallèle avec une valeur élevée de résistance « Rh » et une capacité « C ». La diode PIN de modèle ci-haut est utilisée dans ce travail. Selon sa fiche technique, elle est modélisée sous HFSS. Les paramètres et les valeurs sont détaillées dans le Tableau 2.2. [4]

Tableau 2.2 : Chaque état de diode avec ses valeurs correspondantes des composants RLC

Etat de diode	Valeurs des éléments RLC	
ON	$L=0.4\text{nH}$	$R=1\text{ohm}$
OFF	$L=0.4\text{nH}$	$R=20\text{Kohm}$
		$C=5\text{pF}$

2.7.3 Conception d'une antenne a patch circulaire

2.7.3.1 La géométrie de l'antenne proposée

La figure 2.12 montre une antenne micro ruban a patch circulaire avec un slot diélectrique. Le plan de masse de cette antenne est un plan perturbé comme indique dans la figure 2.12. rectangle qui couvre toute la sous-façade du substrat (76.46mm*74.2mm).le substrat utilise est FR4 de permittivité diélectrique $\epsilon_r=4.4$ à une épaisseur de 1mm.

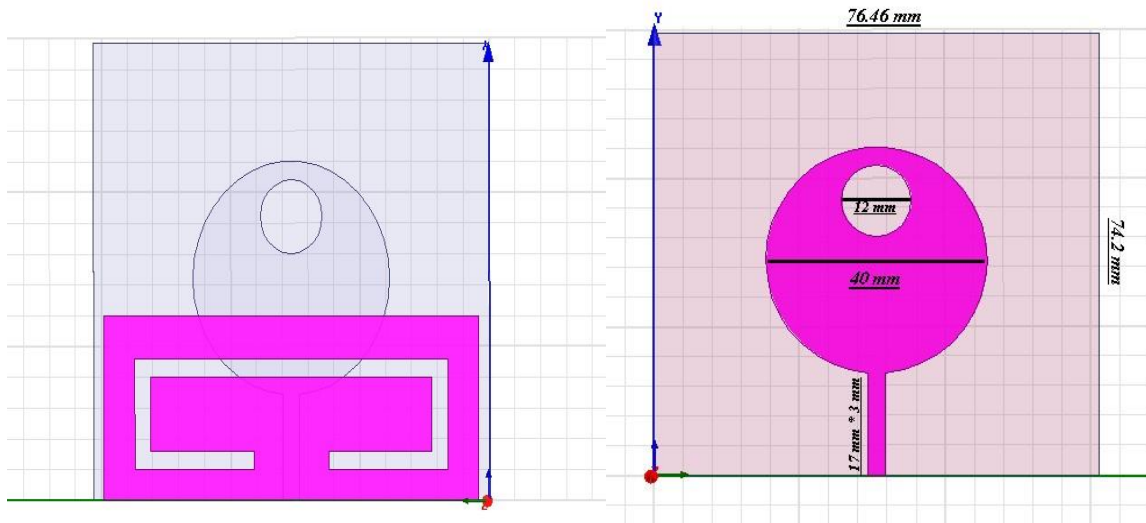


Figure 2.12 : l'antenne utilisée avec ses dimensions

2.7.3.2 Le coefficient de réflexion

La figure 2.13 présente le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de fonctionnement simulée par HFSS. D'après la Figure 2.13 on constat que le coefficient S_{11} est de l'ordre de -32 (dB) pour une fréquence de résonance de 7.98 GHz avec bande passant à (-10dB) est égal à 0.86 GHz.

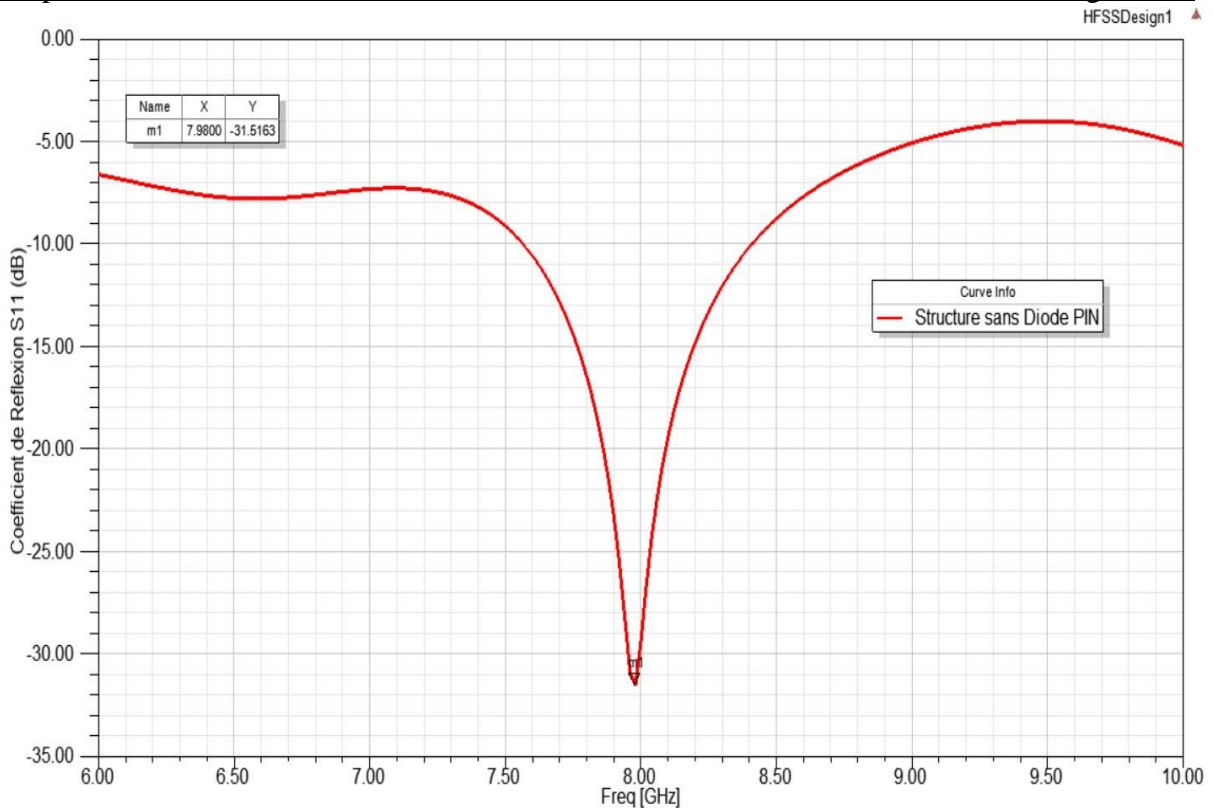


Figure 2.13 : le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de fonctionnement pour la structure d’antenne initiale

2.7.4 Conception d’une antenne reconfigurable par l’insertion des Diode PIN

2.7.4.1 La géométrie

La figure 2.14 montre le plan de masse avec 3 Diodes PIN (A, B et C) insérée dans le slot diélectrique.

Dans le cas idéal, lorsque la diode est polarisée en direct, les slots sont reliés par les diodes formant une série inductive de cellules élémentaires, les slots sont connectés les uns aux autres et la diode agissent comme des courts circuits.

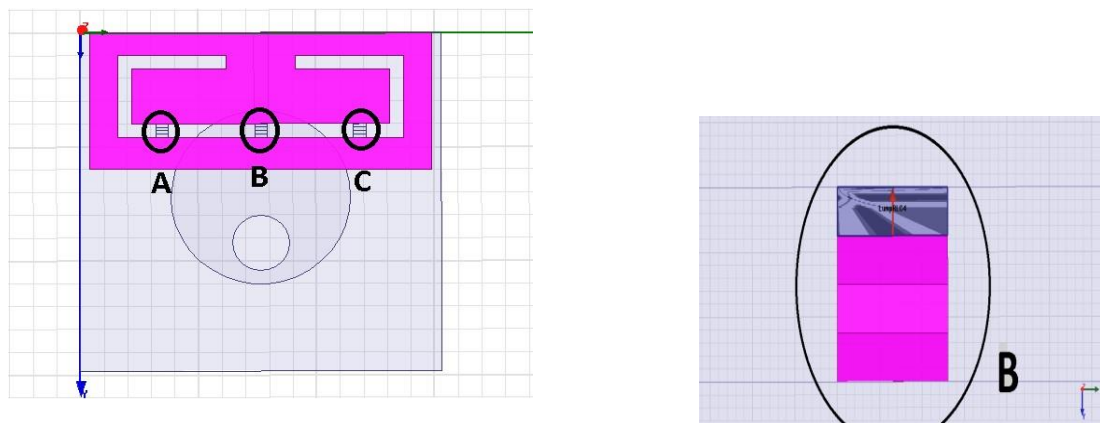


Figure 2.14 : (a) Insertion des Diodes A, B et C. (b) Diode B dans HFSS

Selon l'état des diodes 8 résultats principaux sont obtenues et résumés dans le tableau 2.3. Le tableau suivant montre les différents résultats obtenus (la bande passante et la fréquence de résonance) pour les différents états des 3 Diodes PIN utilisées dans l'antenne reconfigurable proposée :

Tableau 2.3 : les différents états des Diodes A,B et C avec les changements survenus :

Numéro de l'expérience	La Bande de fréquence (GHz)	Fréquence de résonance (GHz)	S11 (dB)	L'état des diodes		
				A	B	C
Exp 1	[7.32—8.10]	7.74	-24.63	ON	OFF	OFF
Exp 2	[7.66—8.33]	8.00	-33.07	OFF	ON	OFF
Exp 3	[7.32—8.10]	7.74	-24.48	OFF	OFF	ON
Exp 4	[7.48—8.21]	7.86	-40.1	ON	ON	OFF
Exp 5	[7.02—7.98]	7.56	-21.45	ON	OFF	ON
Exp 6	[7.48—8.20]	7.84	-38.49	OFF	ON	ON
Exp 7	[7.27—8.06]	7.70	-25.8	ON	ON	ON
Exp 8	[7.56—8.42]	7.98	-31.51	OFF	OFF	OFF

2.7.4.2 Résultats de simulation de l'antenne reconfigurable en fréquence à 3 Diodes PIN

A partir de la configuration optimisée, la Figure 2.15 illustre le coefficient de réflexion pour les 8 configurations considérées de l'antenne proposée.

Les différentes courbes du coefficient S11 présentées dans la Figure 2.15 montrent que l'insertion du Diode sur la fente peut affecter sur l'adaptation de l'antenne en plus d'un décalage dans la fréquence de résonance et la bande passante.

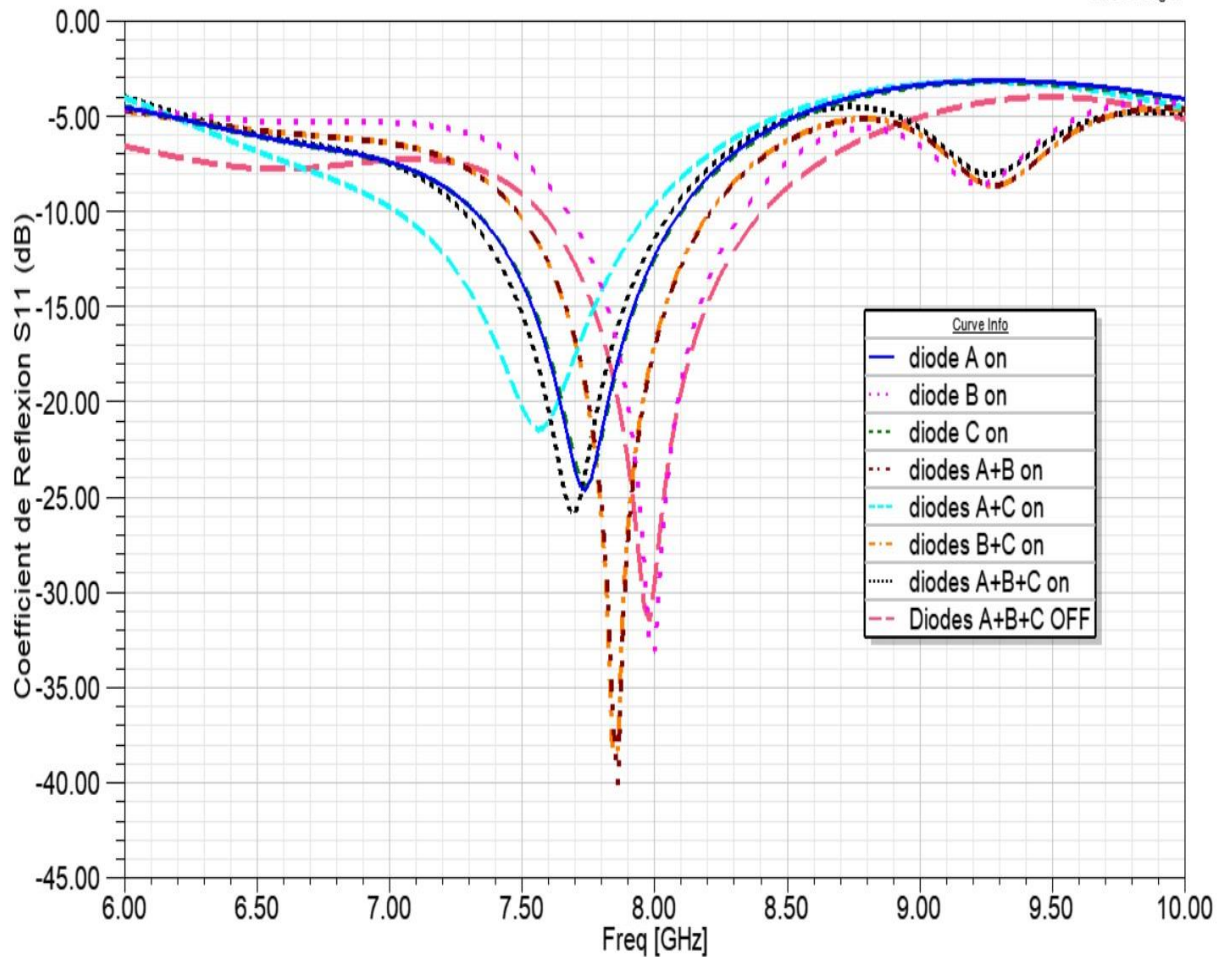


Figure 2-15: L'évolution du coefficient de réflexion pour les 8 états des Diodes PIN

Lorsqu'une ou plusieurs diodes PIN sont activées, les fréquences de résonances sont modifiées par rapport à celui correspondant à la configuration initiale.

2.8 Conclusion

De nos jours, les antennes reconfigurables restent la solution la plus utilisée pour répondre aux standards de plus en plus diversifiés des systèmes de télécommunication. On a abordé dans ce chapitre des initiations de base sur les antennes reconfigurables et on a cité les différents types et les techniques de reconfigurabilité en fréquence, digramme de rayonnement et en polarisation. Comme nous l'avons également mentionné, quelques avantages et inconvénients de ces antennes reconfigurables. On a terminé ce chapitre par quelques simulations avec logiciel HFSS où nous avons testé la reconfigurabilité d'une antenne utilisant les diodes PIN. En effet, l'utilisation des diodes PIN permet de commuter la fréquence de résonance et la bande passante.

CHAPITRE 3

Les antennes reconfigurables par Switches RF-MEMS

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, on a fait une étude sur les antennes reconfigurables par l'utilisation des Diodes PIN. Pour voir l'effet de la reconfigurabilité sur les la fréquence opérationnelle de l'antenne, des diodes seront disposées dans la structure du patch afin de changer la fréquence de résonance en jouant sur l'état de ces diodes de commutation. La reconfigurabilité des antennes par l'utilisation des switches RF à base des Diodes PIN ne peuvent pas fonctionner pour des fréquences qui sont grandes (au-delà de 50GHz) c'est pour ça dans le domaine quasi optique ou optique en fait appel au switches RF- MEMS. Notre objectif dans ce chapitre est d'étudier les antennes reconfigurables par les switches MEMS dans l'intervalle de fréquence >50 GHz.

3.2 Définition

Le MEMS, ou système micro-électromécanique, est une technologie de fabrication qui permet de créer de petits dispositifs ou systèmes intégrés combinant des composants mécaniques et électriques. Ils sont fabriqués à l'aide de techniques de traitement en série de circuits intégrés et peuvent varier en taille, allant de quelques micromètres à quelques millimètres. Ces dispositifs ou systèmes ont la capacité de détecter, contrôler et actionner à l'échelle microscopique, tout en produisant des effets visibles à l'échelle macroscopique. [9]

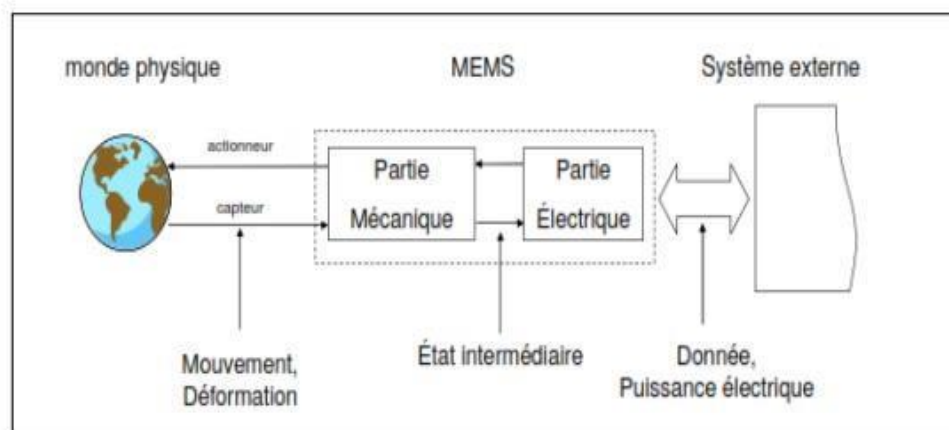


Figure 3.1 : MEMS et son environnement [3]

3.3 Les Micro-Commutateurs (Switches) MEMS

La recherche sur les dispositifs MEMS est un domaine d'étude très actif et diversifié. Initialement, les composants MEMS étaient limités à des éléments mécaniquement déformables, mais cette notion a évolué pour englober toutes les structures réalisées grâce aux technologies de micro-fabrication [3]

Un commutateur possède généralement deux états : un état actif qui permet la transmission du signal et un état inactif où le signal ne peut pas passer à travers le composant. L'idéal serait un

commutateur qui se comporte comme un court-circuit (impédance nulle) à l'état actif et comme un circuit ouvert (impédance infinie) à l'état inactif. Les micro-commutateurs MEMS, tout comme les capacités variables, sont généralement constitués d'une structure mobile ou mécaniquement déformable. On distingue principalement deux types de micro-commutateurs MEMS : les commutateurs à contact latéral et les commutateurs de type micro-poutre.

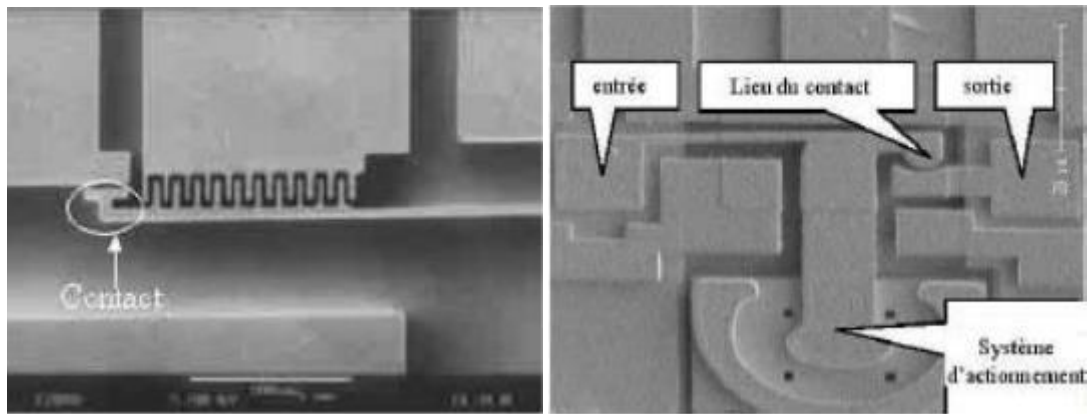


Figure 3.2 : Exemple de commutateur à contact latéral [3]

Les micro-commutateurs MEMS sont fabriqués à partir d'une fine poutre déformable.

Lorsque cette poutre est soumise à une contrainte, elle peut se fléchir jusqu'à entrer en contact avec une électrode généralement située à la surface du substrat. La position de la poutre détermine ainsi l'état actif ou inactif du commutateur. On peut distinguer deux types de contacts : un contact capacitif, où il y a une séparation entre la poutre et l'électrode formant un condensateur (Figure 3-3), ou un contact ohmique (Figure 3-4), où la poutre entre en contact direct avec l'électrode. [3]

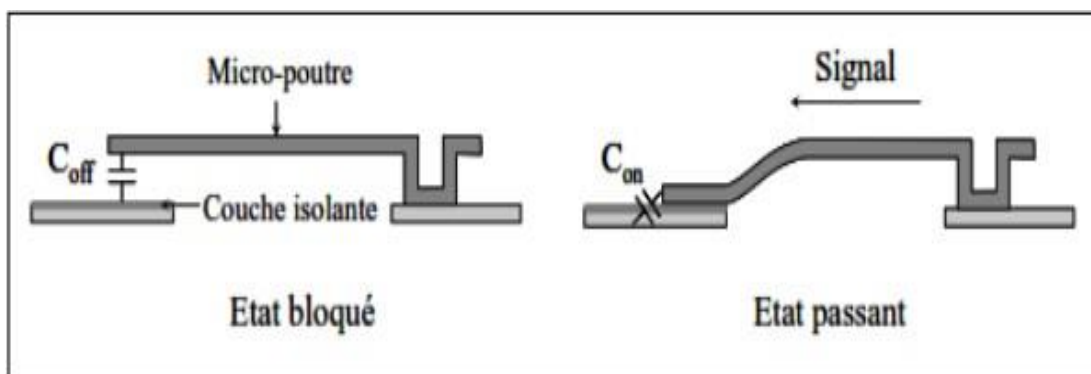


Figure 3.3 : Commutateur série à contact capacitif [3]

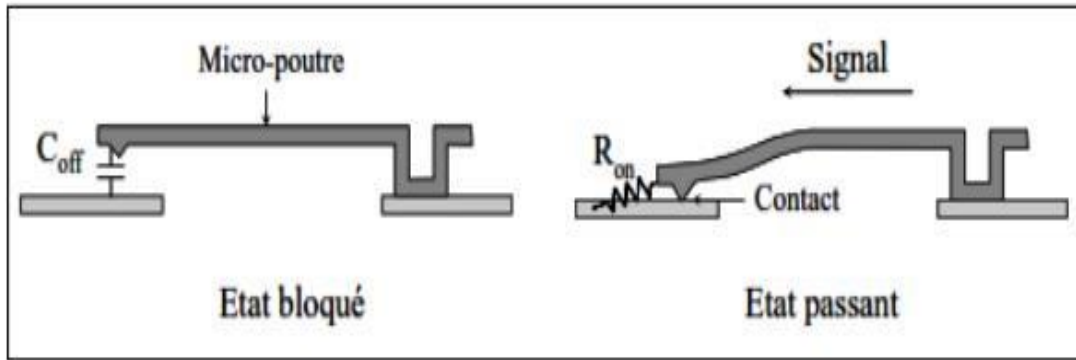


Figure 3.4 : Commutateur série à contact ohmique [3]

3.4 Principe de fonctionnement et implémentation du commutateur RF MEMS :

Pour de nombreuses avancées technologiques, le concept est simple, mais l'exécution ne l'est pas, et ce constat vaut pour le commutateur RF MEMS. Le commutateur RF MEMS utilise un faisceau en porte-à-faux micro-usiné avec une pointe métallisée comme élément de commutation. Le problème en ce qui concerne la conception est de savoir comment « activer » ce porte-à-faux de sorte qu'il se déplace et entre en contact avec la surface métallisée correspondante lorsqu'il est allumé, puis se déconnecte également lorsqu'il est éteint. Pour le commutateur RF MEMS, ce mouvement est initié via un actionnement électrostatique (Figure 3.9). Il est habituel d'appeler les bornes du commutateur « source », « grille » et « drain », mais il s'agit toujours d'une fermeture de contact mécanique et non d'un dispositif FET de commutation. [11]

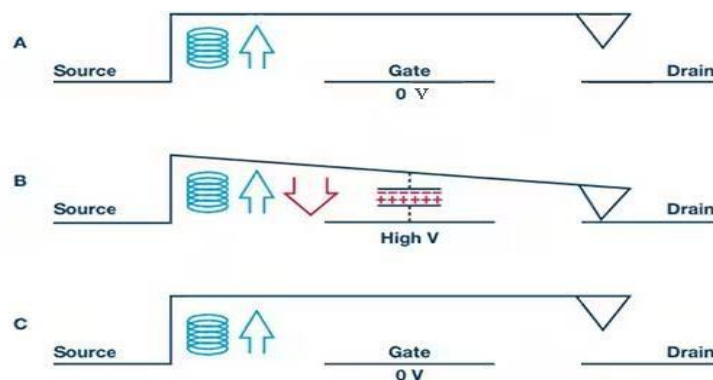


Figure 3.5: Le principe du commutateur RF MEMS utilise une paire de contacts métalliques (appelés source et drain) avec le contact mobile sur un faisceau en porte-à-faux (grille), qui est déplacé par une force électrostatique. [11]

3.5 Modélisation des antennes reconfigurable utilisant les Switches RFMEMS

3.5.1 La géométrie de l'antenne proposée

Initialement, on a choisi une antenne patch de forme rectangulaire avec deux slots (0.5mmx 1mm) et un plan de masse complet. Les paramètres géométriques de l'antenne proposée sont définis de la façon suivante un substrat (Rogers RT) d'une dimension de 5.5x5.5 mm² (largeur x longueur) qui a une permittivité relative $\xi_r=2.2$, et une épaisseur $h=0.1$ mm. L'antenne est alimentée par une ligne micro ruban d'une dimension de 0.9x1.55 mm (largeur x longueur) et d'une impédance caractéristique $Z=50\Omega$, comme elle est illustrée dans la Figure 3.6

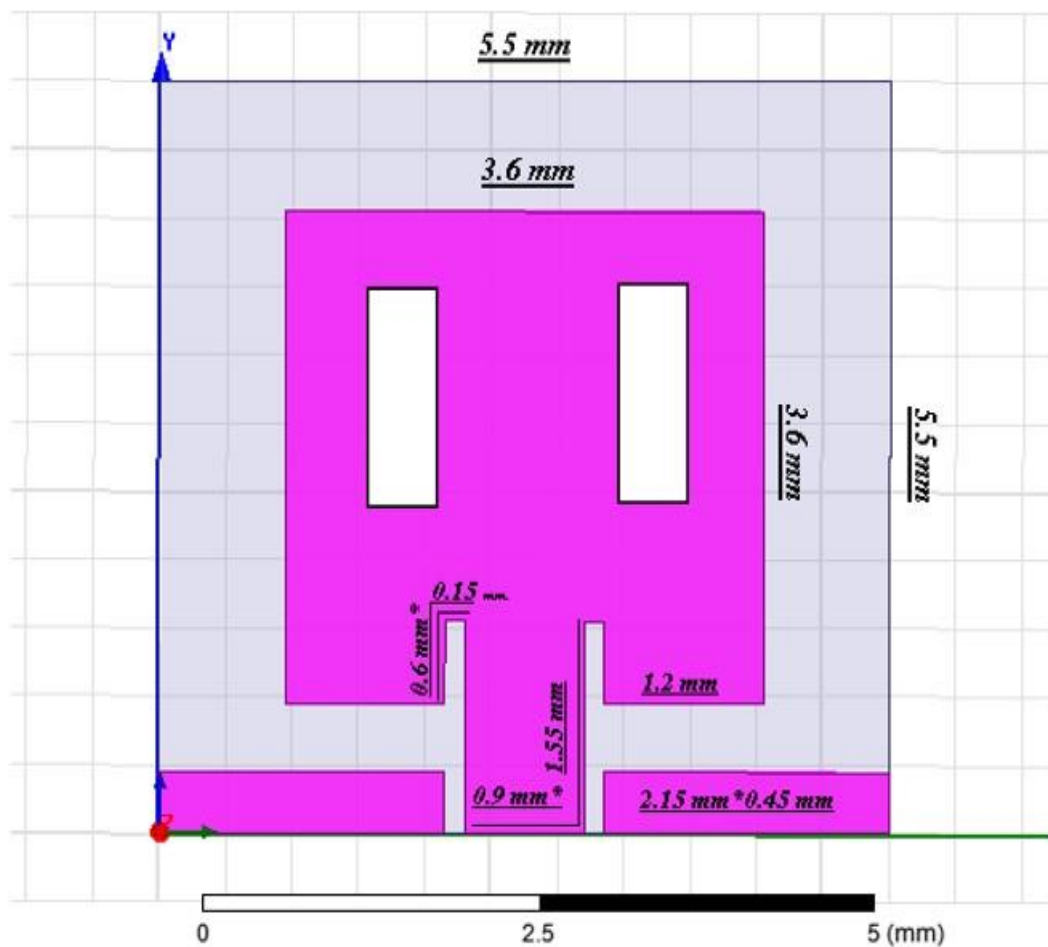


Figure 3.6 : Structure de l'antenne proposée

La structure proposée est simulée par le logiciel HFSS. Le coefficient de réflexion obtenu est représenté par la Figure 3.7.

D'après la Figure 3.7 on constate que le coefficient S_{11} montre deux fréquences de résonances à 64.80 GHz (-16.12 dB) et à 75.60 GHz avec $S_{11}=-24.28$ dB.

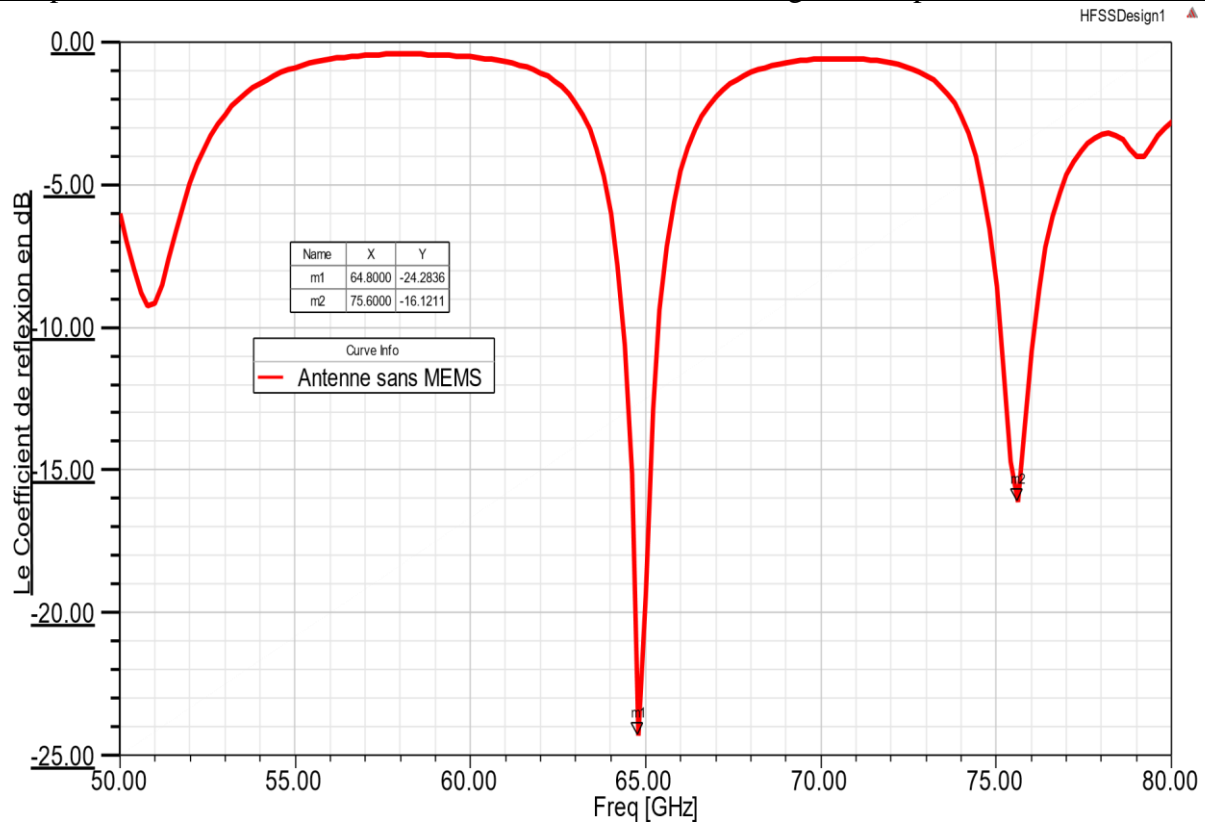


Figure 3.7 : Le coefficient de Réflexion en fonction de la fréquence après l’ajustement.

Pour rendre l’antenne reconfigurable en fréquence, On va placer des MEMS, qui vont prendre deux états (ON, OFF), dans la structure.

3.5.2 Modélisation du MEMS

Le switch MEMS a deux états ON et OFF. Pour simplifier notre tâche, on va utiliser un morceau de métal pour modéliser l’état ON alors que l’état OFF est modélisé par une discontinuité (sans métal).

Pour faire la simulation, on va proposer l’utilisation des quatre switch MEMS ce qui permet d’avoir 16 cas possibles.

La structure finale de l’antenne a est illustre dans la figure 3.8.

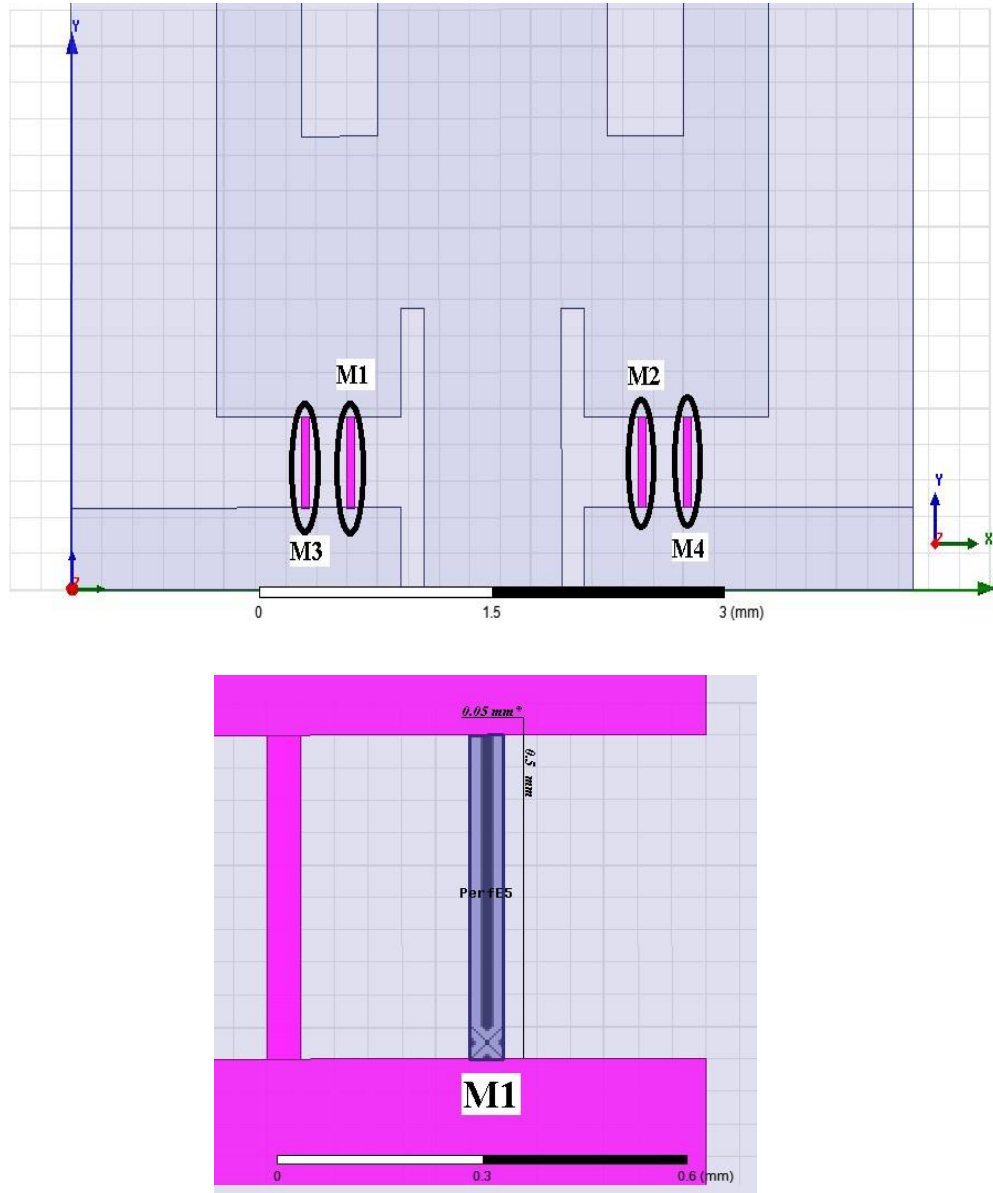
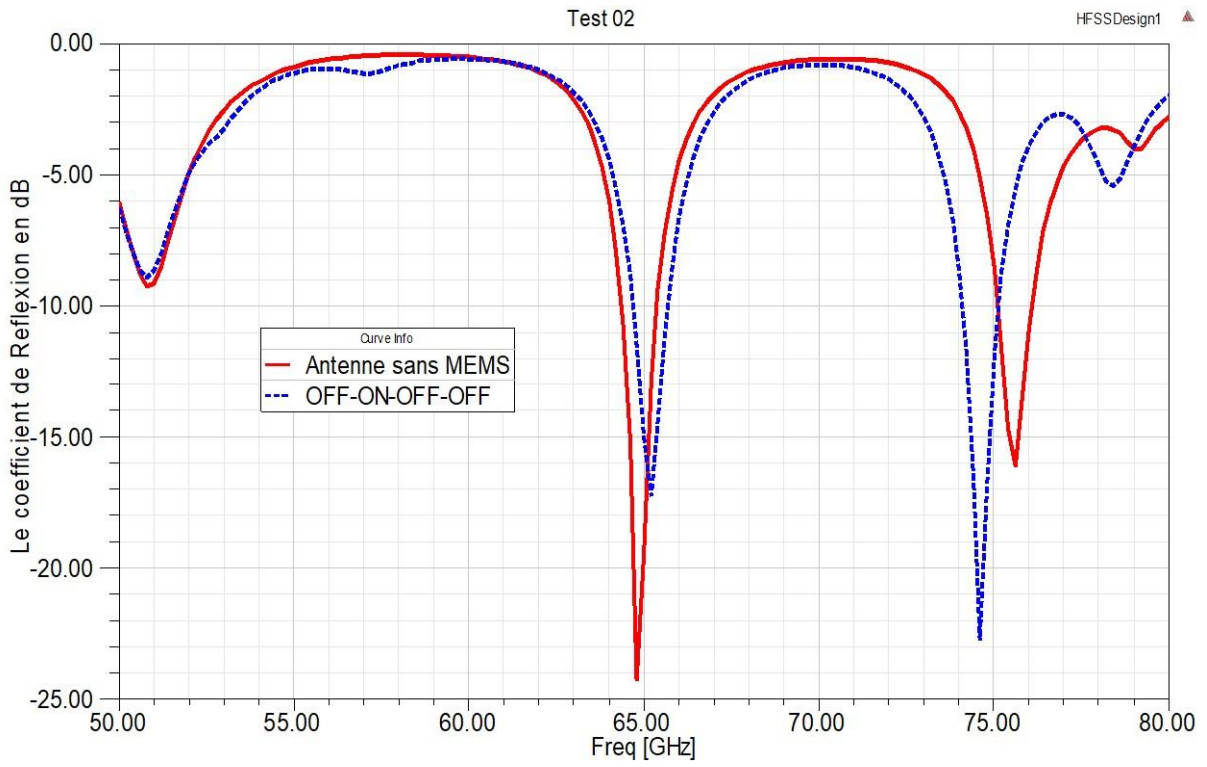
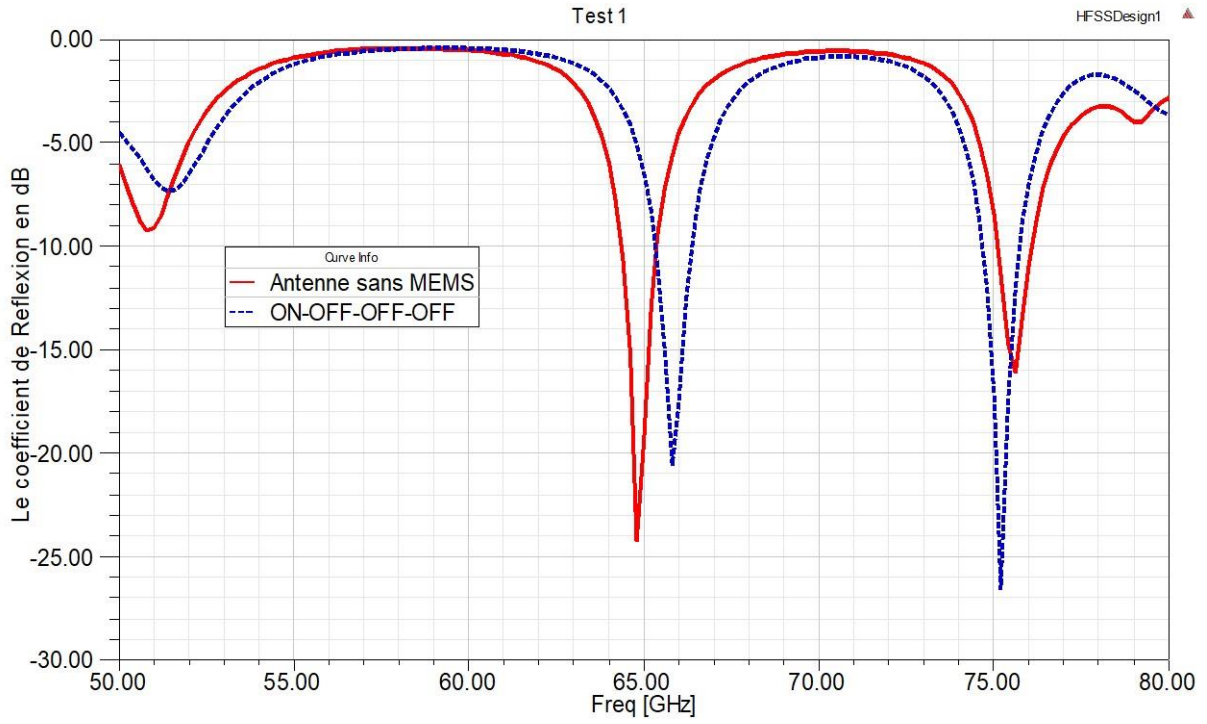


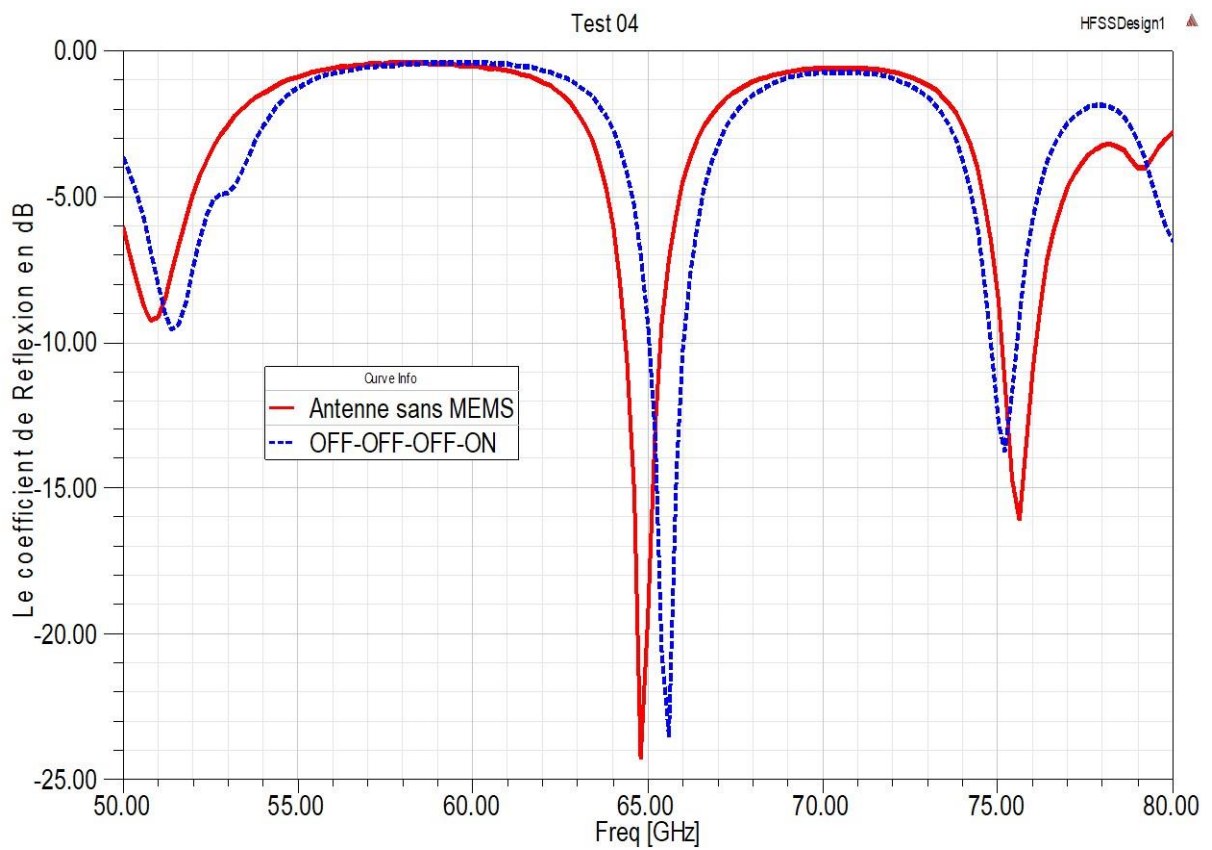
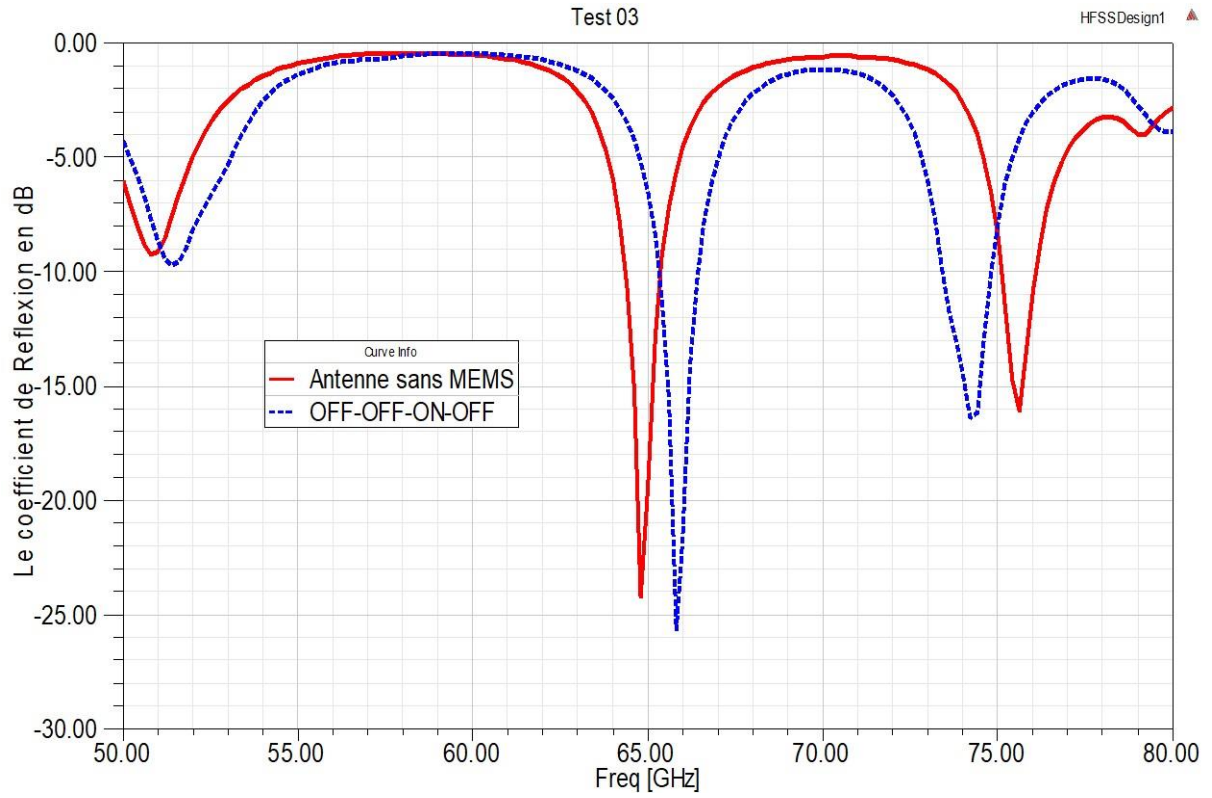
Figure 3.8 : (a) La structure finale de l'antenne à quatre MEMS (M1, M2, M3 et M4). (b) MEMS 1 en gros plan avec ses dimensions.

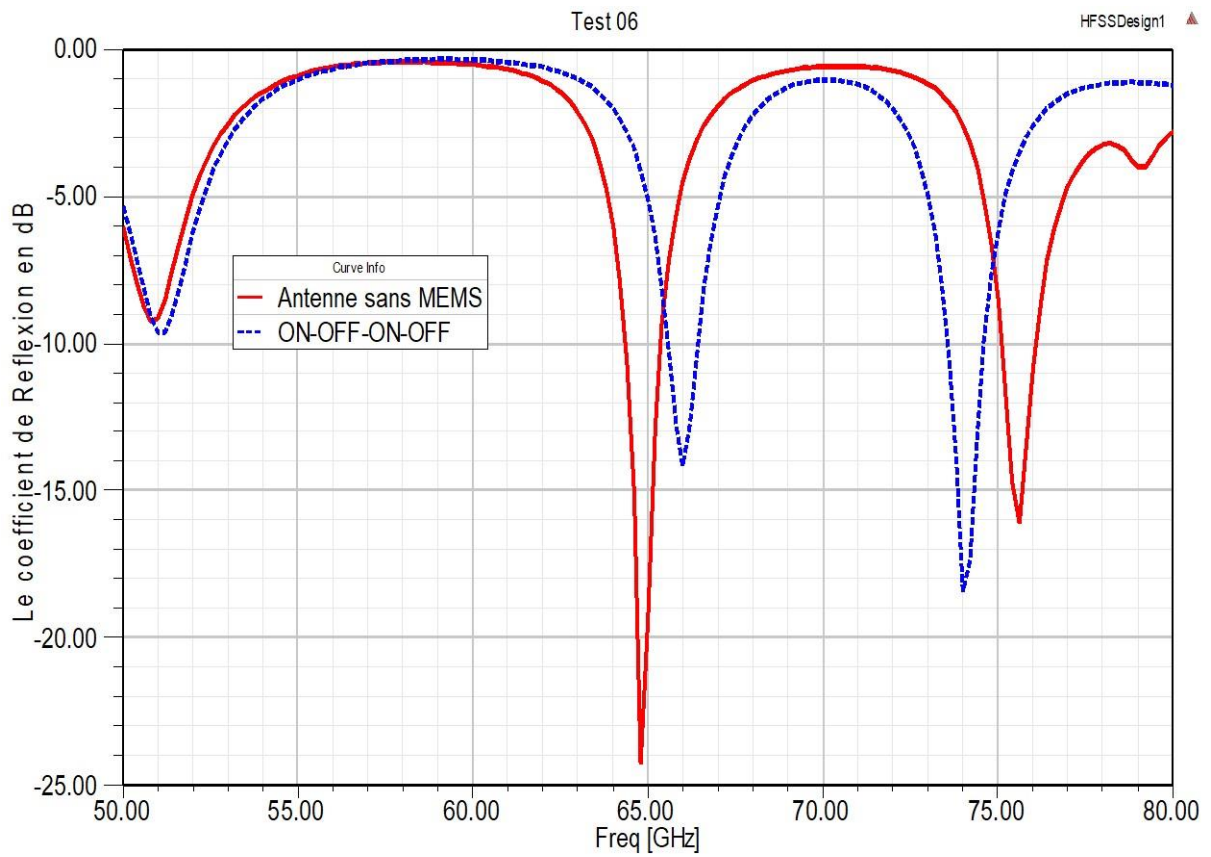
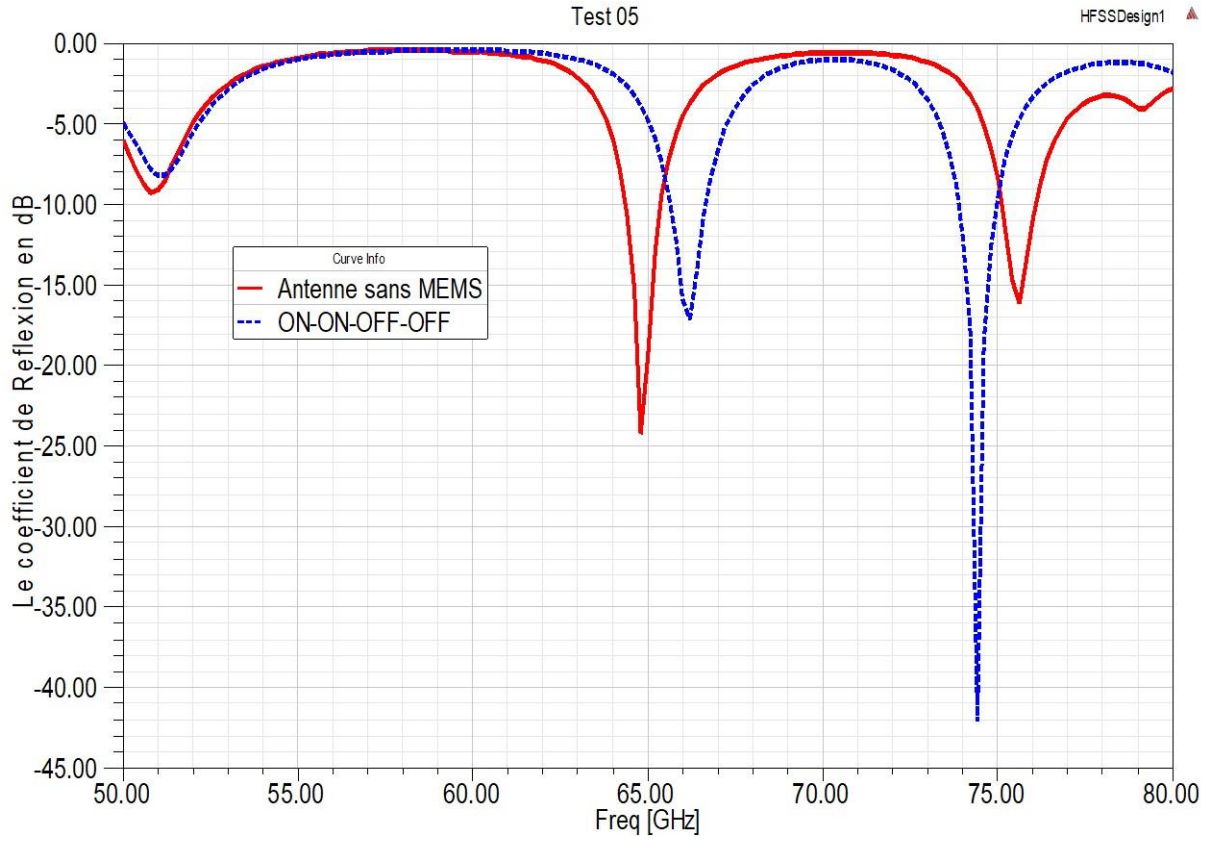
Comme il s'agit d'un Switch (un bras), cela signifie qu'il doit être soit en position active (ON), soit en position inactive (OFF), c'est-à-dire soit en 1, ce qui signifie que la longueur de Switch égale 0.5 mm et le Switch est en contact avec le patch, soit en 0, ce qui signifie que la longueur égale 0 mm et le Switch n'est pas en contact avec le patch.

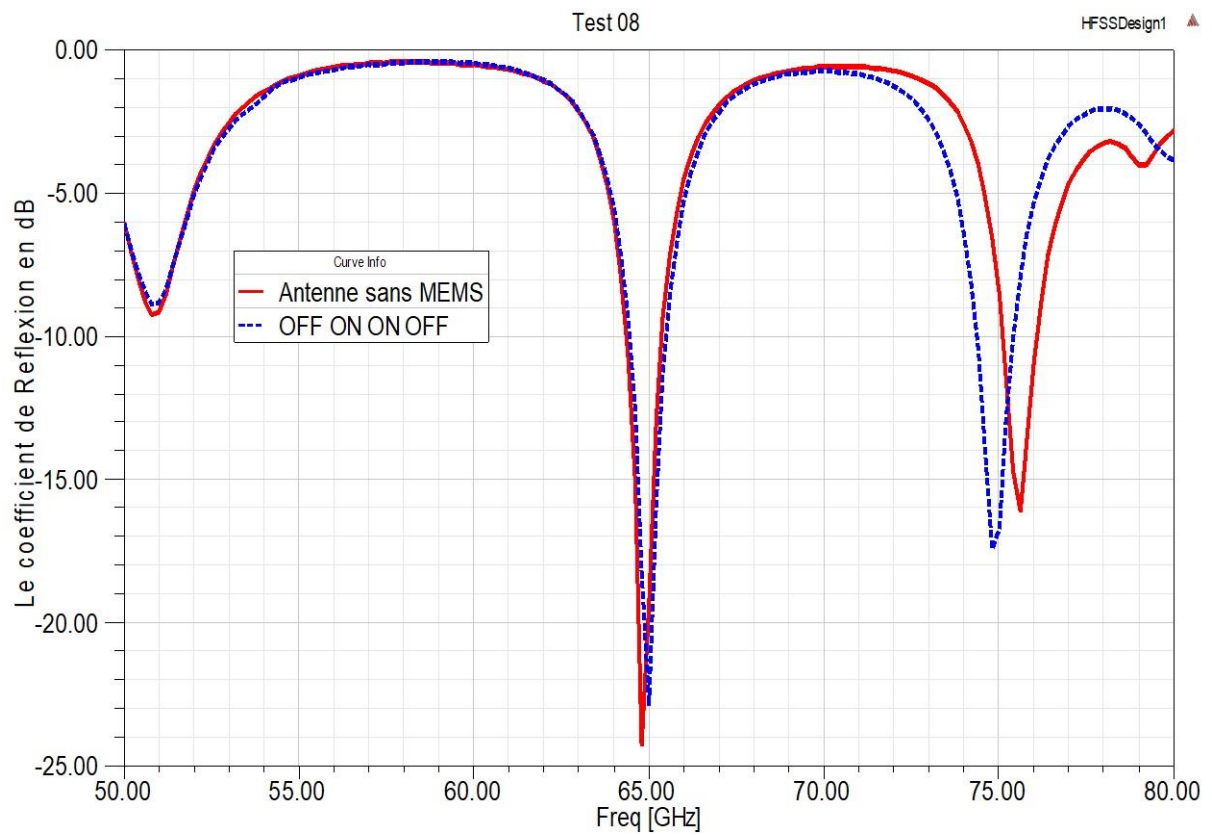
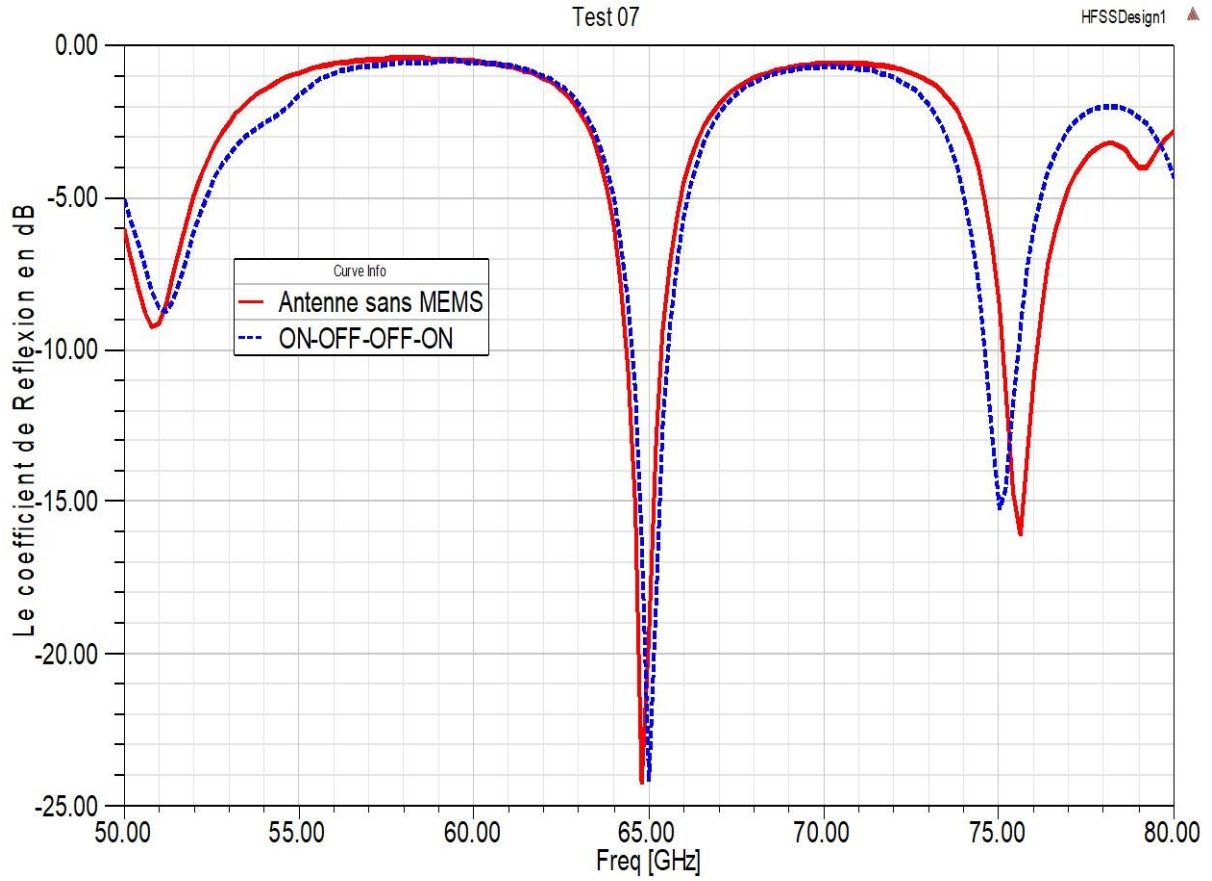
3.5.3 Les résultats de simulation pour le coefficient de réflexion et le Gain

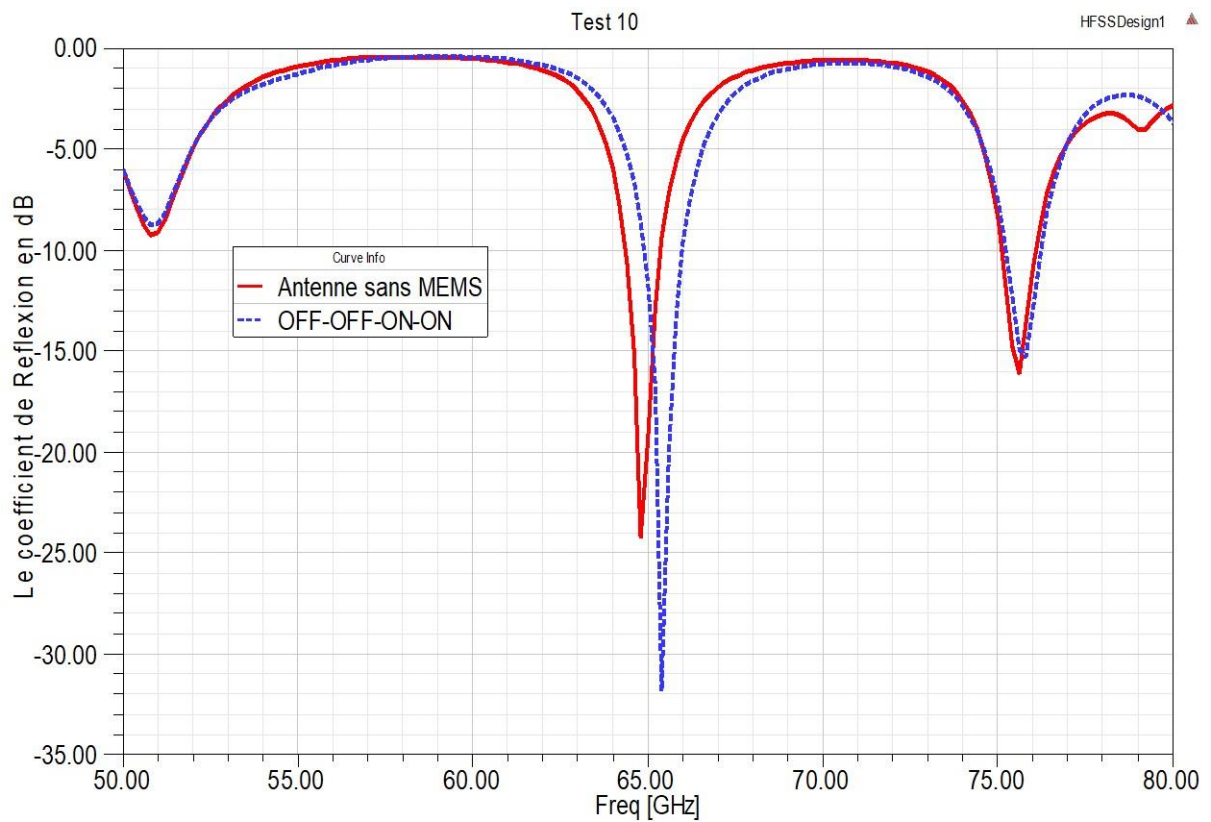
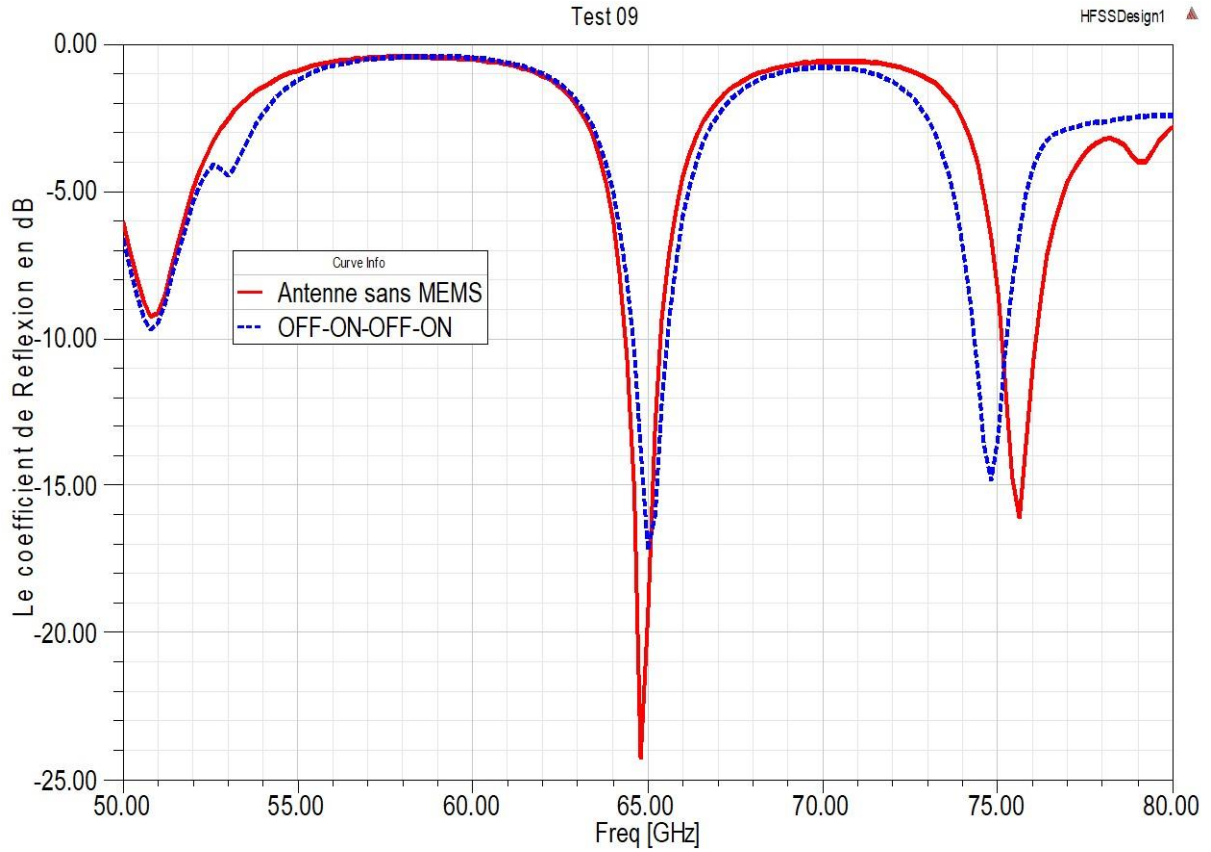
Les figures suivantes montrent les différents résultats du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de fonctionnement pour les différents états des Switches MEMS M1, M2, M3 et M4 :

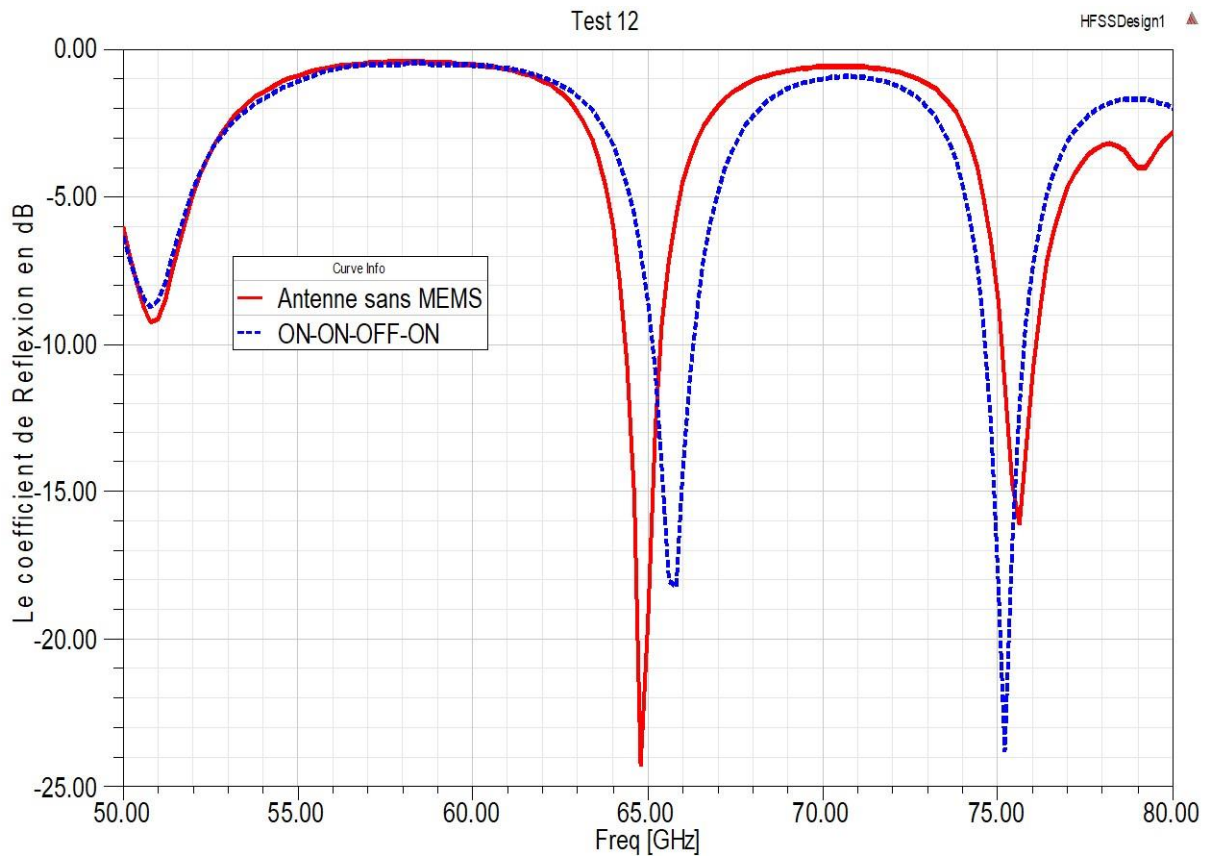
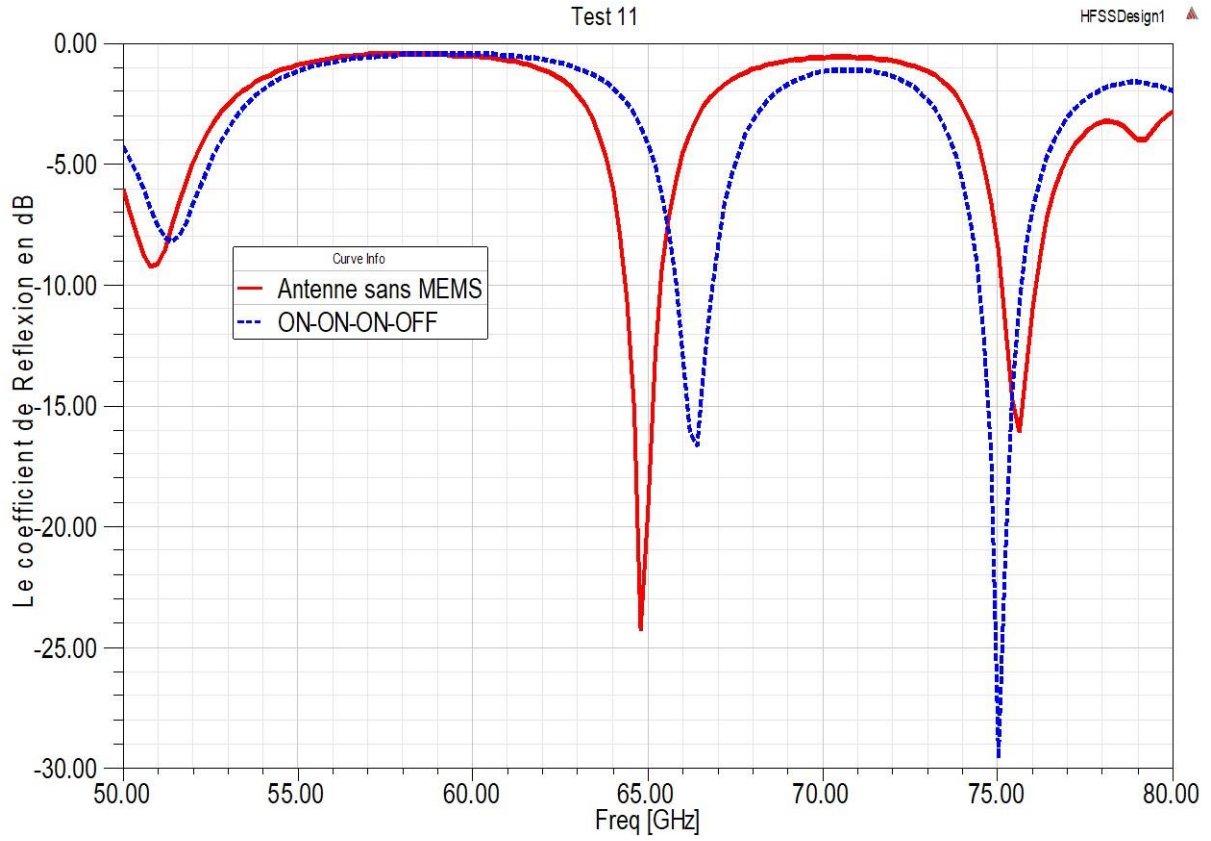


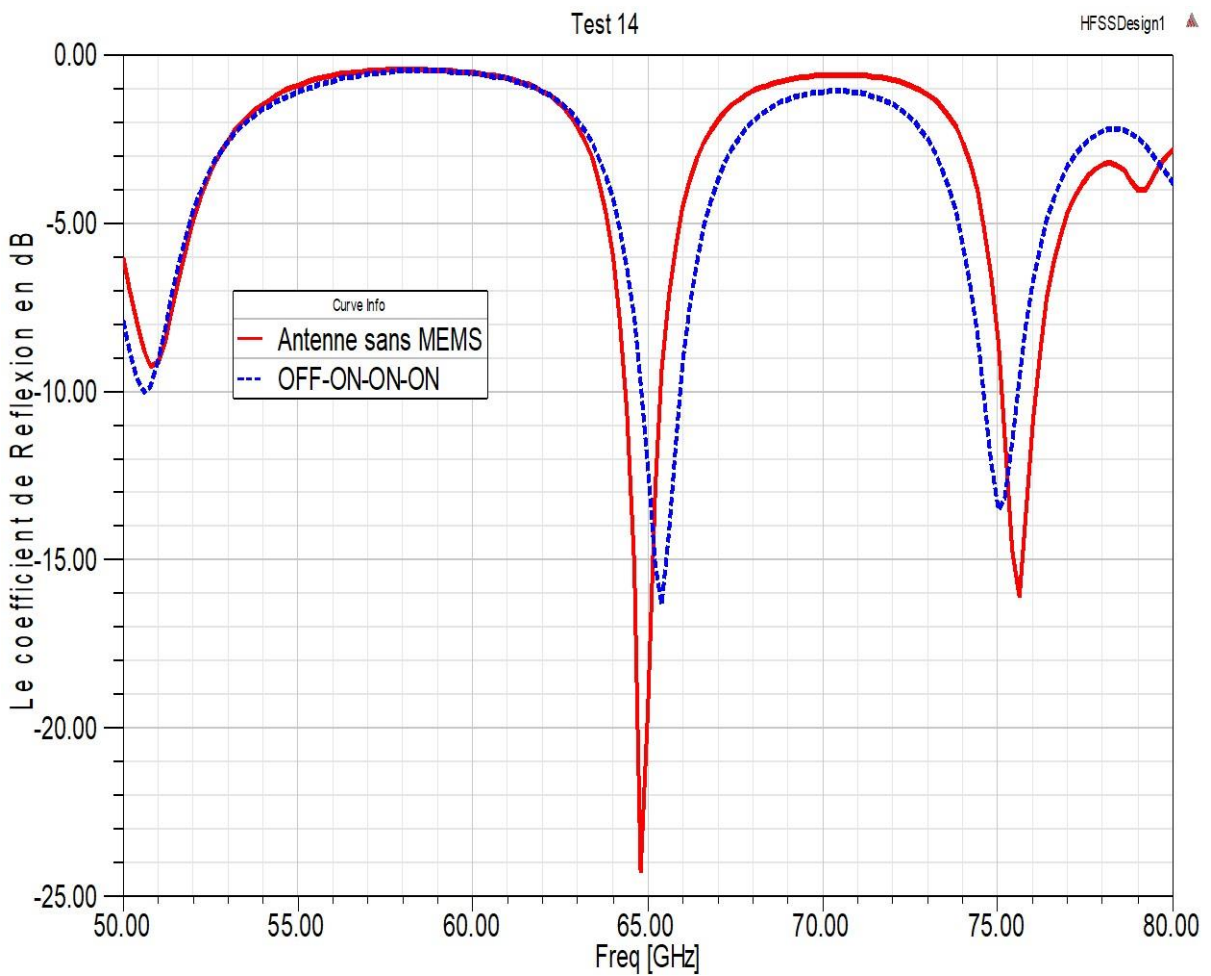
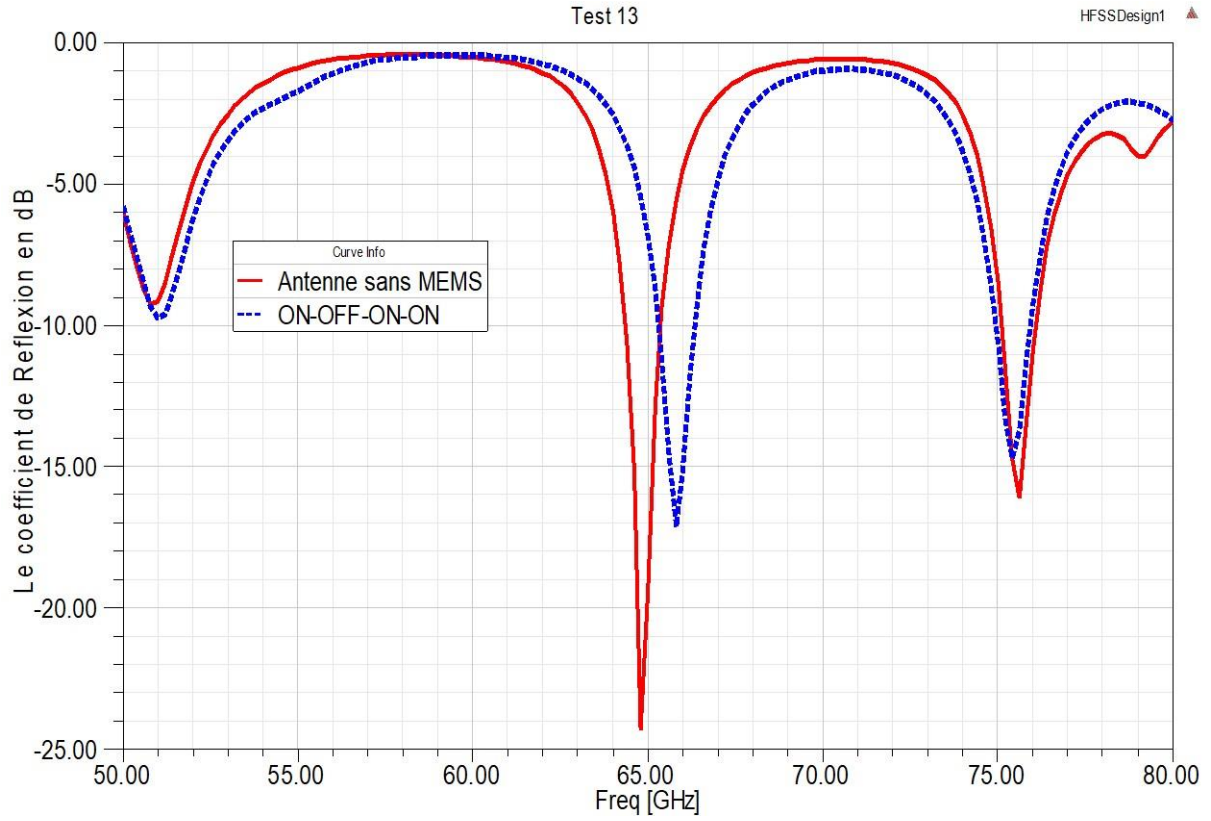












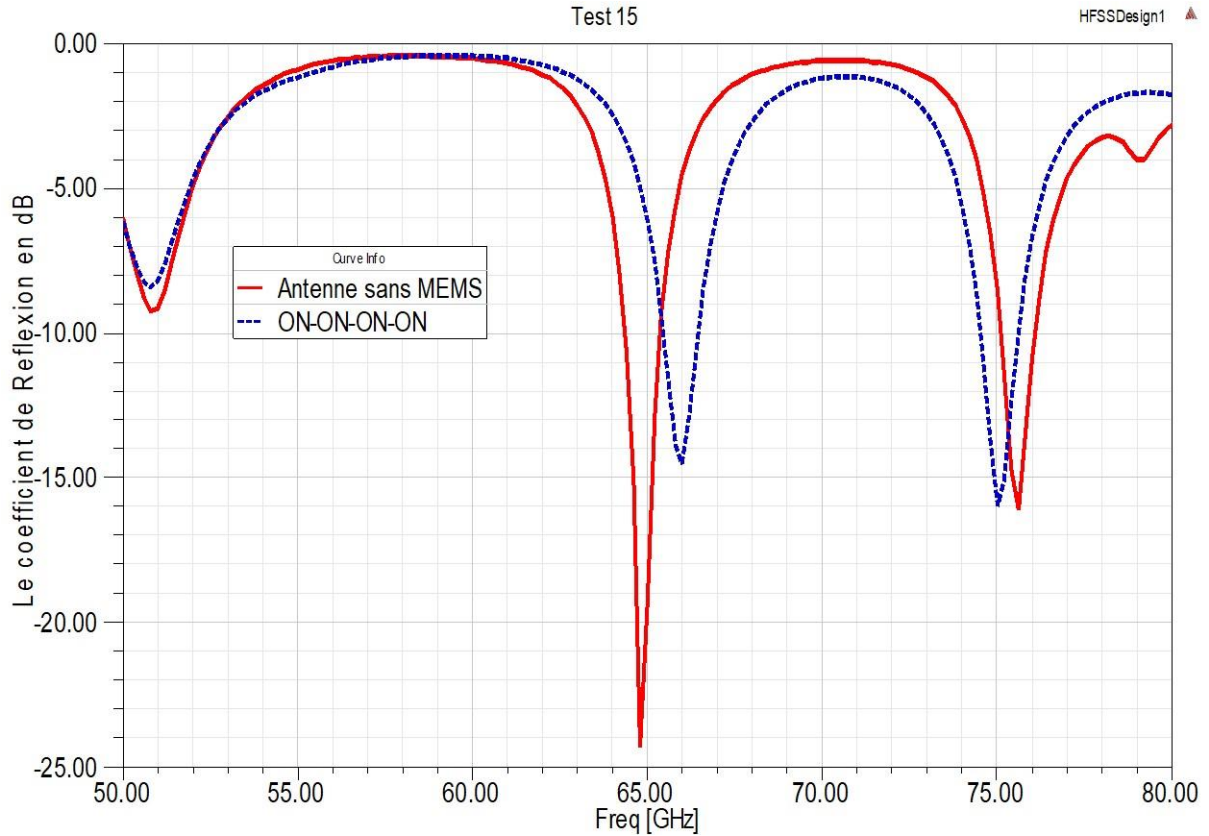


Figure 3.9 : Les résultats de simulations pour les 16 états des quatre Switches MEMS.

En comparant les coefficients de réflexion S_{11} obtenues dans les cas illustrés par la Figure 3.9, il faut noter que :

○ Remarque1 :

On peut faire l'ajustement des deux fréquences de résonances fr_1 et fr_2 ensemble comme les résultats trouvés dans les tests (1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 14 et 15). Les résultats de simulation de ces tests sont illustrés sur la figure 3.10. Nous remarquons que la fréquence de résonance de l'antenne fr_1 déplace vers les hautes fréquences et nous constatons aussi un décalage de la fréquence de résonance fr_2 vers les basses fréquences.

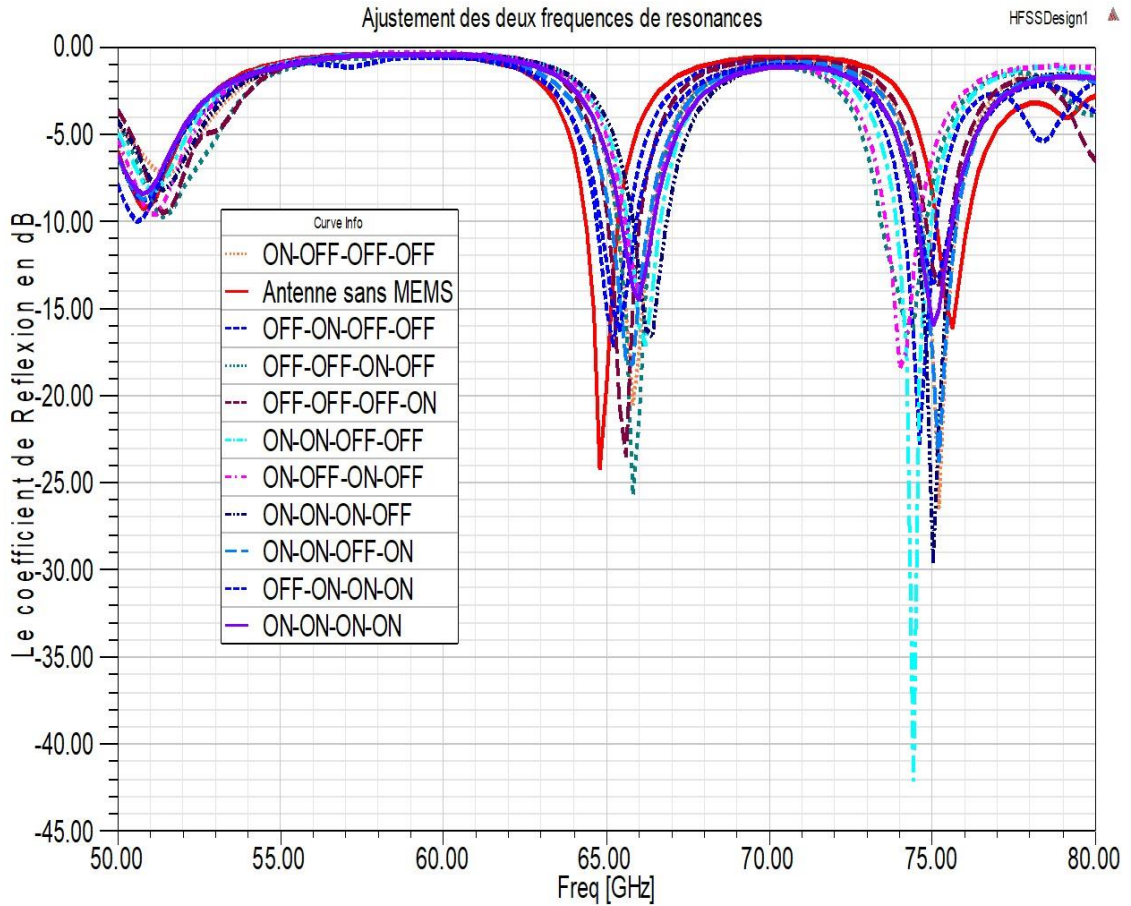


Figure 3.10 : L'ajustement des deux résonances ensemble

A la fréquence $f = 60$ GHz, nous présentons le gain pour les différents tests (3, 4, 6, 11, 12, 14 et 15) pour l'angle ϕ égal à 0° et ϕ égal à 90° .

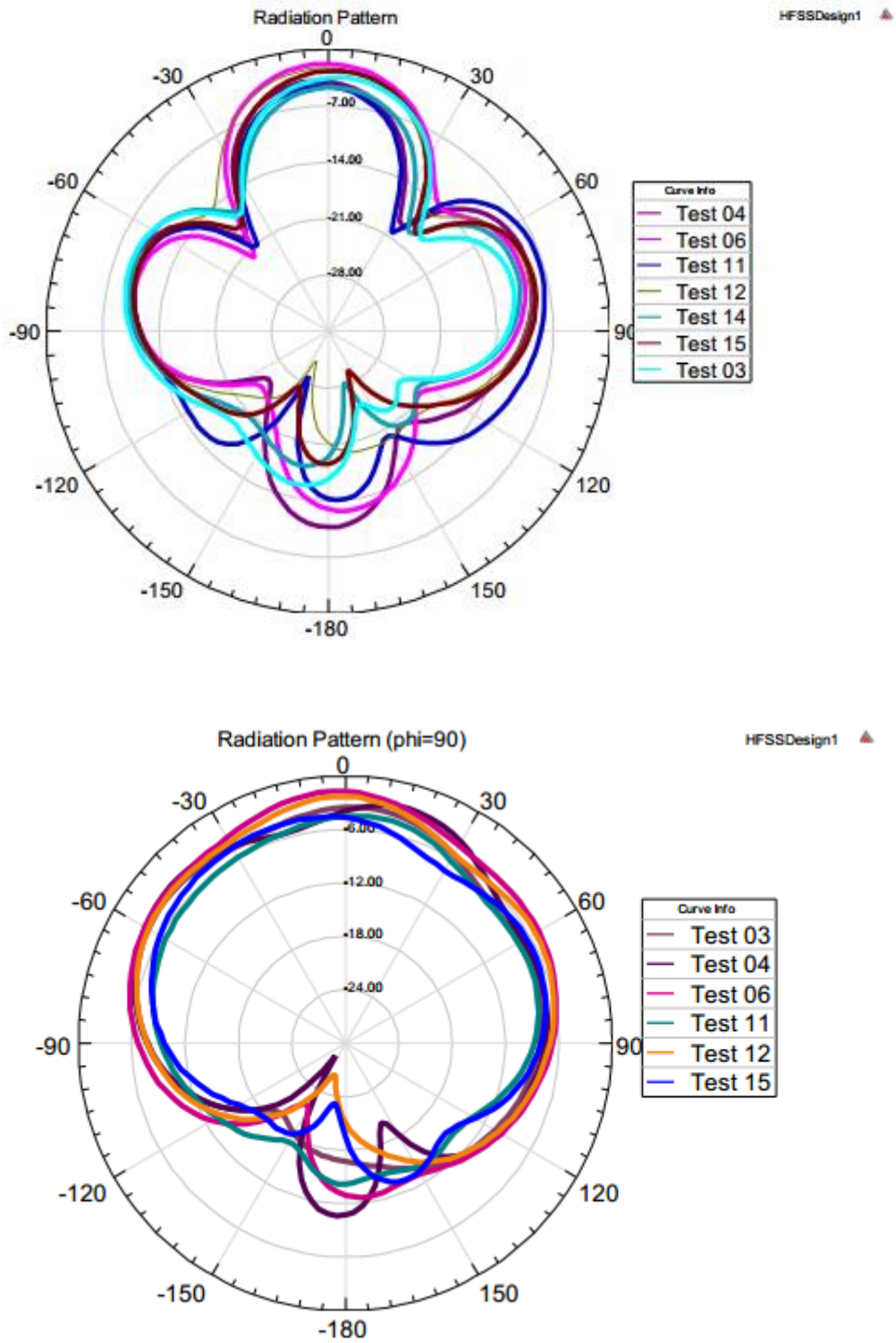


Figure 3. 11: Gain de la structure de l’antenne pour les tests 3, 4, 6, 11, 12 et 15 lorsque $\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$.

○ Remarque2

On peut faire l’ajustement de la première fréquence de résonance indépendamment de la deuxième résonance comme indiqué dans les tests (10,13 et 16).

Les résultats pour les tests 10, 13 et 16 sont montrés dans la figure 3.12, on constate une augmentation de 64.8 GHz à 66 GHz de la première fréquence de résonance, tandis que la deuxième fréquence de résonance reste constante.

A la fréquence $f = 60$ GHz, nous présentons le gain pour les différents tests (10 et 16) pour l'angle ϕ égal à 0° et ϕ égal à 90° (figure 3.13).

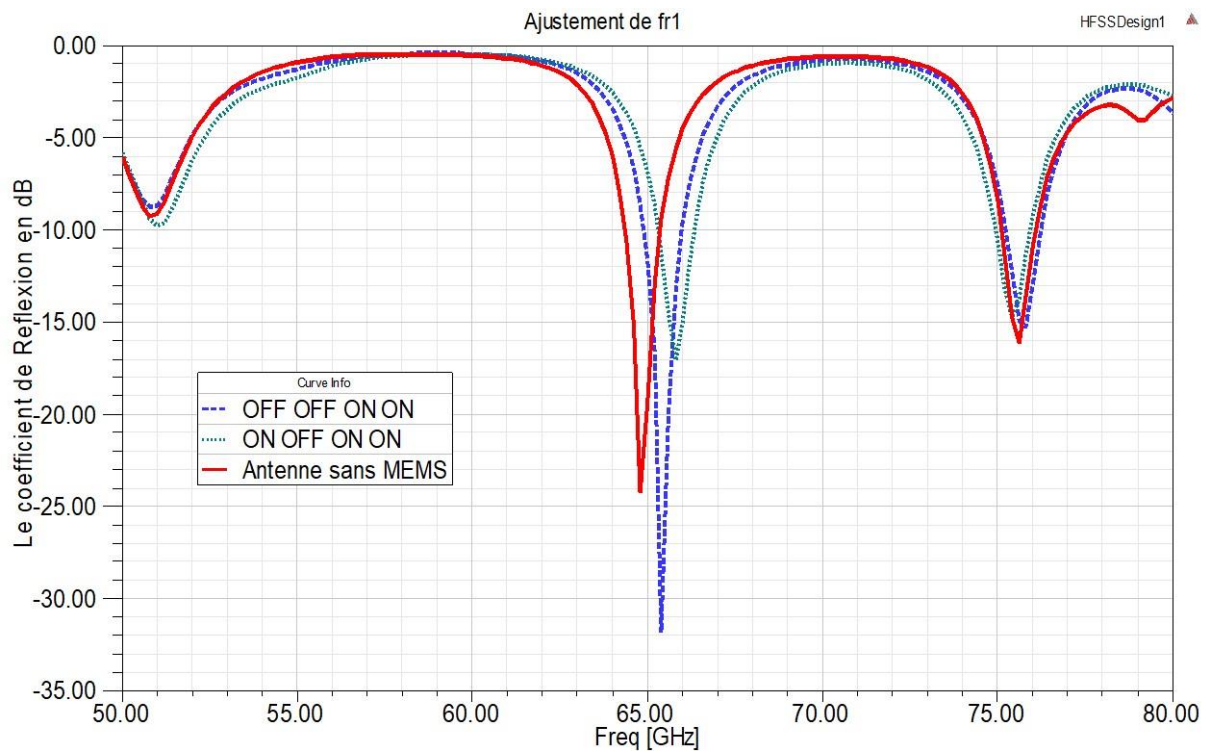


Figure 3. 12: L'ajustement de la première fréquence de résonance

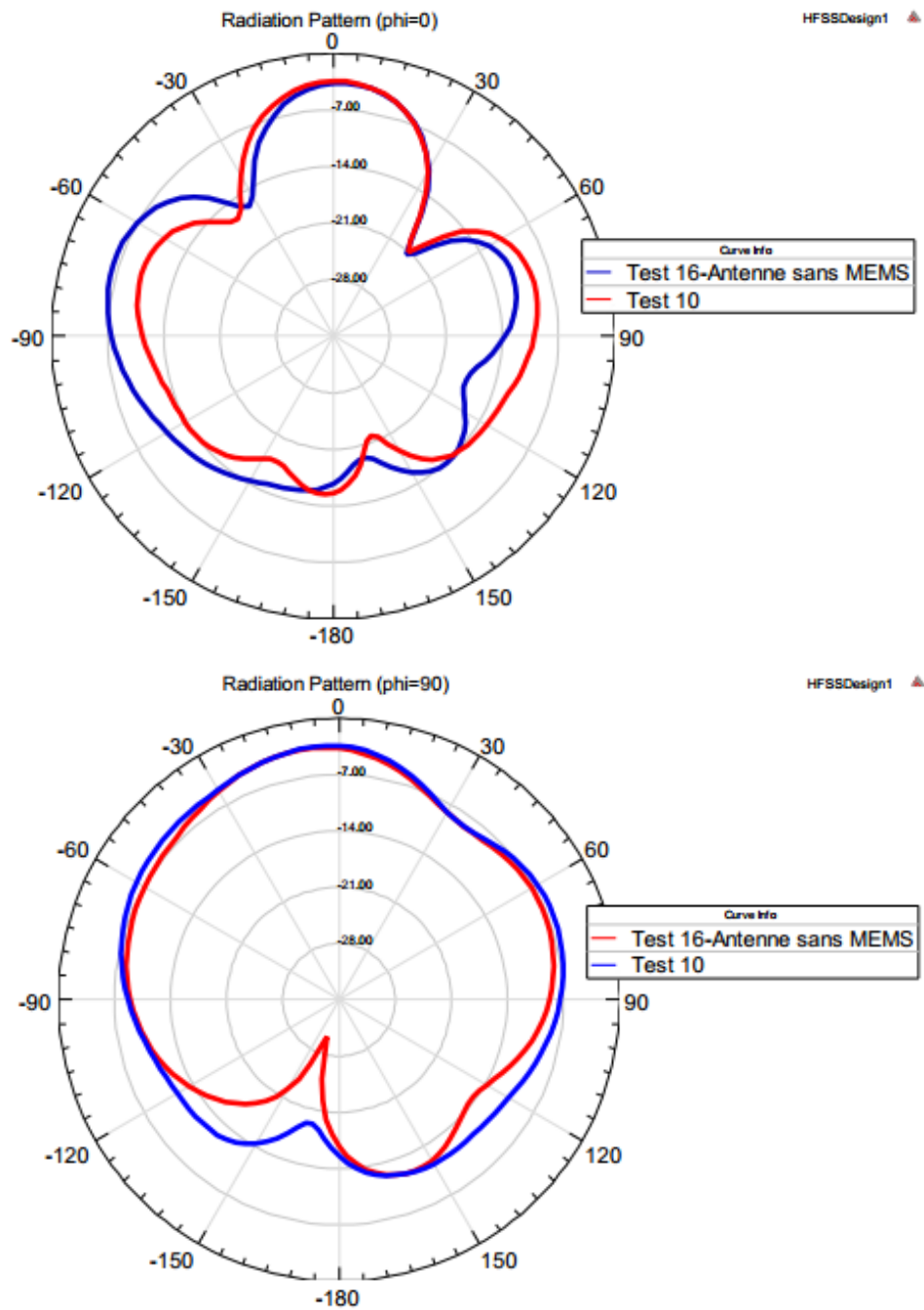


Figure 3.13 : Gain de la structure de l'antenne pour les tests 10 16 lorsque $\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$

○ Remarque3 :

On peut faire l'ajustement de la deuxième fréquence de résonance indépendamment de la première résonance comme indiqué dans les tests (7, 8 et 9 et 16).

La figure (3.14) montre que, la première fréquence de résonance ne change pas alors que la deuxième fréquence diminue de 75,5 GHz à 74.9 GHz. Les gains de l'antenne pour les tests 8, 9 et 16 sont simulés dans les plans du champ électromagnétique E et H à la fréquence 60 GHz comme le montre la figure (3.15)

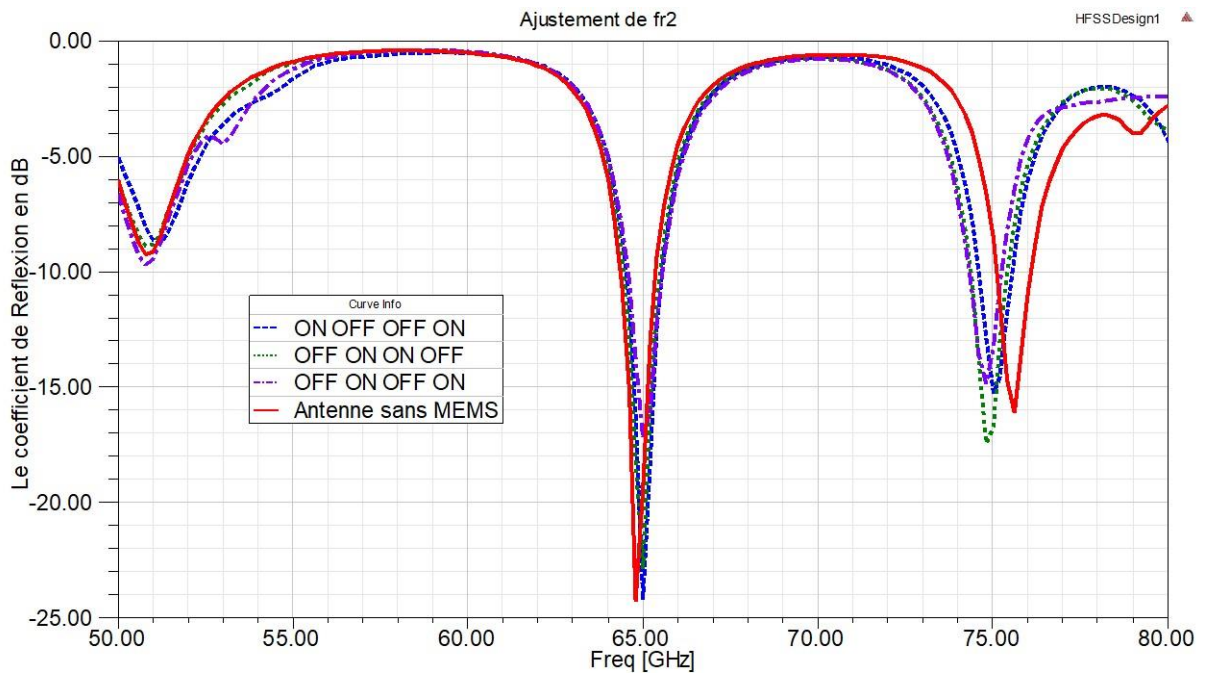
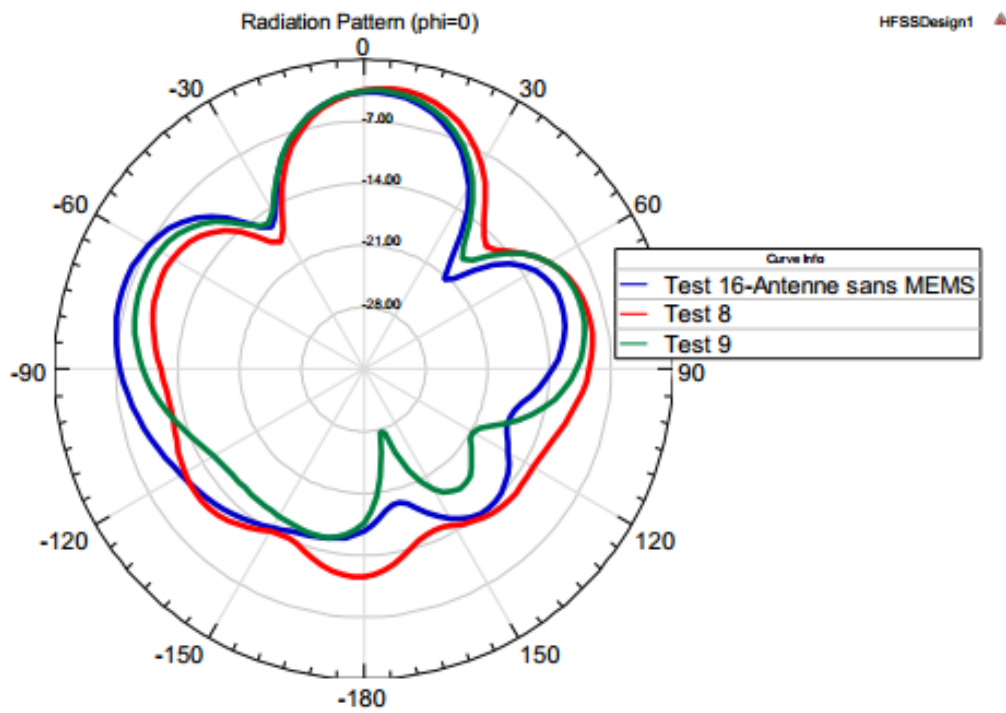


Figure 3. 14: L'ajustement de la deuxième fréquence de résonance



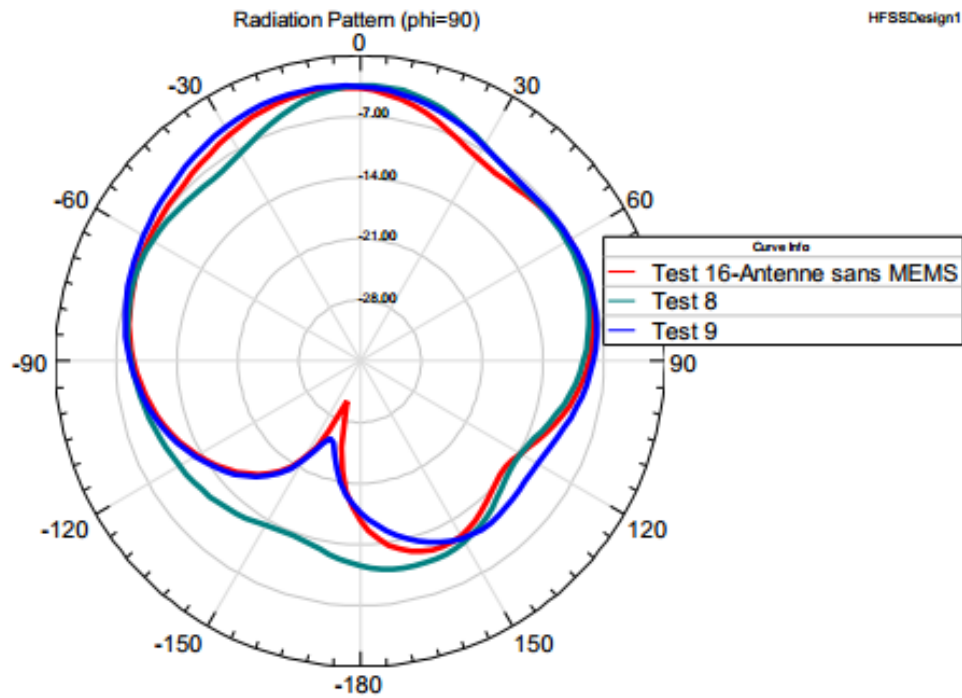


Figure 3.15 : Gain de la structure de l’antenne pour les tests 8, 9 et 16 lorsque $\phi=0^\circ$ et $\phi=90^\circ$

Afin de pouvoir étudier les différents Tests, les figures (3.10, 3.12 et 3.14) permettent de constater que les deux fréquences de résonance de la structure proposée sont contrôlées indépendamment l’une de l’autre lorsque. Cette caractéristique montre une bonne flexibilité de la structure proposée.

Le tableau 3.1 suivant résume les changements dans les fréquences de résonances et leurs adaptations pour les 16 états des Switch MEMS (M1, M2, M3 et M4).

Tableau 3.1 : chaque état des Switch MEMS avec les changements survenus :

Numéro de test	Fréquence de résonance (GHz)	S11 (dB)	Etat des Switch MEMS			
			M1	M2	M3	M4
Test 16 (antenne sans MEMS)	65.20	-18.97	OFF	OFF	OFF	OFF
	75.20	-20.95				
Test 1	65.00	-18.61	ON	OFF	OFF	OFF
	74.80	-24.59				
Test 2	66.20	-18.62	OFF	ON	OFF	OFF
	74.40	-32.83				

Test 3	65.40	-20.35	OFF	OFF	ON	OFF
	74.80	-19.63				
Test 4	66.00	-25.67	OFF	OFF	OFF	ON
	74.80	-20.13				
Test 5	65.60	-13.98	ON	ON	OFF	OFF
	74.20	-21.32				
Test 6	66.20	-19.25	ON	OFF	ON	OFF
	75.20	-17.60				
Test 7	65.20	-22.58	ON	OFF	OFF	ON
	74.60	-14.34				
Test 8	65.00	-16.00	OFF	ON	ON	OFF
	75.00	-12.64				
Test 9	66.00	-19.48	OFF	ON	OFF	ON
	74.80	-21.02				
Test 10	65.20	-38.92	OFF	OFF	ON	ON
	75.20	-16.52				
Test 11	65.00	-22.76	ON	ON	ON	OFF
	74.60	-18.15				
Test 12	65.60	-21.90	ON	ON	OFF	ON
	75.20	-19.44				
Test 13	65.80	-18.75	ON	OFF	ON	ON
	75.20	-14.81				
Test 14	65.20	-19.95	OFF	ON	ON	ON
	75.20	-15.76				
Test 15	66.00	-18.89	ON	ON	ON	ON
	75.60	-19.30				

Ce tableau permet nous de voir que la reconfigurabilité est bien vérifiée avec une bonne adaptation de l'antenne et deux bandes passantes étroite. On voit que l'effet de reconfigurabilité permet nous de switcher entre les différentes fréquences sans changer l'antenne, si on désire passer par différents services on peut facilement grâce à les antennes reconfigurables.

3.6 Conclusion

En conclusion, les commutateurs MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) se révèlent être des composants essentiels et efficaces dans la reconfiguration des antennes. Leur capacité à fournir une commutation rapide et précise entre différentes configurations d'antennes offre de nombreux avantages dans les systèmes de communication modernes. Les commutateurs MEMS offrent une faible perte d'insertion, une grande fiabilité, une faible consommation d'énergie et une compatibilité avec des fréquences élevées, ce qui en fait un choix privilégié pour les applications de reconfiguration d'antennes.

En exploitant la technologie MEMS, les ingénieurs peuvent concevoir des systèmes d'antennes plus flexibles et adaptatifs, capables de s'ajuster aux changements de conditions de propagation, aux interférences ou aux besoins spécifiques de communication. Cette efficacité dans la reconfiguration des antennes contribue à améliorer la qualité des communications sans fil, à augmenter la capacité du réseau et à réduire les coûts opérationnels.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons examiné les antennes reconfigurables, qui ont suscité un grand intérêt au cours des dernières décennies, en particulier dans le domaine des télécommunications. En effet, les antennes reconfigurables offrent la possibilité de basculer entre différentes fonctionnalités en utilisant des composants actifs tels que les diodes PIN et les Switches MEMS. Ces antennes ont la capacité de modifier leurs caractéristiques en fonction des changements dans leur environnement. La reconfiguration de la fréquence et du diagramme de rayonnement est souvent interdépendante dans un même système. Notre étude s'est principalement concentrée sur les antennes reconfigurables en termes de fréquence.

Tout d'abord, nous avons défini les antennes on générale, ensuite les antennes reconfigurables, ainsi que les techniques permettant de les reconfigurer en termes de fréquence. Nous avons présenté des exemples d'antennes reconfigurables en plein essor, en fournissant des définitions, des méthodes de production de l'agilité et une classification en fonction de leur type d'antenne reconfigurable. Nous avons également conçu et caractérisé une antenne multi-bandes reconfigurable en fréquence, en illustrant notre propos avec des exemples. où, nous avons fait la conception d'une antenne reconfigurable utilisant des diodes, en utilisant le logiciel de simulation électromagnétique HFSS basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel nous a permis de modéliser les diodes PIN dans leurs deux états, ON et OFF, via l'interface Design Studio.

Dans la dernière partie, en utilisant simulateur HFSS, nous avons créé une autre antenne reconfigurable composée de trois pièces connectées entre elles au moyen de quatre commutateurs MEMS dans leurs états ON et OFF, et nous avons obtenu des résultats que nous avons notés. Nous avons également dessiné et commenté les variables les plus importantes, le coefficient de réflexion et le diagramme de rayonnement.

Enfin, nous avons formulé une conclusion générale et esquissé des perspectives pour de futures recherches. Il est également envisageable d'améliorer davantage cette étude en relevant le défi de la conception d'antennes reconfigurables en termes de polarisation ou de directivité.

Bibliographie

[1]ADJILA, F., & MELATI, N. (2019, 07). ETUDE ET CONCEPTION D'UNE ANTENNE FRACTALE RECONFIGURABLE EN FREQUENCE . Université 8 Mai 1945 Guelma.

[2] Amel, C. (2017/2018). Etude et conception d'une antenne reconfigurable pour les applications WLAN. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.

[3] BOUDJELLA, S. (2014). ETUDE ET SIMULATION DES MICROSYSTEMES A BASE DE LA TECHNOLOGIE MEMS. Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem.

[4]BOUTAHAR, M. E., & BABOUCHE, I. (2022, 06 22). Antenne planaire reconfigurable multistandard. Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj.

[5]Cherifa, L. (2022, 06). Etude Et Conception D'une Antenne MIMO Reconfigurable. Université 8Mai 1945 – Guelma.

[6]Direct Industry. (s.d.). Récupéré sur Directindustry.fr: <https://www.directindustry.fr/prod/ansys/product-9123-504436.html>

[7] Souai, S. (2021, 04 07). Réseaux d'antennes miniatures super-directifs reconfigurables basses fréquences pour l'IoT. l'université Tunis ELMANAR, Tunis.

[8] GUEDOUDOU, A. S., & ERROUANE, I. (2020/2021). Simulation d'antenne patch à dépointage de faisceau pour des applications spatiales. Université - Belhadj Bouchaib–Ain Temouchen.

[9] PRIME Faraday Partnership. (2002, 01). An Introduction to MEMS. Loughborough, Leics, Loughborough University, angleterre.

[10]laacheb, m., & salhi, n. h. (2020/2021). Etude et Simulation des antennes micro-ruban à plan de masse perturbé. Université Batna 2- Mostefa Ben Boulaïd.

[11] Schweber, B. (2019, 08 15). *Digi key*. Récupéré sur Digikey.fr: <https://www.digikey.fr/fr/articles/use-mems-rf-switches-to-solve-advanced-wireless-designand-integration-issues>

[12] NGUYEN, T. D. (2012, 10 24). Conception d'antenne intelligente reconfigurable pour la radio cognitive. Université de Grenoble, france.