

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Technologies et Systèmes de Télécommunications

Par : **BOUDGHENE Stambouli Hadjer** et **BOUNEBBAB Sabiha**

Sujet

**Étude et Conception d'Antennes à Résonateurs
Diélectriques**

Soutenu publiquement, le **22 /06/ 2017** , devant le jury composé de :

Mr M. CHIKH BLED

Professeur à l'université de Tlemcen

Président

Mr A. BOUACHA

MCA à l'université de Tlemcen

Examinateur

Mr BOUSAHLA Miloud

MCB à l'université de Tlemcen

Encadreur

Remerciement

Nous tenons avant tout à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté pour achever ce modeste travail.

Nous tenons à remercier particulièrement nos parents ; notre succès demeure de loin le fruit de leurs longues années de sacrifices et d'éducation.

Ce travail de Master a été dirigé par Monsieur BOUSAHLA MILOUD Maitre de conférences à l'université de Tlemcen qui a suivi attentivement et activement la progression de notre travail. Nous lui exprimons toute notre gratitude pour la confiance qu'il nous a témoignée et pour son encadrement, à la fois constructif et instructif. Nous le remercions aussi pour son prestigieux aide, sa disponibilité et avis éclairés.

Nous remercions également Mr M. CHIKH BLEED Professeur à l'université de Tlemcen pour avoir accepté de présider le jury.

Nous adressons nos remerciements à Mr A. BOUACHA Maitre de conférences à l'université de Tlemcen pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de faire partie du jury.

Nous avons particulièrement apprécié le climat et l'ambiance générale de travail au sein du laboratoire L.T.T. Sans exception, nous remercions toutes les personnes du laboratoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui n'ont pas cessé de m'encourager durant toutes mes études

À mes frères, Mohamed, Rachid et Houcine

À mes sœurs, Nahida et Zahra, Hadile

À mes amis et toute la promotion TST

Ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont aidés à la réalisation de notre travail.

Bounebbab Sabiha

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents qui n'ont pas cessé de m'encourager durant toutes mes études, je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour, que dieu vous garde pour moi.

A mon très cher mari Amine, qui m'a soutenue tout au long de ce projet, qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, c'est grâce à ton aide et à ta patience que j'ai pu réaliser ce travail

À mes frères, Mohamed el Hadi et Othman

A mes sœurs, Zineb et Sarah

A mes beaux parents, Djalal et Baya, je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur et de santé

À mes amis et toute la promotion TST

Ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont aidés à la réalisation de notre travail.

Boudghène stambouli hadjer

Résumé

Souvent utilisés comme circuits résonants de base pour la réalisation de filtres et d'oscillateurs hyperfréquences, les résonateurs diélectriques possèdent des caractéristiques intéressantes pour réaliser des dispositifs rayonnants : les antennes à résonateur diélectrique.

Les antennes à résonateur diélectrique offrent de bonnes performances et fournissent une solution de rechange face à la technologie micro-ruban en termes de largeur de bande, de compacité et d'efficacité de rayonnement due à l'absence de pertes métalliques.

Ce projet de fin d'étude vise alors à concevoir des antennes à résonateur diélectrique. Trois antennes à résonateur diélectrique ont été étudiées et conçues. La première antenne simulée est une antenne à résonateur diélectrique rectangulaire, la seconde antenne est une antenne à résonateur diélectrique cylindrique et finalement la troisième antenne conçue est une antenne à résonateur diélectrique conique.

La géométrie et les dimensions de ces antennes ont été optimisées en utilisant le logiciel CST. Pour chaque antenne, nous avons fait plusieurs simulations afin de déterminer les paramètres de l'antenne qui influencent le plus ses performances.

Mots-clés : Résonateur diélectrique, Simulation, Conception, Antenne à résonateur diélectrique, CST Microwave Studio.

Abstract

Often used as basic resonant circuits for the realization of filters and oscillators ultra high frequencies, the dielectric resonators have interesting characteristics to carry out radiant devices: dielectric resonator antennas.

The dielectric resonator antennas offer good performances and provide an alternative vis-a-vis technology microphone-ribbon in terms of effectiveness and, compactness bandwidth of radiation due to the absence of metal losses.

This project of end of study then aims at designing dielectric resonator antennas. Three dielectric resonator antennas were studied and designed. The first simulated antenna is a rectangular dielectric resonator antenna, the second antenna is a cylindrical dielectric resonator antenna and finally the third designed antenna is a conical dielectric resonator antenna.

The geometry and dimensions of these antennas were optimized by using software CST. For each antenna, we made several simulations in order to determine the parameters of the antenna which influence more its performances.

Key words : Dielectric resonator, Simulation, Design, Antenna with dielectric resonator, CST Microwave Studio

LISTE DES ABREVIATIONS

A_a : Le rayon de résonateur

B_{BP} : Bande Passante.

C_{CST} : Computer System Technology

E_E : Le champ électrique.

$E_{\epsilon r}$: Permittivité diélectrique.

F_r :Fréquence de Résonance.

F_{TE} :Fréquence de Résonance de mode TE.

F_{TM} :Fréquence de Résonance de mode TM.

F_{HEM} :Fréquence de Résonance de mode HEM.

H_H : Champ magnétique

H_{HEM} : mode hybride.

H_h :Epaisseur du substrat

L_L :Longueur.

M_m : Représente le nombre de variations azimutales du champ (en ϕ)

N_n : Représente le nombre de variations radiales du champ (en r).

P_P : Représente le nombre de variations longitudinales du champ (en z).

Q_Q : Le facteur de qualité

R_r : rayon du résonateur.

S_{S11} : Coefficient de réflexion.

T_{TEM} : Transverse électromagnétique.

$T_{Tan(\delta)}$:Tangente des pertes.

T_{TE} :Transverse électrique.

T_{TM} : Transverse magnétique.

W : Largeur.

Sommaire

Liste des figures	4
Introduction générale.....	6
Chapitre I : Généralités sur les antennes	7
I.1 Introduction.....	8
I.2 Définition d'une antenne	8
I.3 Les paramètres fondamentaux des antennes	8
I.3.1 L'impédance	8
I.3.2 L'adaptation.....	9
I.3.3 Le diagramme de rayonnement	10
I.3.4 Angle d'ouverture.....	10
I.3.5 La directivité d'une antenne	11
I.3.6 Le gain d'une antenne	11
I.3.7 Polarisation d'une antenne	12
I.3.8 Rendement	12
I.3.9 Bande passante et facteur de qualité	13
I.4 Antenne imprimée ou antenne patch	13
I.4.1 Structure d'une antenne imprimée.....	13
I.4.2 Techniques d'alimentation	14
I.5 Conclusion	14
Chapitre II Les antennes à résonateurs diélectriques	15
II.1 Introduction.....	16
II.2 Définition des résonateurs diélectriques	16
II.3 Historique	16
II.4 Matériaux usuels utilisés comme RD	18
II.5 Les formes des résonateurs diélectriques.....	18
II.6 Modes de fonctionnement des résonateurs diélectriques.....	19
II.6.1 Résonateurs diélectriques cylindriques	19
II.6.1.1 Le mode $TE_{01\delta}$	19
II.6.1.2 Le mode $TM_{01\delta}$	19
II.6.1.3 Le mode $HEM_{11\delta}$	19

II.6.1.4 Effet de la permittivité sur la fréquence de résonance	19
II.6.2 Résonateurs diélectriques rectangulaires.....	27
II.7 Avantages des résonateurs diélectriques	30
II.8 Antennes à résonateurs diélectriques.....	30
II.8.1 Antenne à résonateur diélectrique rectangulaire.....	31
II.8.2 Antenne à résonateur diélectriques cylindrique.....	31
II.8.3 Antenne à résonateur diélectriques demi-sphérique	32
II.9 Les techniques d'alimentation des antennes à résonateur diélectrique	33
II.9.1 Alimentation par une ligne microruban	33
II.9.2 Alimentation par un câble coaxial.....	35
II.10 Les avantages des antennes à résonateurs diélectriques (ARD).....	36
II.11 Conclusion	36
Chapitre III Étude et conception des antennes à résonateurs diélectriques	38
III.1 Introduction.....	39
III.2 Etude et conception d'une antenne à résonateur diélectrique rectangulaire	39
III.2.1 Effet de la longueur du résonateur	45
III.2.2 Effet de la largeur du résonateur W_a	46
III.2.3 Effet de la hauteur du résonateur h_1 :.....	46
III.2.4 Influence des dimensions de la fente.....	47
III.2.5 Effet de la largeur de la fente w_s	47
III.2.6 Effet de la longueur de la fente l_s :.....	48
III.2.7 Effet de la longueur du stub e	49
III.3 Etude et conception d'une antenne à résonateur diélectrique cylindrique	50
III.3.1 Etude paramétrique	53
III.4 Etude et conception d'une antenne à résonateur diélectrique conique	58
III.5 Conclusion	60
Conclusion générale.....	61
Bibliographie.....	63

Liste des figures

Figure I.1 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directionnelle	10
Figure I.2 : Diagramme de rayonnement coordonnées cartésiennes	11
Figure I.3 : Structure de l'antenne imprimée	14
Figure II.1 : Résonateur diélectrique	17
Figure II.2 : Les différentes formes d'un résonateur diélectrique	19
Figure II.3 : Résonateur diélectrique cylindrique	20
Figure II.4 : Variation de $k_0 a$ en fonction du rapport a/h	22
Figure II.5 : Variation du facteur de qualité Q en fonction du a/h	22
Figure II.6 : Variation de $k_0 a e_n$ en fonction du rapport a/h	23
Figure II.7 : Variation du facteur de qualité en fonction du rapport a/h	24
Figure II.8 : Variation de $k_0 a e_t$ du facteur de qualité en fonction du rapport a/h	25
Figure II.9 : Variation de $k_0 a e_t$ du facteur de qualité en fonction du rapport a/h	26
Figure II.10 : Influence de permittivité de résonateur sur la fréquence de résonance	27
Figure II.11 : Résonateur diélectrique rectangulaire	28
Figure II.12 : Lignes de champs de différents modes	29
Figure II.13 : Antenne à résonateur diélectrique rectangulaire	31
Figure II.14 : Antenne à résonateur diélectrique cylindrique	32
Figure II.15 : Antenne a résonateur diélectrique demi-sphérique	33
Figure II.16 : Excitation de l'antenne par une ligne microruban	34
Figure II.17 : Alimentation avec fente de couplage	34
Figure II.18 : Résonateur diélectrique excité par une sonde coaxiale	35
Figure II.19 : Résonateur diélectrique excité par une sonde coaxiale	35
Figure III.1 : Structure de l'antenne à résonateur diélectrique rectangulaire en 2D	40
Figure III.2 : Structure de l'antenne à résonateur diélectrique rectangulaire en 3D	40
Figure III.3 : Antenne à RD rectangulaire alimentée par port discret	42
Figure III.4 : Coefficient de réflexion (S11), alimentation par port discret	42
Figure III.5 : Antenne à RD rectangulaire alimentée par sonde coaxiale	43
Figure III.6 : Coefficient de réflexion (S11), alimentation par sonde coaxiale	43
Figure III.7 : Diagrammes de rayonnement simulé en 3D pour $f = 5.887$ Hz	44
Figure III.8 : Coefficient de réflexion (S11), pour différentes valeurs	45

Figure III.9 : Coefficient de réflexion (S11), pour différentes	46
Figure III.10 : Coefficient de réflexion (S11), pour différentes valeurs.....	47
Figure III.11 : Coefficient de réflexion (S11), pour différentes	48
Figure III.12 : Coefficient de réflexion (S11), pour différentes valeurs.....	49
Figure III.13 : Coefficient de réflexion (S11), pour	50
Figure III.14 : Structure de l'antenne à résonateur diélectrique	51
Figure III.15 : Structure de l'antenne à résonateur diélectrique	51
Figure III.16 : Coefficient de réflexion (S 11) en fonction de la fréquence	52
Figure III.17 : Diagrammes de rayonnement en 2D et 3D pour $f = 6.07$ GHz.....	52
Figure III.18 : Variation de la fréquence de résonance.....	53
Figure III.19 : Diagrammes de rayonnement en 2D et en 3D pour $f = 5.33$ GHz.....	54
Figure III.20 : Variation de la fréquence de résonance en fonction du rayon (r)	55
Figure III.21 : Variation de la fréquence de résonance en fonction	56
Figure III.22 : Influence de la longueur de la fente l_s	57
Figure III.23 : Influence de la largeur de la fente w_s	57
Figure III.24 : Géométrie de l'antenne conique.....	58
Figure III.25 : Antenne conique alimentée par sonde coaxiale	58
Figure III.26 : Coefficient de réflexion S11	59
Figure III.27 :Diagramme de rayonnement en 3D pour $f = 6.34$ GHz	59
Figure III.28 : Influence de la valeur du rayon R2 sur la fréquence de résonance	60

Introduction générale

Dans le domaine des microondes, les résonateurs diélectriques ont pris une place très importante dans différents systèmes, aussi bien passifs, qu'actifs, comme par exemple, les oscillateurs, les dispositifs de filtrage et les antennes.

Les antennes à résonateur diélectrique, composé principalement de résonateurs de formes variées, constitue une alternative intéressante aux antennes imprimées qui offrent une bande passante limitée et présentent des pertes dans le domaine des microondes.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif l'étude et la conception d'antennes à résonateur diélectrique. Pour atteindre cet objectif, le présent travail est réparti sur trois chapitres, dont nous donnons une brève description dans les lignes suivantes.

Le premier chapitre comprend quelques généralités sur les antennes imprimées. Nous commençons par donner une définition ainsi que les caractéristiques de ces antennes telles que; le diagramme de rayonnement, gain et directivité, l'adaptation etc. Les techniques d'alimentation ont été aussi introduites.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter dans un premier temps les résonateurs diélectriques. Ensuite, nous présenterons leurs modes de fonctionnement ainsi que les formules de détermination de leurs fréquences de résonance et leurs facteurs de qualité pour les formes cylindrique et rectangulaire.

Le dernier chapitre de ce mémoire de master s'intéresse à l'étude et à la conception d'antennes à résonateur diélectrique. Nous commencerons par présenter une antenne à résonateurs diélectriques rectangulaire. Cette antenne est conçue et optimisée afin de fonctionner à la fréquence 5.88 Ghz. Nous présenterons par la suite une antenne à résonateur diélectrique cylindrique et en fin une antenne à résonateur diélectrique conique.

La géométrie et les dimensions de ces antennes ont été optimisées en utilisant le logiciel CST. Pour chaque antenne, nous avons fait plusieurs simulations afin de déterminer les paramètres de l'antenne qui influencent le plus ses performances.

Enfin, ce document se termine par une conclusion générale et une bibliographie qui comprend les références des documents utilisés dans notre travail.

Chapitre I : Généralités sur les antennes



I.1 Introduction

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou pour le capter. Il existe de nombreux types d'antennes. Il est important d'avoir une connaissance globale de leur fonctionnement lors du choix d'un dispositif rayonnant. La compréhension de ce fonctionnement aidera, d'une part à utiliser l'antenne au mieux de ses performances et d'autre part, à en réaliser une conception optimale.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les caractéristiques générales des antennes telles que; le diagramme de rayonnement, gain, directivité, la polarisation et la bande passante.

En fin de ce chapitre, nous définirons les antennes imprimées utilisées dans notre travail et nous donnerons les techniques d'alimentation de ces antennes.

I.2 Définition d'une antenne

Une antenne est un dispositif permettant de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission ou en réception. Une antenne peut émettre dans toutes les directions (antenne omnidirectionnelle) ou dans une direction définie (antenne sectorielle ou directionnelle).[1]

I.3 Les paramètres fondamentaux des antennes

De nombreux paramètres sont utilisés pour décrire les caractéristiques et les performances des antennes tels que l'impédance d'entrée, le coefficient de réflexion, la directivité, le gain, l'efficacité ainsi que les diagrammes de rayonnement.[2]

I.3.1 L'impédance

Une antenne est caractérisée par son impédance Z_a composée d'une partie réelle R_a et d'une partie imaginaire X_a . L'impédance est donnée par l'expression :

$$Z_a = R_a + j X_a \quad (I.1)$$

La partie réelle est constituée de la résistance de rayonnement R_r et de la résistance des pertes R_l , et dont l'expression est donnée par la relation I.2. L'énergie dissipée par R_r

correspond à l'énergie rayonnée par l'antenne. L'énergie dissipée par R_l correspond aux pertes de conduction, aux pertes diélectriques et aux pertes d'onde de surface de l'antenne.

$$R_a = R_r + R_l \quad (I.2)$$

I.3.2 L'adaptation

Pour acheminer vers l'antenne l'énergie à haute fréquence fournie par l'émetteur ou en sens inverse amener le signal capté par l'antenne jusqu'à l'entrée du récepteur, on utilise une ligne bifilaire ou un câble coaxial.

Afin d'optimiser la réception (ou l'émission), il faut que la liaison antenne/module de réception (ou d'émission) soit réalisée par une ligne d'alimentation dont l'impédance caractéristique est égale à celle de l'antenne (et donc du module de réception ou d'émission).

L'ordre de grandeur de cette impédance est de quelques dizaines voire centaines d'ohms :

- 50 Ω (Ohms) ou 75 Ω pour une ligne coaxiale
- 300 Ω pour une ligne bifilaire

L'adaptation est un procédé qui permet à l'antenne, en émission par exemple, d'accepter le maximum de la puissance fournie par le générateur. Elle est caractérisée généralement par le paramètre S_{11} qui est le rapport entre l'onde incidente (P_{inc}) appliquée à l'entrée de l'antenne et l'onde réfléchie (P_{ref}) vers la source. Il s'exprime en fonction de l'impédance de sortie du générateur et l'impédance d'entrée de l'antenne. Ce paramètre est jugé satisfaisant généralement à partir d'une valeur seuil de 0.1 en linéaire ou de -10 dB. Les expressions (1.3) et (1.4) expriment la valeur de S_{11} en linéaire et en dB. [2]

$$|S_{11}|^2 = \frac{P_{ref}}{P_{inc}} \quad (I.3)$$

$$S_{11}(dB) = 10 \log \frac{P_{ref}}{P_{inc}} \quad (I.4)$$

I.3.3 Le diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale et il est obtenu par la mesure du champ électrique.

Pour une même antenne, le diagramme de rayonnement et le diagramme de captation sont supposés identiques.

Hormis les antennes omnidirectionnelles, les antennes ne rayonnent pas la puissance de manière uniforme dans l'espace. En général, la puissance est concentrée dans un ou plusieurs lobes.

La figure I.1 illustre la répartition spatiale de l'énergie électromagnétique d'une antenne directionnelle. Il montre le lobe principal, qui correspond à la direction privilégiée de rayonnement, les lobes secondaires où l'énergie rayonnée est perdue dans ces directions.[3]

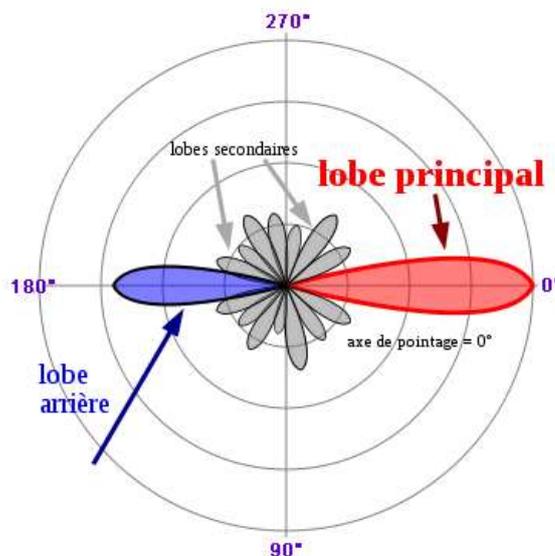


Figure I.1 : Diagramme de rayonnement d'une antenne directionnelle [3]

I.3.4 Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture est l'angle que font entre elles les deux directions du lobe principal selon lesquelles la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal. La figure 1.2 présente un exemple de présentation diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes.

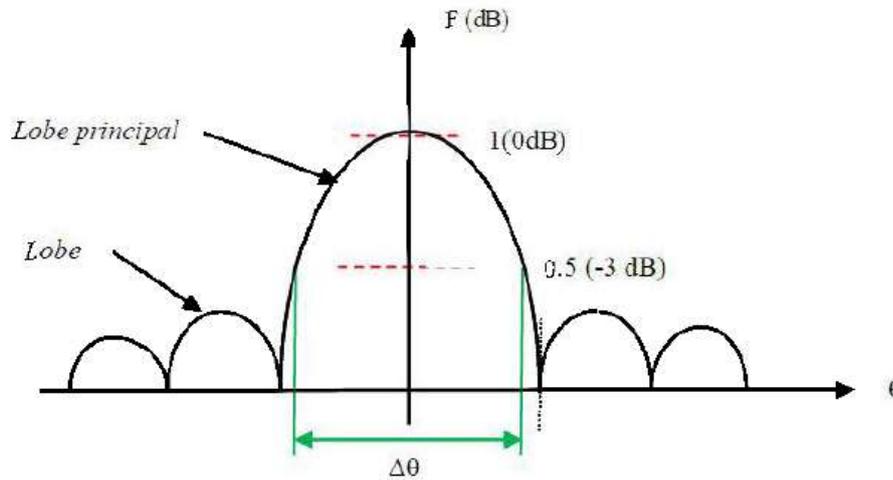


Figure I.2 : Diagramme de rayonnement bidimensionnel en coordonnées cartésiennes [4]

I.3.5 La directivité d'une antenne

La directivité d'une antenne est le rapport de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans la direction (θ, ϕ) à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide pour une même puissance totale rayonnée [5].

$$D(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{\eta \eta P_a} \quad (\text{I.5})$$

La directivité caractérise l'aptitude d'une antenne à concentrer l'énergie dans une ou plusieurs directions privilégiées. C'est un paramètre intrinsèque de l'antenne, sans dimension.

I.3.6 Le gain d'une antenne

Le gain d'une antenne est le facteur le plus important. Plus il est élevé, meilleur est le rendement. Il s'exprime en décibels (dB) et se mesure par rapport à une antenne de référence.

D'une façon générale, une antenne rayonne une puissance qui varie en fonction de la direction considérée. On appelle gain $G(\theta, \phi)$ d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) , le rapport de la puissance $P(\theta, \phi)$ dans cette direction à la puissance $P_0(\theta, \phi)$ que rayonnerait la

source isotrope de référence par unité d'angle solide avec la même puissance d'alimentation, il est donné par la relation:

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_0(\theta, \phi)} = 4\pi \frac{P(\theta, \phi)}{P_a} \quad (\text{I. 6})$$

Le gain et la directivité sont liés par l'équation suivante :

$$G(\theta, \phi) = \eta \eta D(\theta, \phi) \quad (\text{I. 7})$$

I.3.7 Polarisation d'une antenne

La polarisation est linéaire lorsque le champ rayonné à l'infini conserve une direction constante (rectiligne) au cours du temps, et elle est circulaire lorsque l'extrémité du vecteur champ électrique rayonné à l'infini décrit un cercle en fonction du temps.

La polarisation peut être aussi elliptique. Toute onde elliptique peut être considérée comme l'addition vectorielle de deux vecteurs perpendiculaires déphasés dans le temps de 90°. Ces deux composantes peuvent être récupérées au moyen d'antennes à polarisation linéaire. Inversement un champ électrique polarisé linéairement peut être décomposé en deux vecteurs à polarisation circulaire contraire.

I.3.8 Rendement

Pour une antenne donnée, 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 [4] qu'elle rayonne à sa puissance d'alimentation P_a On la note η :

$$\eta = P/P_a \quad (\text{I. 8})$$

I.3.9 Bande passante et facteur de qualité

La bande passante correspond généralement à la plage de fréquences sur laquelle 90% de la puissance incidente est transmise, ce qui correspond à $S_{11} = -10\text{dB}$, et sous condition que le diagramme de rayonnement, ou la répartition de l'énergie rayonné, ne change pas sur cette bande.

D'un point de vue électrique, une antenne peut être vue comme un circuit résonant RLC. La bande passante BW (bande passante à 3 dB de la valeur du champ) est liée au facteur de qualité Q du circuit RLC à la fréquence de résonance f_{Res} . Le facteur de qualité représente la quantité de résistance présente lors de la résonance (pour un circuit résonant série comme le montre l'équation I.9).

$$Q = \frac{f_{Res}}{BW} \rightarrow \frac{1}{Q} = \frac{R_{ant}}{2\pi f_{Res} \cdot L_{ant}} \quad (\text{I. 9})$$

Une antenne avec un fort facteur de qualité rayonne très efficacement à la fréquence de rayonnement sur une bande de fréquence étroite, ce qui peut limiter les interférences hors bande. Un faible coefficient de qualité indique un fonctionnement large bande de l'antenne.

I.4 Antenne imprimée ou antenne patch

I.4.1 Structure d'une antenne imprimée

Elle est composée d'un élément rayonnant qui a une forme géométrique quelconque (rectangle, cercle, carré, ...), spécifiée selon les besoins. L'élément rayonnant est séparé d'un plan réflecteur conducteur par une ou plusieurs couches de substrat diélectrique qui peuvent avoir des permittivités (ϵ_r) égales ou différentes.

La forme du patch conducteur influe sur les modes qui sont susceptibles de s'exciter dans l'antenne, et donc sur la nature du rayonnement.

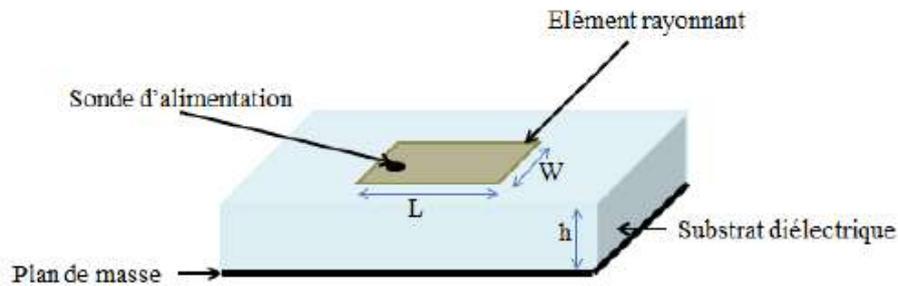


Figure I.3 : Structure de l'antenne imprimée[6]

Les substrats diélectriques ont généralement une faible permittivité ($\epsilon_r \leq 3$) pour faciliter et favoriser le rayonnement, en évitant le confinement des champs dans la cavité comprise entre l'élément imprimé et le plan de masse.

I.4.2 Techniques d'alimentation

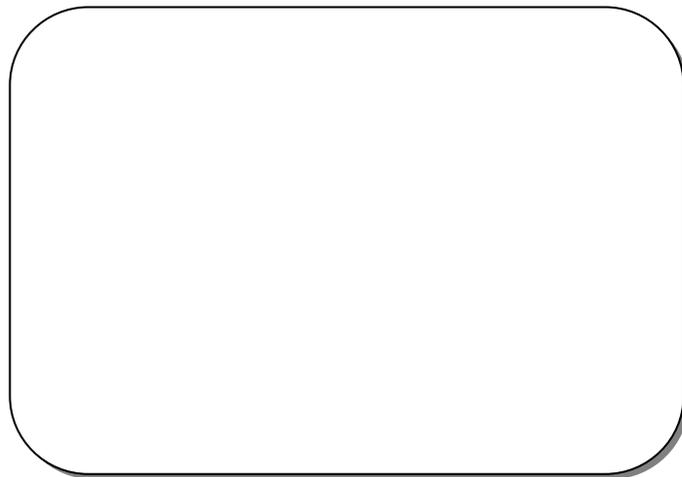
L'alimentation de l'antenne patch est l'une des parties les plus importantes dans le processus de la conception. Elle dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif. Les deux principaux types sont [7]:

- Alimentation par contact :
 - Alimentation par une ligne micro ruban.
 - Alimentation par câble coaxiale.
- Alimentation par proximité :
 - Alimentation par couplage électromagnétique.
 - Alimentation par couplage à ouverture (fente) dans le plan de masse.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, dans un premier temps, les caractéristiques fondamentales des antennes. La définition, les paramètres fondamentaux des antennes ont alors été présentés. Nous avons également, en fin de ce chapitre, la définition ainsi que les techniques d'alimentation les plus utilisées des antennes patches.

Chapitre II Les antennes à résonateurs diélectriques



II.1 Introduction

Dans le domaine des microondes, les résonateurs diélectriques ont pris une place très importante dans différents systèmes, aussi bien passifs, qu'actifs, comme par exemple, les oscillateurs, les dispositifs de filtrage et les antennes [8].

Les antennes à résonateur diélectrique, composé principalement de résonateurs de formes variées, constitue une alternative intéressante aux antennes imprimées qui offrent une bande passante limitée et présentent des pertes dans le domaine des microondes.

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps définir les résonateurs diélectriques. Ensuite, nous présenterons leurs modes de fonctionnement [9] ainsi que les formules de détermination de leurs fréquences de résonance et leurs facteurs de qualité pour les formes cylindrique et rectangulaire.

Enfin, trois types d'antenne à résonateur diélectrique et quelques techniques d'excitation les plus utilisés seront présentées.

II.2 Définition des résonateurs diélectriques

Les résonateurs diélectriques [10-11] sont des pastilles céramiques poly cristallines nues ou métallisées, utilisées dans le domaine des hyperfréquences comme circuits résonants de base dans la réalisation, par exemple, de filtres, des oscillateurs et des antennes.

Un résonateur diélectrique est caractérisé par une permittivité diélectrique élevée, des pertes diélectriques assez faibles ou un facteur de qualité élevé, et une stabilité thermique autour de la fréquence de résonance [12-14].

II.3 Historique

Le terme résonateur diélectrique est apparu en 1939 lorsque Richtmyer a montré que des objets diélectriques non métallisés pouvaient fonctionner en tant qu'éléments résonants aux hyperfréquences. Plus tard, en 1953, Schlike a rapporté l'existence de matériaux de permittivité ϵ_r supérieure à 1000. Au début des années soixante, Okaya et Barash ont décrit la distribution et la propagation des modes d'ondes (TE_{xyz} et TM_{xyz}) dans un corps diélectrique, cette

Chapitre II Les antennes à résonateurs diélectriques

découverte a permis le développement de nouveaux dispositifs à base de matériaux diélectriques [15-17].

Récemment, de grandes avancées ont été faites et le matériel utilisé dans le domaine micro-ondes a subi une miniaturisation poussée. A la place des boîtes métalliques volumineuses qui étaient utilisées comme cavités résonantes et des tubes rectangulaires qui étaient utilisés comme guide d'onde, des résonateurs diélectriques et des guides d'ondes microruban se sont imposés. Les cavités résonantes de la dimension d'une boîte de cigarettes ont été remplacées par des pastilles d'un diamètre de 8 à 10 mm et d'épaisseur de 1,5 à 3 mm.

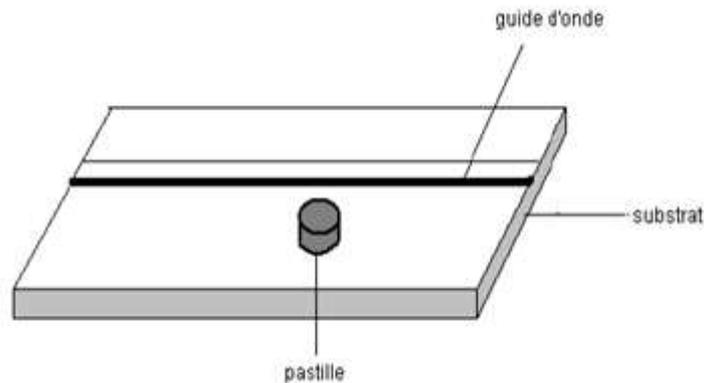


Figure II.1 : Résonateur diélectrique[18]

II.4 Matériaux usuels utilisés comme RD

Les propriétés de quelques matériaux utilisés sont données dans le tableau suivant :

Matériaux	ϵ_r	Qf (GHz)	τ_f (ppm/deg)	Réf.
BaTi ₄ O ₉ (BT-4)	38	8500/4	15	[6-10]
Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀ (BT-9)	40	8700/4	2	[6-10]
ZrTiO ₄	38	4000 /10	10	[11]
Zr _{0,2} Sn _{0,8} TiO ₄	38-40	5300/10	0	[12,13]
Mg _{0,95} Ca _{0,05} TiO ₃	20-23	10000/10	-3,8	[14-17]
TiO ₂	100	10000/4	400	[7]
ZrTiO ₄ (+2%B ₂ O ₃)	40	4428/7	58	[12]

Tableau II-1 : Résonateurs diélectriques classiques: [18]

On remarque que le matériau classique Mg_{1-x}Ca_xTiO₃ présente des propriétés très satisfaisantes aux hyperfréquences, notamment de faibles pertes et un faible coefficient de fréquence en température τ_f pour x compris entre 0,05 et 0,1.

II.5 Les formes des résonateurs diélectriques

Il existe plusieurs formes des résonateurs diélectriques (DR). Les formes cylindriques [19-20] sont les premières à être utilisées car elles étaient déjà utilisées pour les circuits micro-ondes. Une des formes les plus populaires est la forme rectangulaire [21-22]. Elle est d'abord simple à réaliser, elle est facilement modélisée par des formules approximées et elle est résistante à la dégénération de modes. Une autre forme à avoir été utilisé est la forme hémisphérique parce qu'un DR hémisphérique sur un plan de masse pouvait être analysé comme une sphère diélectrique par la théorie des images [23].

La Figure II.2 présente les formes géométriques des résonateurs diélectriques commercialisés.

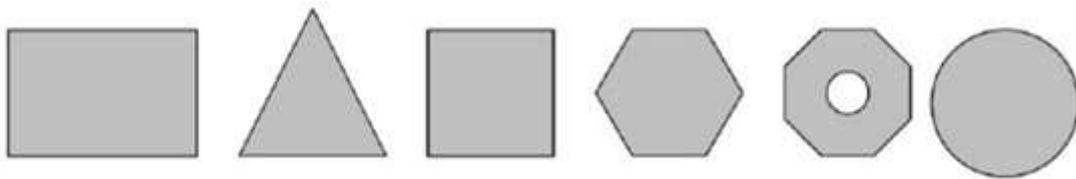


Figure II.2 : Les différentes formes d'un résonateur diélectrique[12]

II.6 Modes de fonctionnement des résonateur diélectriques

La connaissance de la fréquence de résonance naturelle et de la nature des modes résonnants [9] du résonateur diélectrique est nécessaire pour pouvoir l'utiliser pour la conception d'antennes. Il est aussi important d'étudier la variation de la fréquence de résonance en fonction des paramètres géométriques et physiques du résonateur.

II.6.1 Résonateurs diélectriques cylindriques

Le résonateur diélectrique cylindrique est facile à fabriquer et sa symétrie simplifie son étude. Sa fréquence de résonance dépend uniquement des valeurs de son rayon et de sa hauteur, par conséquent le choix de ces deux valeurs ne peut pas être fait d'une manière arbitraire.

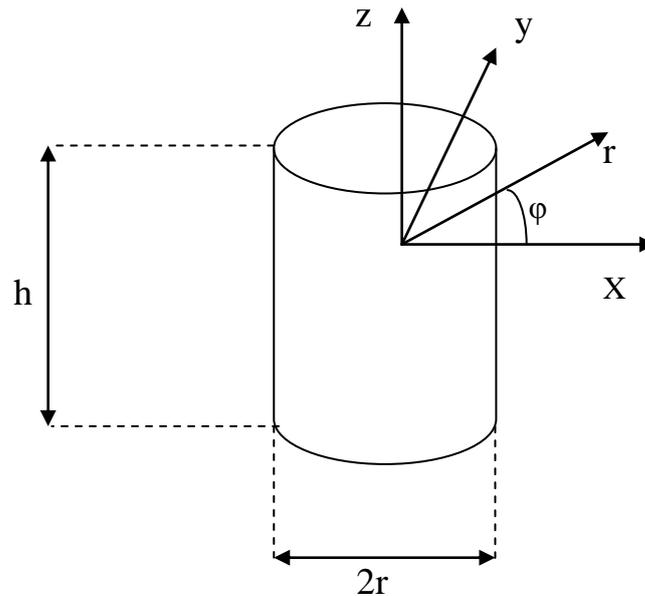


Figure II.3 : Résonateur diélectrique cylindrique

Les modes de résonance du RDC sont les suivants [9]:

- Le mode transverse électrique : mode TE.
- Le mode transverse magnétique : mode TM.
- Le mode hybride : mode HEM.

Pour chaque mode, plusieurs modes individuels sont possibles. Leurs dénominations sont indiquées par trois entiers m , n et p définies comme suit.

- m ($m = 0, 1, 2, \dots$) représente le nombre de variations azimutales du champ (en φ)
- n ($n = 1, 2, 3, \dots$) représente le nombre de variations radiales du champ (en r).
- p ($p = 0, 1, 2, \dots$) représente le nombre de variations longitudinales du champ (en z).

Le nombre de variation longitudinale étant rarement définissable par un entier, un réel δ intervient tel que $0 < \delta < 1$. Le troisième indice sera donc exprimé par le terme $p + \delta$. Les modes sont donc nommés $TE_{mnp+\delta}$, $TM_{mnp+\delta}$ et $HEM_{mnp+\delta}$.

Les modes TE et TM ne présentent pas de dépendance azimutale, le premier indice m est nul. En ce qui concerne les modes transverse électriques $TE_{0np+\delta}$, la composante E_z est nulle. Quant aux modes transverse magnétiques $TM_{0np+\delta}$, la composante H_z est nulle. Pour ce qui est des modes $HEM_{mnp+\delta}$, les six composantes du champ sont non nulles.

Les trois modes fondamentaux sont : $TE_{01\delta}$, $TM_{01\delta}$ et $HEM_{11\delta}$ [9]

II.6.1.1 Le mode TE_{01δ}

Le mode TE_{01δ} présente une distribution de champ électromagnétique semblable à celle d'un dipôle magnétique situé le long de l'axe de rotation du cylindre. Ce mode offre donc, par analogie, un maximum de rayonnement dans le plan équatorial du résonateur cylindrique et un minimum suivant l'axe de rotation de ce dernier.

Il existe des expressions analytiques permettant de déterminer de manière approchée les fréquences de résonance des résonateurs diélectriques cylindrique [10].

Pour un résonateur diélectrique de rayon a et de hauteur h, la fréquence de résonance du mode TE_{01δ} peut être calculée à partir de l'équation II.1 [11-14] :

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{c}{f} \rightarrow k_0 = \frac{2\pi f}{c}$$

$$k_0 a = \frac{2\pi a f}{c} \rightarrow f = \frac{c}{2\pi a} k_0 a$$

$$F_{r_{TE_{01}}} (Ghz) = \frac{30 (k_0 a)}{2\pi a} \tag{II. 1}$$

Avec a en (cm)

$$k_0 a = \frac{2.327}{\sqrt{\epsilon_r + 1}} \left\{ 1 + 0.2123 \left(\frac{a}{h}\right) - 0.00898 \left(\frac{a}{h}\right)^2 \right\} \tag{II. 2}$$

Le facteur de qualité est donné par l'équation suivante :

$$Q = 5.72 * \left(\frac{a}{2h}\right) \left(1 + 18.387 \left(\frac{a}{2h}\right)^{-0.3795} e^{-1.64 \frac{a}{2h}} \right) \tag{II. 3}$$

La Figure II.4 illustre la variation du (k₀a) en fonction du rapport (a/h) pour différentes valeurs de ε_r. On remarque que (k₀a) augmente lorsque le rapport (a/h) augmente.

La Figure II.5 illustre la variation du facteur de qualité Q en fonction du rapport (a/h).

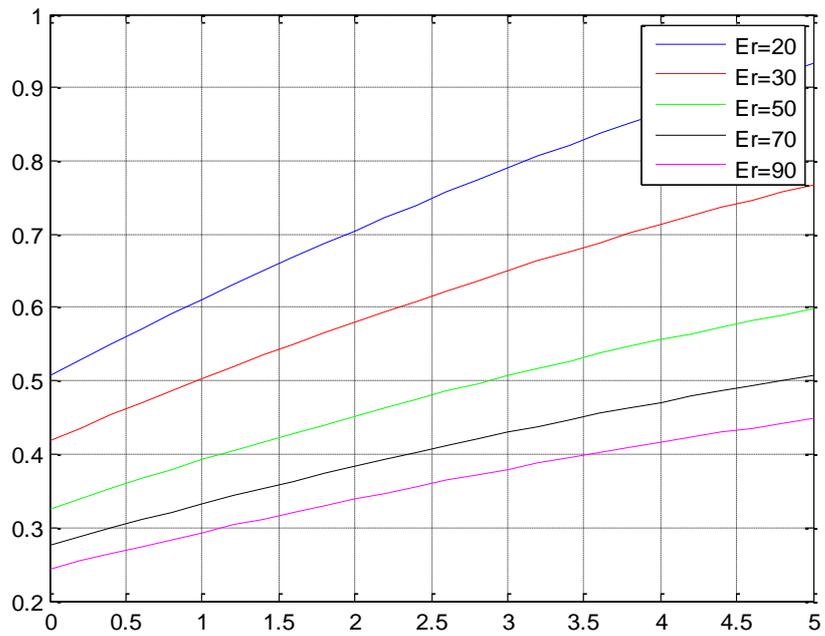


Figure II.4 : Variation de (k_0a) en fonction du rapport $\left(\frac{a}{h}\right)$

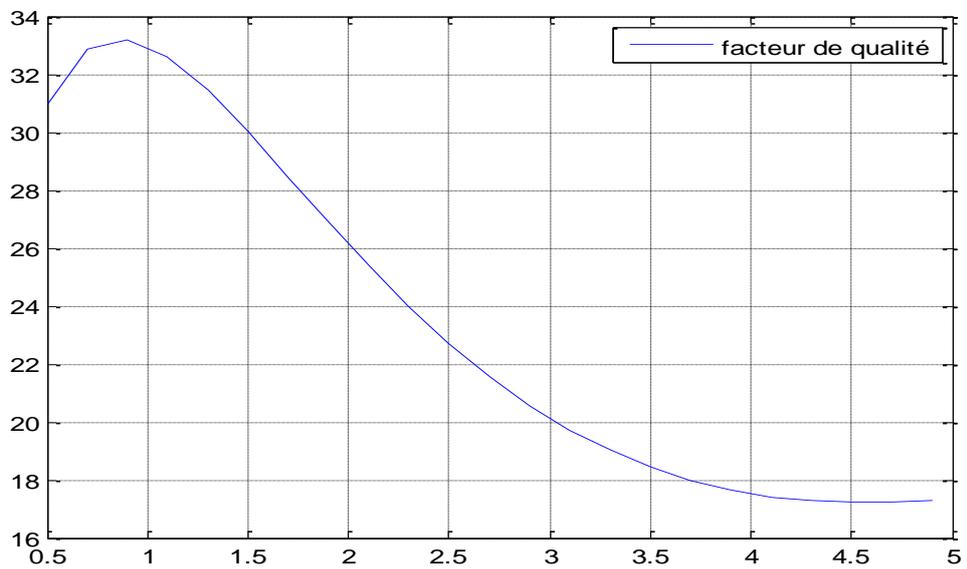


Figure II.5 : Variation du facteur de qualité Q en fonction du rapport $\left(\frac{a}{h}\right)$

II.6.1.2 Le mode $TM_{01\delta}$

Pour ce mode, la fréquence de résonance et le facteur de qualité Q peuvent être calculés par les équations II.5 et II.6.

$$k_0 a = \frac{\sqrt{(3.83)^2 + \left(\frac{\pi a}{2d}\right)^2}}{\sqrt{\epsilon_r + 2}} \tag{II.4}$$

$$F_{r_{TM_{01}}} = \frac{30 (k_0 a)}{2\pi a (cm)} \tag{II.5}$$

$$Q = 10.9 \left(\frac{a}{2h}\right) \left(1 + 217.96 \left(\frac{a}{2h}\right)^{3.476} e^{-3.67 \frac{a}{2h}}\right) \tag{II.6}$$

La Figure II.6 illustre la variation de $(k_0 a)$ en fonction du rapport $\left(\frac{a}{h}\right)$ pour différentes valeurs de permittivité ϵ_r . En faisant varier la permittivité de 20 à 90, on constate que $(k_0 a)$ augmente lorsque le rapport a/h augmente.

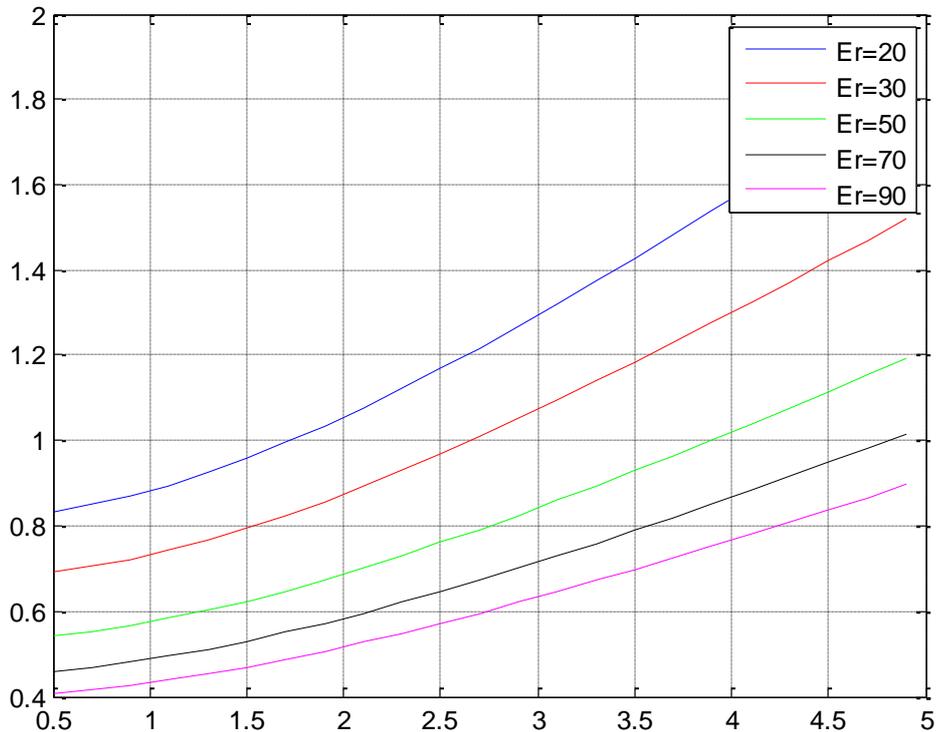


Figure II.6 : Variation de $(k_0 a)$ en fonction du rapport $\left(\frac{a}{h}\right)$

La Figure II.7 illustre la variation du facteur de qualité en fonction du rapport $\left(\frac{a}{h}\right)$.

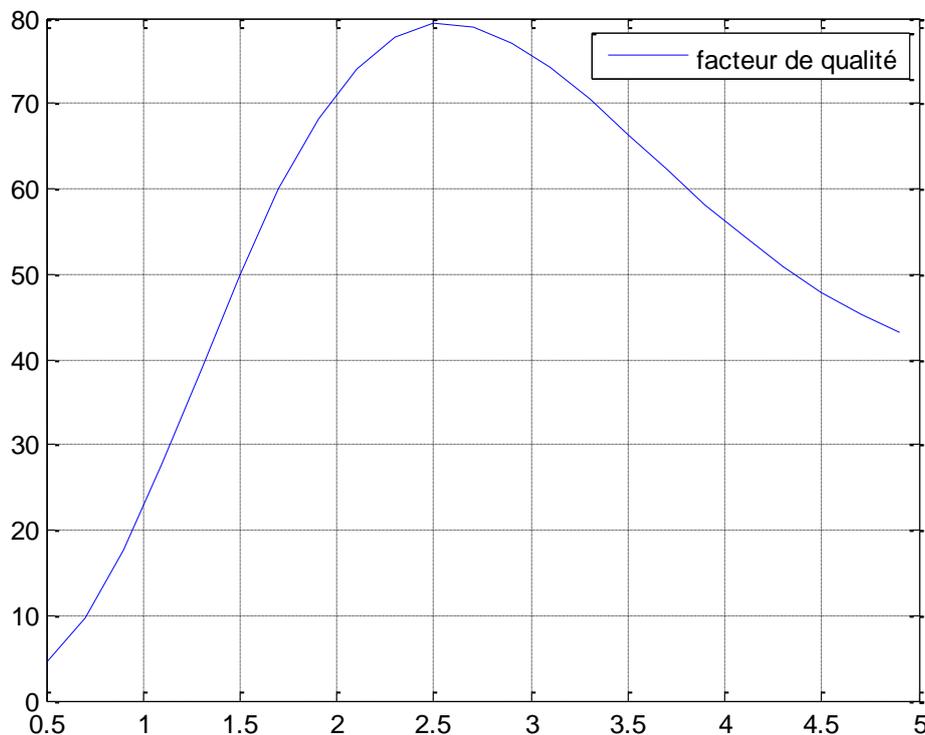


Figure II.7 : Variation du facteur de qualité en fonction du rapport $\left(\frac{a}{h}\right)$

II.6.1.3 Le mode $HEM_{11\delta}$

Le mode $HEM_{11\delta}$ au même rayonnement qu'un dipôle magnétique situé perpendiculairement à l'axe de rotation du RD. Ce mode a donc l'avantage d'avoir un maximum de rayonnement dans la direction de l'axe de rotation du RD et un minimum dans le plan perpendiculaire. La fréquence de résonance et le facteur de qualité de rayonnement du mode $HEM_{11\delta}$ peuvent être déterminés pas les équations II.8 et II.9 suivantes :

$$k_0 a = \frac{6.324}{\sqrt{\epsilon_r + 2}} \left\{ 0.27 + 0.36 \left(\frac{a}{2h}\right) + 0.02 \left(\frac{a}{2h}\right)^2 \right\} \quad (II.7)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{c}{f} \rightarrow k_0 = \frac{2\pi f}{c}$$

$$k_0 a = \frac{2\pi a f}{c} \rightarrow f = \frac{c}{2\pi a} k_0 a$$

$$F_{r_{TM_{110}}} = \frac{30 (k_0 a)}{2\pi a (cm)} \tag{II.8}$$

$$Q = \left(\frac{a}{2h}\right) \epsilon_r^{1.2} \left(0.01893 + 2.925 e^{-2.08\left(\frac{a}{2h}\right)\left(1-0.08\left(\frac{a}{h}\right)\right)}\right) \tag{II.9}$$

La Figure II.8 illustre la variation du $(k_0 a)$ en fonction du rapport a/h , on constate que $(k_0 a)$ augmente lorsque le rapport $\left(\frac{a}{h}\right)$ augmente.

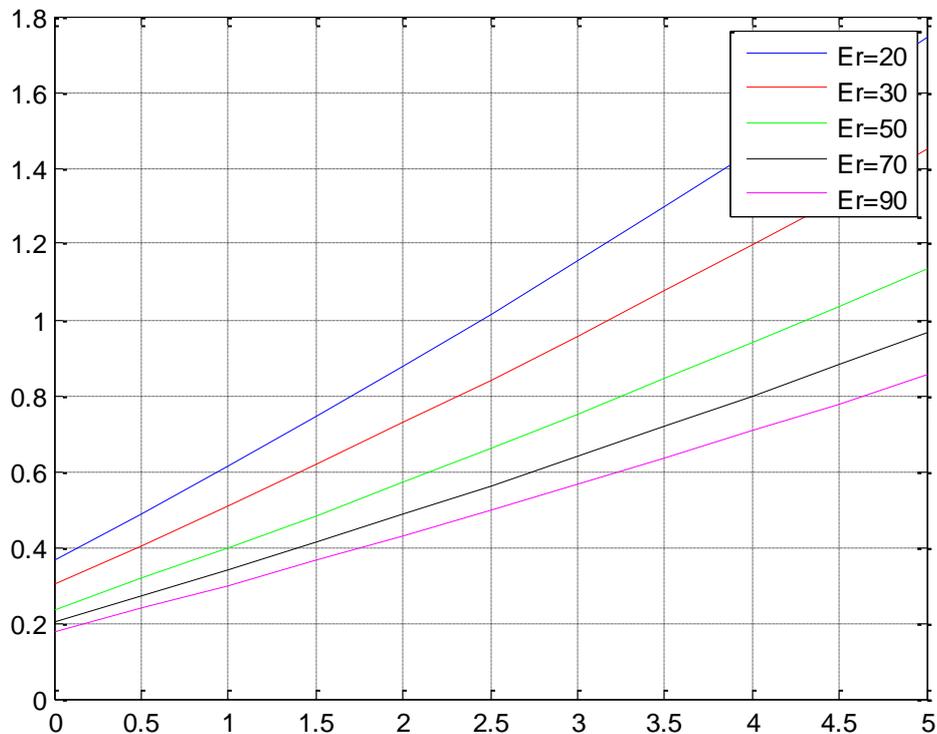


Figure II.8 : Variation de $(k_0 a)$ et du facteur de qualité en fonction du rapport $\left(\frac{a}{h}\right)$

La Figure II.9 montre la variation du facteur de qualité Q en fonction du rapport $\left(\frac{a}{h}\right)$.

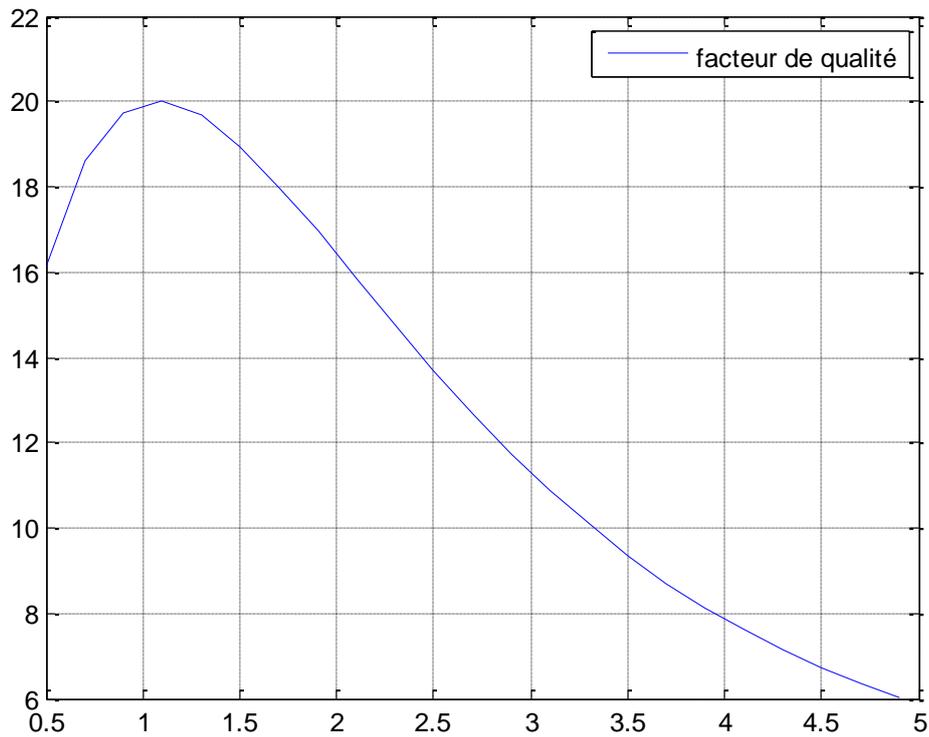


Figure II.9 : Variation de $(k_0 a)$ et du facteur de qualité en fonction du rapport $\left(\frac{a}{h}\right)$

Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs du facteur de qualité pour les trois premiers modes pour différentes valeurs de permittivité.

	TE _{01δ}		TM _{01δ}		HEM _{01δ}	
	Eps = 10	Eps = 30	Eps = 10	Eps = 30	Eps = 10	Eps = 30
(a/h)=0.5mm	30.9603	30.9603	4.6320	4.6320	4.6320	26.2996
(a/h) = 2.5 mm	22.7002	22.7002	79.3296	79.3296	79.3296	22.2624
(a/h) = 5 mm	17.3777	17.3777	42.1698	42.1698	42.1698	9.5631

Tableau II-2 : Facteur de qualité

II.6.1.4 Effet de la permittivité sur la fréquence de résonance

La Figure II.10 montre l'effet de la variation de la permittivité du résonateur diélectrique sur la fréquence de résonance. On remarque que lorsqu'on augmente la permittivité la fréquence de résonance diminue.

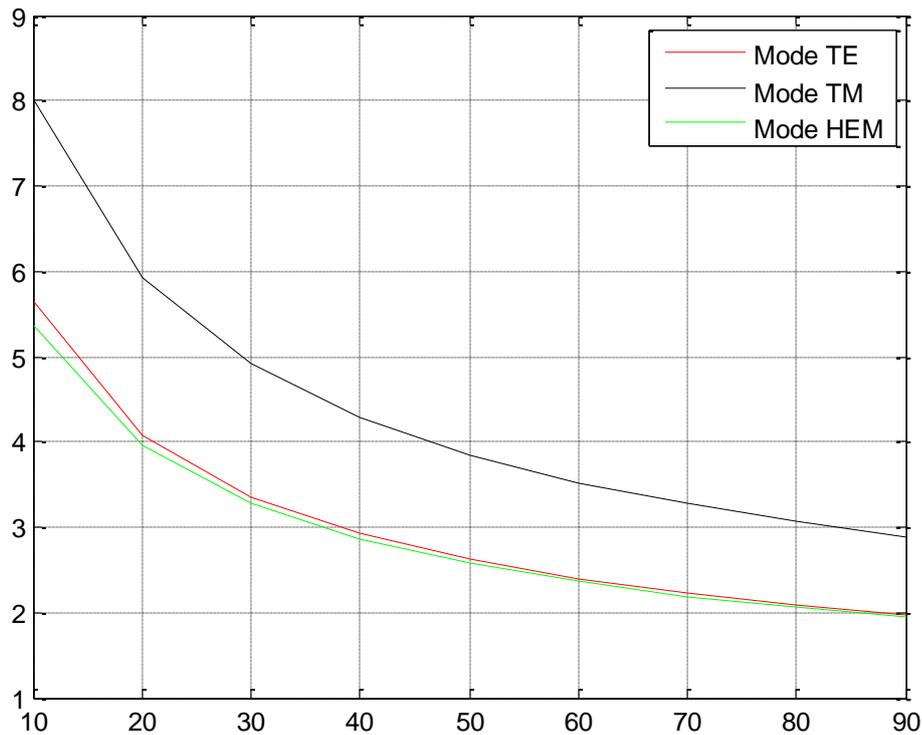


Figure II.10 : Influence de permittivité de résonateur sur la fréquence de résonance

II.6.2 Résonateurs diélectriques rectangulaires

Parce qu'ils n'ont pas de symétrie de révolution, l'analyse des résonateurs diélectriques rectangulaires est complexe, et des solutions analytiques pour calculer la fréquence de résonance n'existent pas mais uniquement des solutions approchées obtenues par l'application des méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis (Finite Element Method (FEM)), la méthode des différences finies dans le domaine temporel (Finite-Difference Time-Domain(FDTD)) et la méthode des moments (Method of Moments (MoM)).

Toutefois, par rapport aux autres formes, la forme rectangulaire offre deux rapports (hauteur/longueur et largeur/longueur) pour déterminer une fréquence de résonance correspondante à une valeur de permittivité diélectrique donnée. En plus, il est plus facile de contrôler la bande passante de l'antenne puisqu'elle dépend de ces rapports.

Deux types de modes existent pour un résonateur rectangulaire isolé: transverse électrique TE_{mnp} et transverse magnétique TM_{mnp} , où les indices m , n et p dénotent les variations du champ dans les directions x , y et z , respectivement.

- De type TE et rayonnent comme des dipôles magnétiques orientés respectivement suivant x , z et y .
- Le facteur de qualité de rayonnement Q augmente avec la permittivité.

$$Q_{rad} \propto \epsilon_r^{3/2} \tag{II.10}$$

- La bande passante étant inversement proportionnelle à facteur de qualité (Q).

$$BP = \frac{1}{\mu Q} ; \text{ lorsque le produit } \mu Q \gg 1$$

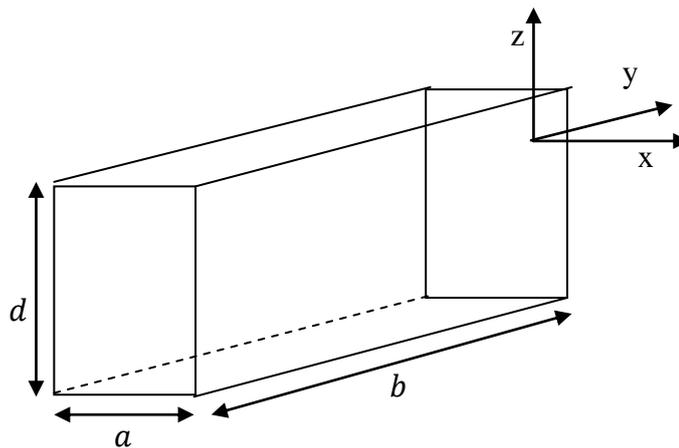


Figure II.11 : Résonateur diélectrique rectangulaire

La fréquence de résonance [11-21] :

$$f_r = \frac{c}{2\pi \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \quad (II.10)$$

$$f_r = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (II.11)$$

Avec:

f_r : La fréquence de résonance,

a : La largeur du résonateur,

b : La longueur du résonateur,

d : La hauteur du résonateur.

avec p entier supérieur ou égal à 1 et pour les modes TE_{mnp} : $m+n \neq 0$ et $p \neq 0$; pour les modes TM_{mnp} : $m.n \neq 0$ et $p \geq 0$.

La fréquence fondamentale du résonateur est obtenue en donnant aux indices m,n,p les valeurs les plus faibles, soit pour un mode TE (0,1,0) si $a > b$ ou (0,1,1) si $a < b$, et pour un mode TM (1,1,0). Selon les dimensions du guide, la fréquence fondamentale est donc celle de l'un des modes TE_{101} , TE_{011} ou TM_{110} . Les lignes de champs des modes correspondants sont représentées sur la figure ci-dessous :

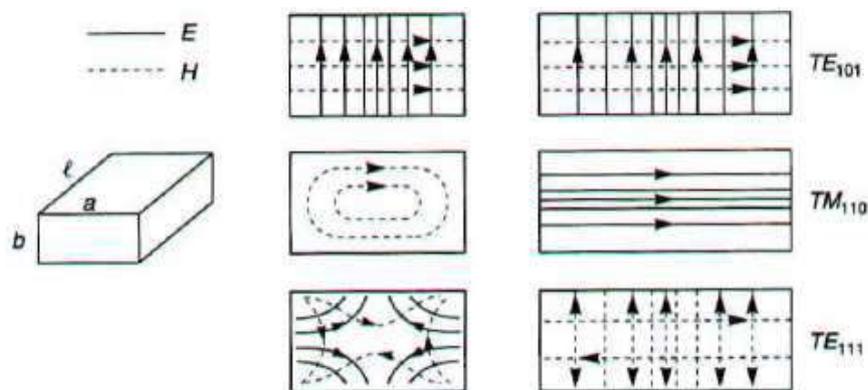


Figure II.12 : Lignes de champs de différents modes [18]

II.7 Avantages des résonateurs diélectriques

Les résonateurs remplacent les cavités métalliques. Comme elles, ils présentent les propriétés et les avantages suivants : [14]

- Des modes de résonance dont les fréquences sont déterminées par les dimensions.
- Des facteurs de qualité Q élevés.
- Faible encombrement : la dimension d'un résonateur diélectrique est de l'ordre de $1/\sqrt{\epsilon_r}$
- Grande stabilité en changement de température.
- Simplicité de mise en œuvre.

II.8 Antennes à résonateurs diélectriques

En 1983, Long était le premier qui a démontré qu'un résonateur diélectrique (RD) à faible permittivité ($8 < \epsilon_r < 20$), placé dans un environnement ouvert, présente un faible facteur Q dans le cas où il est excité par ses modes inférieurs. Cette découverte a ouvert la perspective d'un nouveau type d'antennes, les antennes à résonateurs diélectriques, dont l'élément rayonnant est constitué d'un RD. Depuis cette date, plusieurs réalisations ont été proposées. Différentes formes de résonateur telles que le cylindre, la sphère, le rectangle, l'anneau cylindrique ou encore le triangle ont été explorées [12].

En application antenne, Les géométries des résonateurs diélectriques les plus utilisées, sont : l'hémisphère (Antenne à Résonateur Diélectrique Hémisphérique (ARDH)), le parallélépipède (Antenne à Résonateur Diélectrique Rectangulaire (ARDR)) et le cylindre (Antenne Résonateur Diélectrique Cylindrique (ARDC)).

Le choix de la forme, des dimensions et de la permittivité du résonateur diélectrique permet d'obtenir un diagramme de rayonnement désiré.

II.8.1 Antenne à résonateur diélectrique rectangulaire

La structure de l'antenne à résonateur diélectrique rectangulaire est illustrée sur la Figure II.13. Elle est constituée d'un résonateur diélectrique rectangulaire de longueur a , de largeur b et de hauteur d déposé sur un plan de masse. L'ensemble est placé sur le substrat.

Le mode TE₁₁₁ de l'antenne à résonateur diélectrique rectangulaire est particulièrement intéressant pour les applications antennaires, car c'est le mode d'ordre inférieur et présente le plus faible coefficient de qualité. Le rayonnement de l'ARDR, fonctionnant sur le mode TE₁₁₁, est assimilable à celui d'un dipôle magnétique.

L'antenne à résonateur diélectrique rectangulaire offre une meilleure flexibilité dans l'optimisation de la bande de fréquence souhaitée [13].

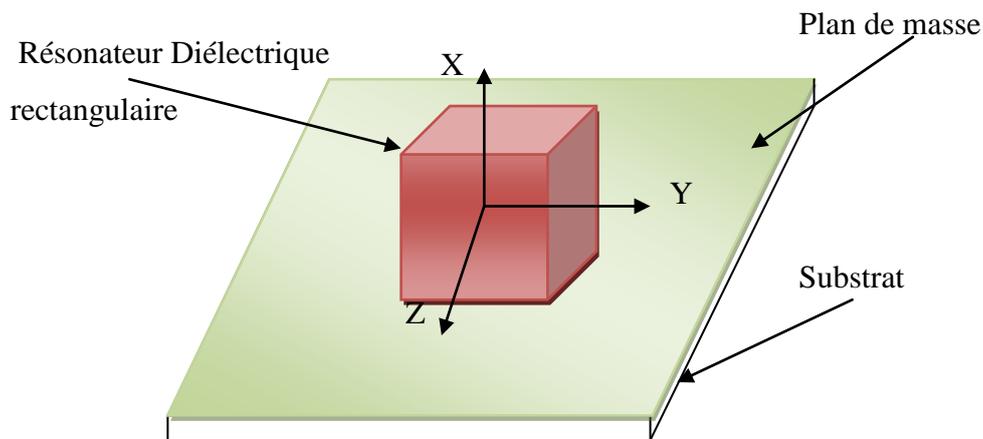


Figure II.13 : Antenne à résonateur diélectrique rectangulaire

II.8.2 Antenne à résonateur diélectriques cylindrique

L'antenne à résonateur diélectrique cylindrique est la plus utilisée. Sa structure de base est illustrée sur la Figure II.14. Elle est constituée d'un résonateur diélectrique cylindrique de rayon a , de hauteur h et de permittivité ϵ_r déposé sur un plan de masse. L'ensemble est placé sur le substrat.

C'est le rapport (a/h) qui détermine la fréquence de résonance et le facteur Q pour une constante diélectrique donnée.

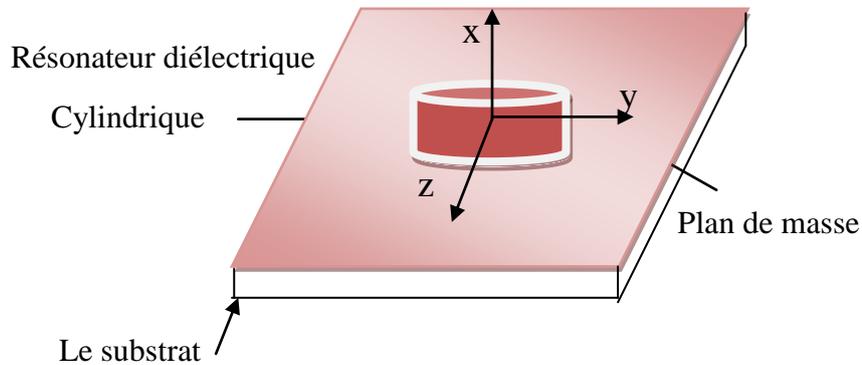


Figure II.14 : Antenne à résonateur diélectrique cylindrique

II.8.3 Antenne à résonateur diélectriques demi-sphérique

La figure II.15 illustre la structure de base d'une antenne à résonateur diélectrique de forme sphérique. Elle est constituée d'un résonateur de forme sphérique de rayon a et de permittivité ϵ_r , déposé sur un plan de masse. L'ensemble est placé sur le substrat.

Le résonateur demi-sphérique supporte deux modes d'excitation ; transverse électrique TE_{mnp} et transverse magnétique TM_{mnp} , où les indices m , n et p indiquent les variations du champ dans les différentes directions. Les deux modes intéressants pour une antenne RD de forme sphérique sont les modes fondamentaux : TE_{111} qui a un diagramme de rayonnement similaire à celui d'un dipôle magnétique horizontal et TM_{101} qui rayonne comme un monopôle électrique [24-27].

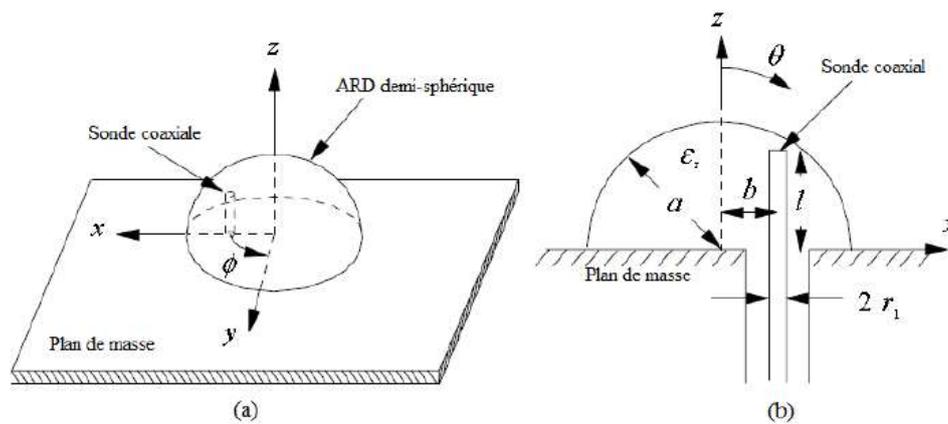


Figure II.15 : Antenne à résonateur diélectrique demi-sphérique [18]

II.9 Les techniques d'alimentation des antennes à résonateur diélectrique

Il existe plusieurs techniques d'alimentations pour exciter les antennes à résonateur diélectrique [28-32]. La connaissance de la distribution des champs des différents modes permet de déterminer le type d'alimentation adéquat pour les exciter.

La technique d'alimentation utilisée peut avoir un impact important sur la fréquence de travail et la qualité de rayonnement.

II.9.1 Alimentation par une ligne microruban

Cette technique est sans doute l'une des moins coûteuses et des plus faciles à réaliser. L'excitation peut se faire de trois façons différentes : couplage par proximité et couplage par ouverture.

➤ Couplage par proximité

Dans ce cas la ligne microruban est placée au voisinage du résonateur diélectrique et l'excite par couplage. L'inconvénient de cette technique est le rayonnement de la ligne qui ne présente pas la même pureté de polarisation que celui de l'antenne et le perturbe.

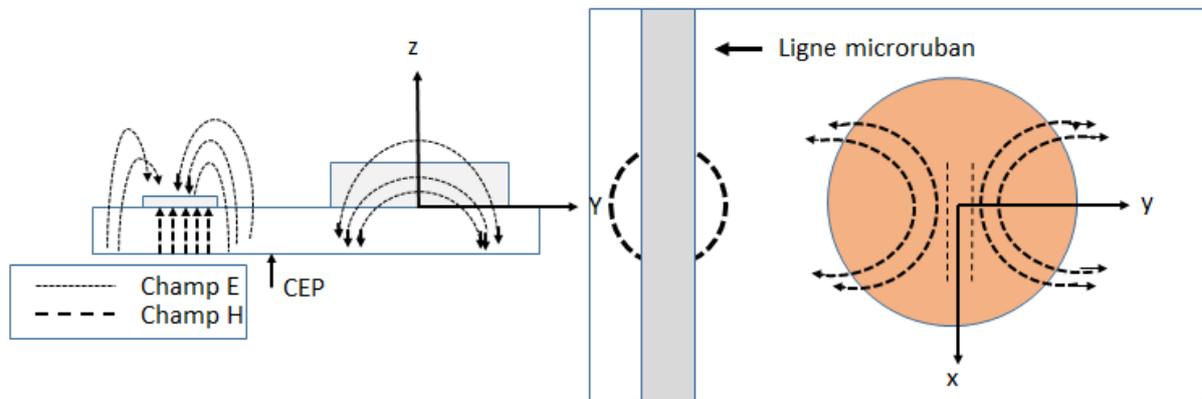


Figure II.16 : Excitation de l'antenne par une ligne microruban[14]

➤ Couplage par une ouverture

Dans ce type d'alimentation, le résonateur diélectrique et la ligne de microruban sont séparés par le plan de masse et le substrat, comme les montrent la figure II.17. Le plan de masse placé au dessus de la ligne d'alimentation minimise le rayonnement parasite de la ligne.

Le couplage entre le résonateur et la ligne microruban est assuré par une fente dans le plan de masse. La quantité de couplage dépend de la forme, la taille et l'emplacement de l'ouverture.

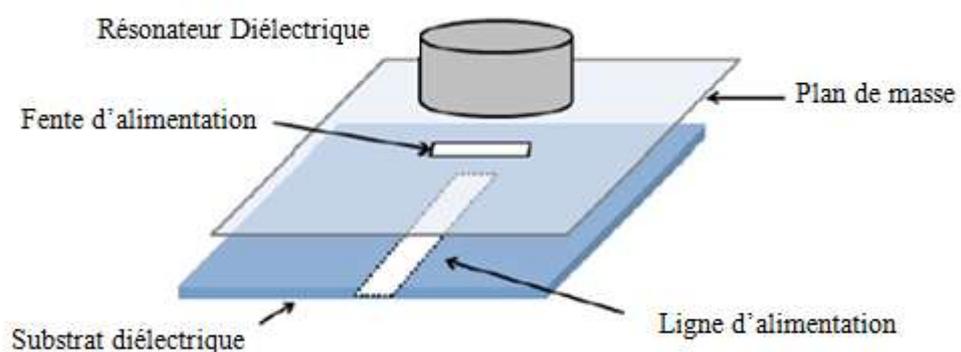


Figure II.17 : Alimentation avec fente de couplage[14]

La ligne microstrip peut être utilisée pour exciter le mode TE_{111} d'une antenne RD de forme rectangulaire et le mode HEM_{118} pour une forme cylindrique.

II.9.2 Alimentation par un câble coaxial

Cette technique est aussi très utilisée pour l'alimentation de ce type d'antennes. Pour être connecté à l'élément rayonnant c'est-à-dire au résonateur, l'âme centrale du câble coaxial traverse le plan de masse et le substrat pour pénétrer, soit à l'intérieur du RD, soit d'une manière adjacente à ce RD. Le conducteur extérieur est connecté au plan de masse. La position de la sonde détermine le mode excité.

L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être placée à n'importe quel endroit désiré de l'élément rayonnant afin d'assurer l'adaptation d'impédance. Cependant elle fournit une bande passante étroite et pose des problèmes technologiques au niveau du perçage du substrat et du RD.

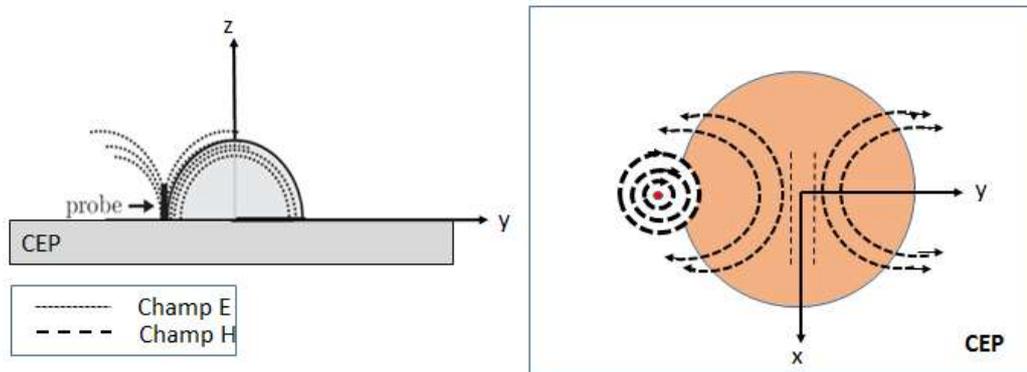


Figure II.18 : Résonateur diélectrique excité par une sonde coaxiale [14]

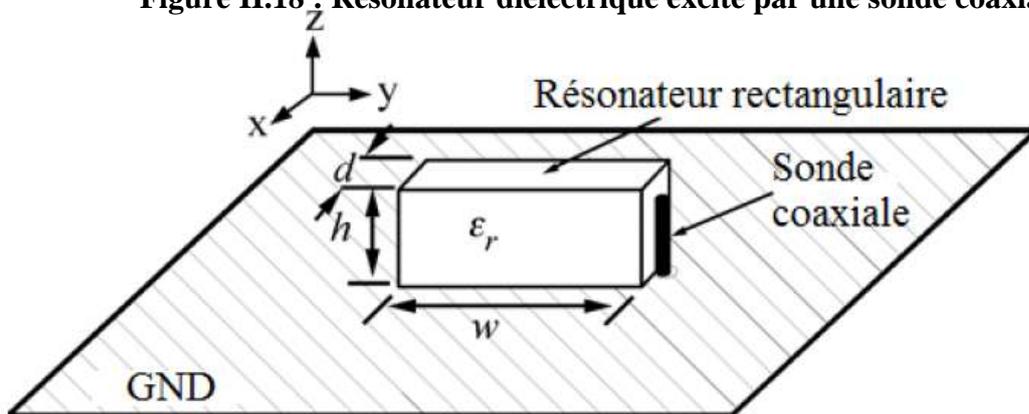


Figure II.19 : Résonateur diélectrique excité par une sonde coaxiale [11]

II.10 Les avantages des antennes à résonateurs diélectriques (ARD)

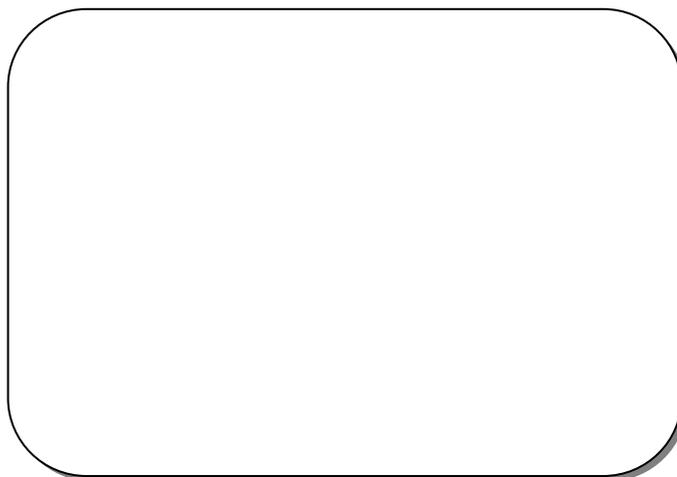
Le résonateur diélectrique en tant qu'élément rayonnant possède des avantages importants, parmi lesquelles on peut citer:

- Une large bande passante naturelle.
- Un faible encombrement : la dimension d'une antenne diélectrique est de l'ordre de $\lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$. Par conséquent, en choisissant une permittivité élevée, on peut réduire de manière significative la taille de l'antenne.
- L'absence de toute métallisation conduit à une plus grande efficacité de rayonnement et un rendement élevé de l'antenne car il n'y a alors plus de pertes par conduction.
- Coût et poids faibles.
- Variété des formes possibles.
- Possibilité de les alimenter avec les méthodes classiques, ce qui les rend compatibles avec les technologies existantes.
- De plus, sa large gamme de permittivité (de 10 à 100) permet de contrôler facilement la taille et la bande passante de l'antenne.
- Une susceptibilité aux tolérances de fabrication inférieures à celles des antennes micro rubans propre aux ondes millimétriques.
- Plusieurs modes de résonances peuvent être excités, ce qui donne des diagrammes de rayonnement différents.
- Variété de diagrammes de rayonnement : Selon les modes excités, différents diagrammes de rayonnement sont obtenus.

II.11 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude théorique des antennes à résonateurs diélectriques. Les modes de fonctionnement, les formules de détermination des fréquences de résonance ainsi que le facteur de qualité pour les résonateurs de formes cylindrique et rectangulaire ont été présentés.

Chapitre III Étude et conception des antennes à résonateurs diélectriques



III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons principalement à l'étude et à la conception par simulation des antennes à résonateurs diélectriques. Nous commencerons par présenter une antenne à résonateurs diélectriques rectangulaire. Cette antenne est conçue et optimisée afin de fonctionner à la fréquence 5.88 GHz. Nous présenterons par la suite une antenne à résonateur diélectrique cylindrique et en fin une antenne à résonateur diélectrique conique.

Pour les trois antennes étudiées, une étude paramétrique a été effectuée pour déterminer l'importance et l'effet de chaque paramètre sur les caractéristiques essentielles de l'antenne et par la suite d'obtenir les meilleures performances de l'antenne

Toutes les antennes étudiées dans ce mémoire ont été analysées et conçues à l'aide du logiciel CST Microwave Studio.

III.2 Etude et conception d'une antenne à résonateur diélectrique rectangulaire

La première antenne étudiée est une antenne à résonateur diélectrique rectangulaire. La géométrie et les dimensions de cette antenne sont illustrées par la figure III.1 et III.2.

Dans les paragraphes qui suivent, on va présenter et commenter les résultats des simulations effectuées avec l'antenne étudiée.

L'objectif de ces simulations est de déterminer les paramètres de l'antenne qui influencent le plus ses performances.

L'antenne à résonateur diélectrique rectangulaire est constituée d'un résonateur diélectrique rectangulaire de permittivité relative $\epsilon_{DRA} = 20$, de longueur $La = 12 \text{ mm}$, de largeur $Wa = 8 \text{ mm}$ et de hauteur $h1 = 5.5 \text{ mm}$ déposé sur un plan de masse en cuivre d'épaisseur 0.02 mm. L'ensemble est placé sur un substrat d'épaisseur 0.5 mm, de largeur 12 mm, de longueur 24 mm et de permittivité relative $\epsilon_r = 3.38$.

L'excitation de cette antenne est réalisée à l'aide d'une ligne microruban conçue avec du cuivre, de longueur $L_f = 36 \text{ mm}$ et de largeur $W_f = 1.2 \text{ mm}$, imprimée de l'autre côté du plan de masse et d'une fente dans ce dernier.

Cette excitation par couplage électromagnétique excite le mode $HEM_{11\delta}$ du résonateur diélectrique.

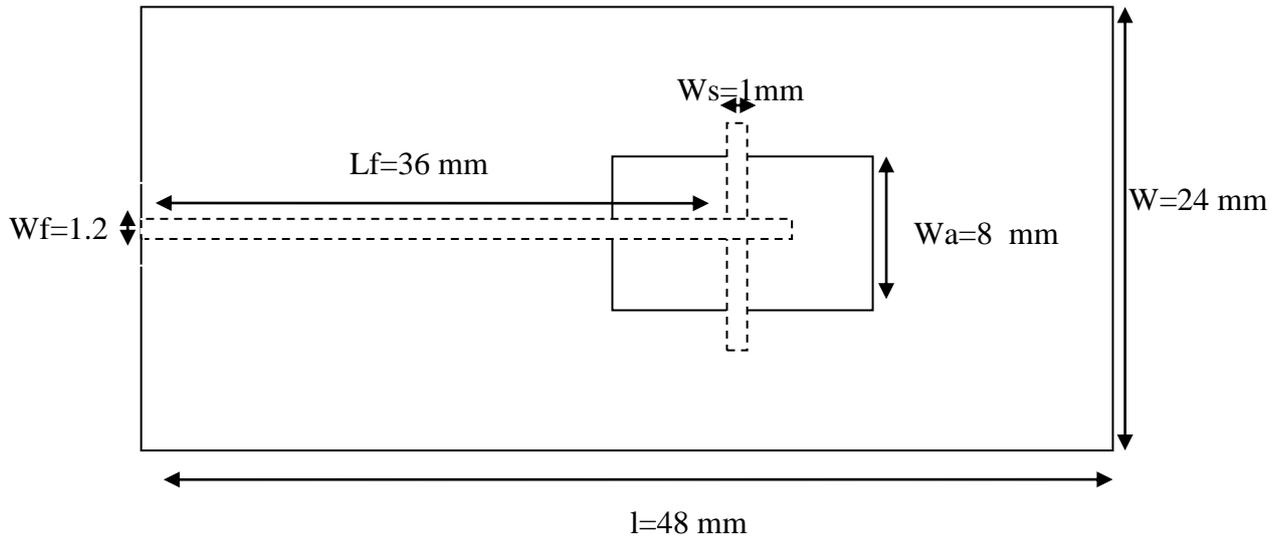


Figure III.1 : Structure de l'antenne à résonateur diélectrique rectangulaire en 2D

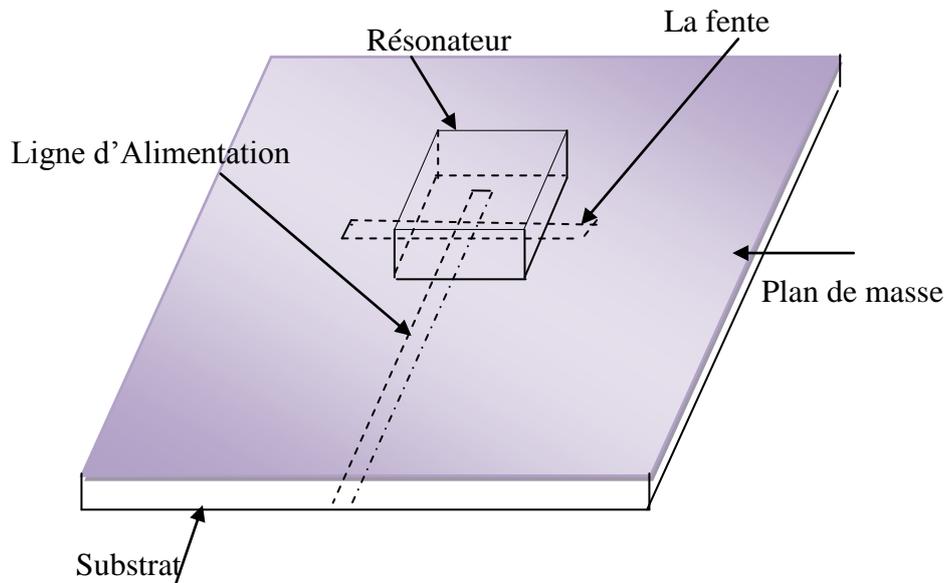


Figure III.2 : Structure de l'antenne à résonateur diélectrique rectangulaire en 3D

Chapitre III Étude et conception des antennes à résonateur diélectrique

Pour adapter la structure, l'extension du stub ouvert placé à l'extrémité de la ligne est égale à 3 mm.

La fente de dimensions $W_S = 1 \text{ mm}$ de largeur et $L_S = 10 \text{ mm}$ de longueur, assure le maximum de couplage d'énergie électromagnétique entre le résonateur diélectrique et la ligne d'alimentation.

Les caractéristiques de la sonde coaxiale sont : Une âme centrale de rayon $r_i = 0.5 \text{ mm}$ et une gaine extérieure de rayon $r_o = 2.5 \text{ mm}$.

Les valeurs optimisées des paramètres de cette antenne sont résumées dans le tableau suivant :

Le substrat	$h=0.5$, $l=48 \text{ mm}$, $w=24 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 3.38$
Le plan de masse	$l=48 \text{ mm}$, $w=24 \text{ mm}$
Le résonateur diélectrique	$h_1=5.5 \text{ mm}$, $W_a= 8 \text{ mm}$, $L_a= 12 \text{ mm}$, $\epsilon_r=20$.
La fente	$W_s=1 \text{ mm}$, $L_s= 10 \text{ mm}$
La ligne d'alimentation	$w_f = 1.2 \text{ mm}$, $e=3\text{mm}$, $l_f=36 \text{ mm}$

Tableau III-1 : Valeurs optimisées des paramètres de l'antenne

Au départ, nous avons utilisé une alimentation de type port discret pour exciter l'antenne. La figure III.3 montre l'antenne excitée par un port discret. La représentation du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence avec ce type d'alimentation est donnée par la figure III.4. La bande passante à -10 dB est égale à 236 MHz et la fréquence de résonance est de 5.887GHz.

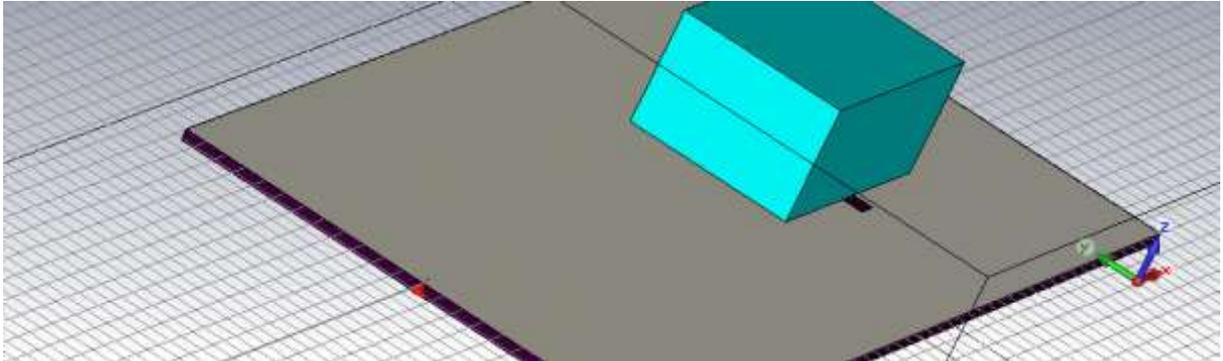


Figure III.3 : Antenne à RD rectangulaire alimentée par port discret

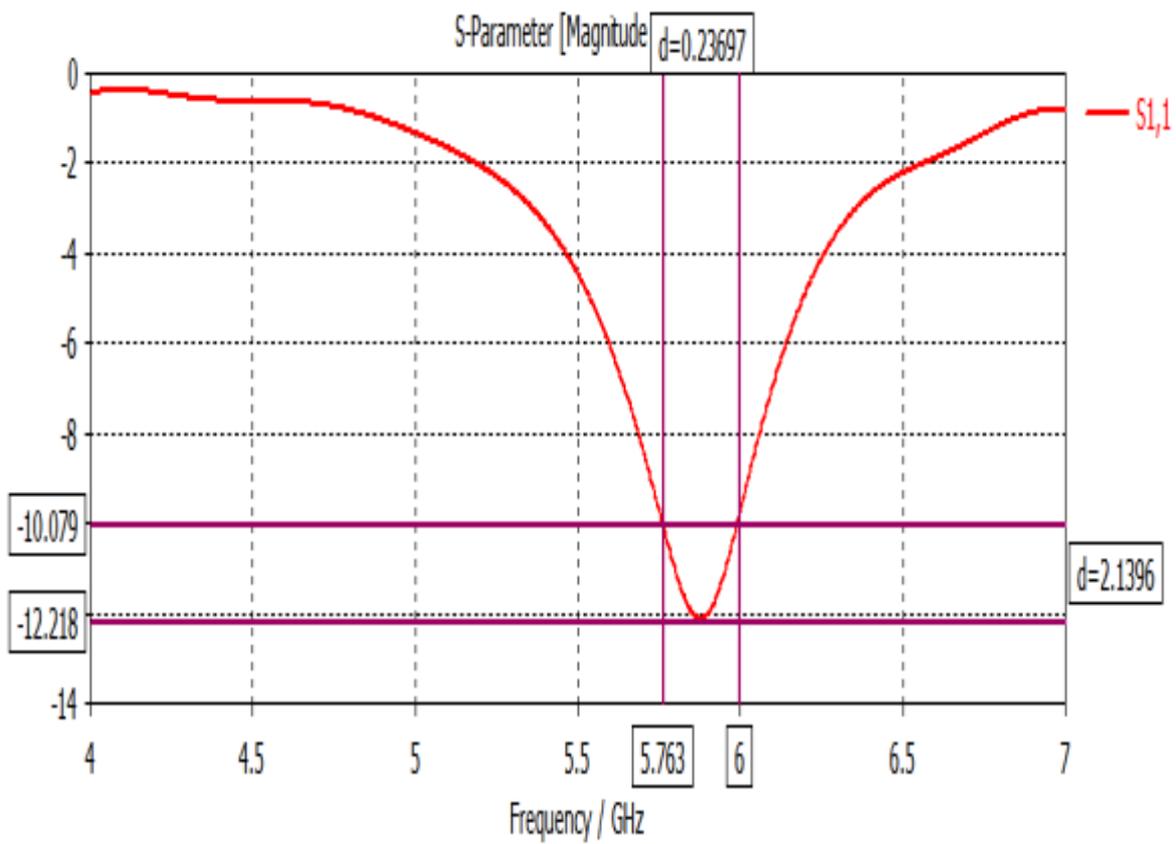


Figure III.4 : Coefficient de réflexion (S₁₁), alimentation par port discret

Pour améliorer l'adaptation, nous avons changé le type d'alimentation et nous avons excité l'antenne par sonde coaxiale, comme le montre la figure III.5. Le résultat présenté sur la figure III.6. Nous remarquons une amélioration du coefficient de réflexion. La bande passante à -10 dB est égale à 239 GHz .

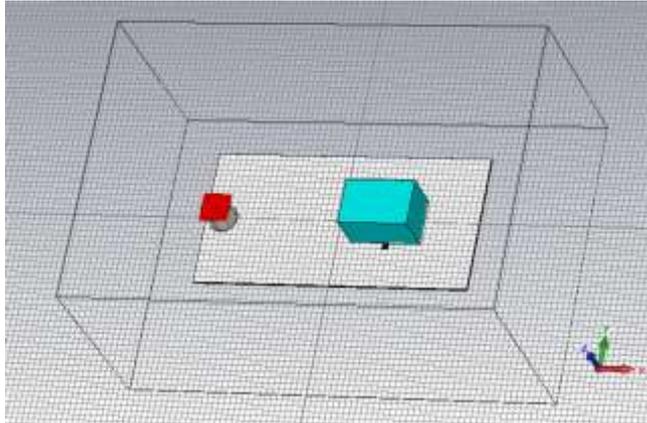


Figure III.5 : Antenne à RD rectangulaire alimentée par sonde coaxiale

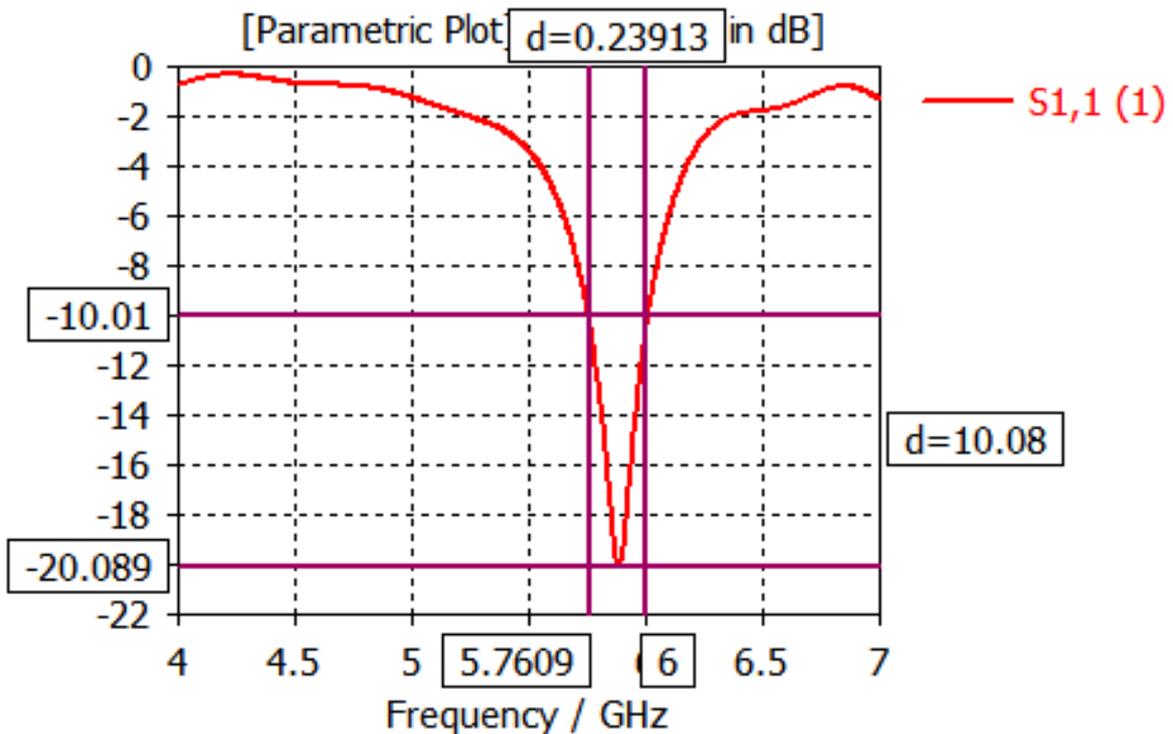


Figure III.6 : Coefficient de réflexion (S11), alimentation par sonde coaxiale

La représentation du diagramme de rayonnement, en 2D et en 3D, est donnée sur la figure III.7.

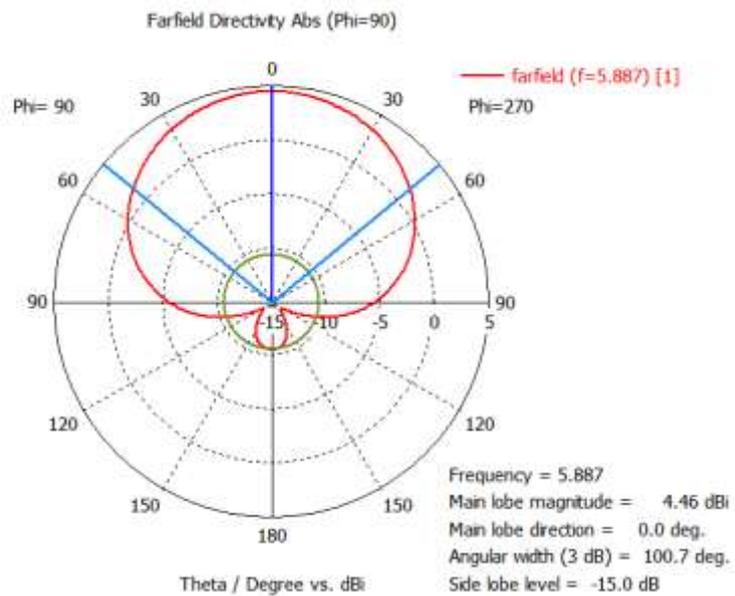
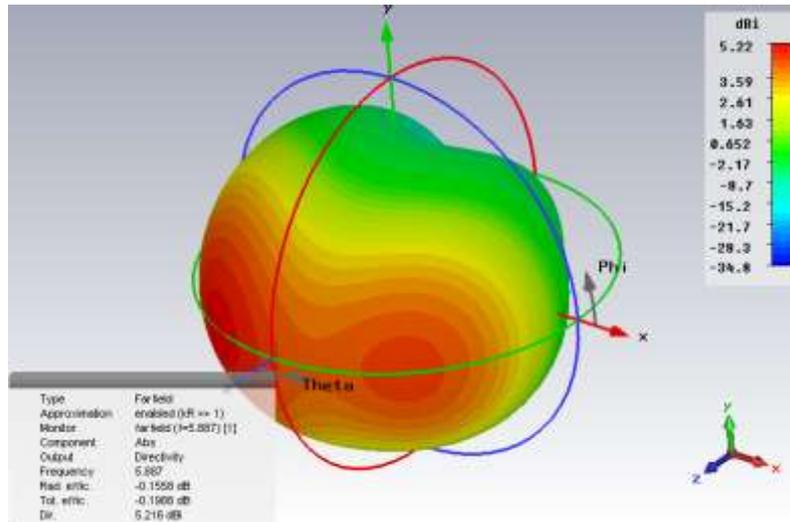


Figure III.7 : Diagrammes de rayonnement simulé en 3D pour $f = 5.887$ Hz

Pour voir l'influence de chaque paramètre sur les performances de l'antenne telle que l'adaptation et la fréquence de résonance, une étude paramétrique a été effectuée pour avoir les meilleures performances de l'antenne.

On va étudier tout d'abord l'effet des caractéristiques du résonateur (longueur, rayon, hauteur), puis, l'influence des dimensions de la fente (longueur (l_s), largeur (w_s)).

III.2.1 Effet de la longueur du résonateur

Pour voir l'impact des dimensions du résonateur sur les caractéristiques de l'antenne, nous avons varié la longueur du résonateur. La figure III.8 montre le coefficient de réflexion pour une longueur de 12 mm, 14 mm et 16 mm.

Le changement de la longueur du résonateur a fait décaler la fréquence de résonance de 5.878 GHz ($l_a=12$ mm) à 5.32 GHz pour ($l_a = 16$ mm). On remarque aussi que l'adaptation de l'antenne est affectée par cette variation.

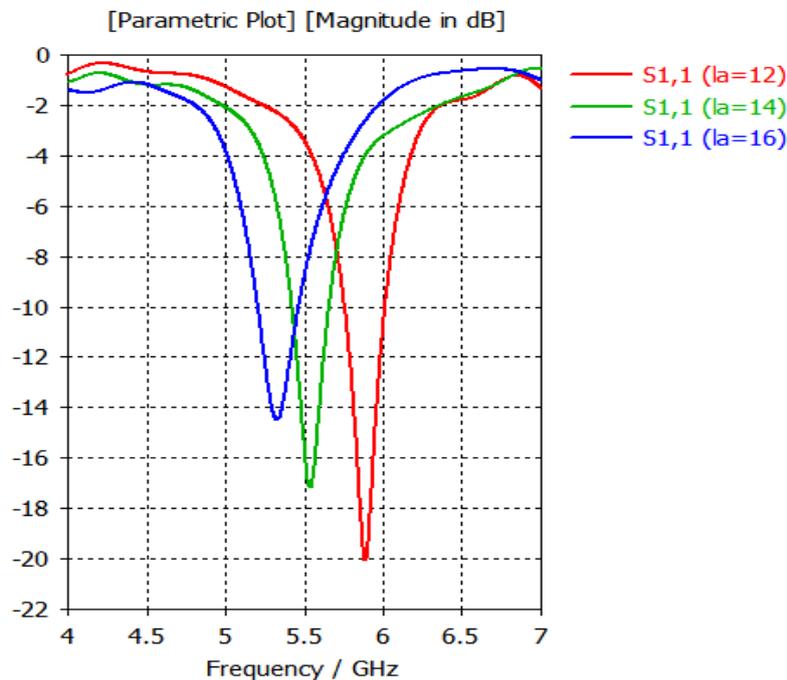


Figure III.8 : Coefficient de réflexion (S11), pour différentes valeurs de la longueur du résonateur

III.2.2 Effet de la largeur du résonateur W_a

La Figure III.9 montre l'effet de la variation de la largeur du résonateur sur le coefficient de réflexion de l'antenne. On remarque que la fréquence de résonance et l'adaptation de l'antenne sont affectées par cette variation.

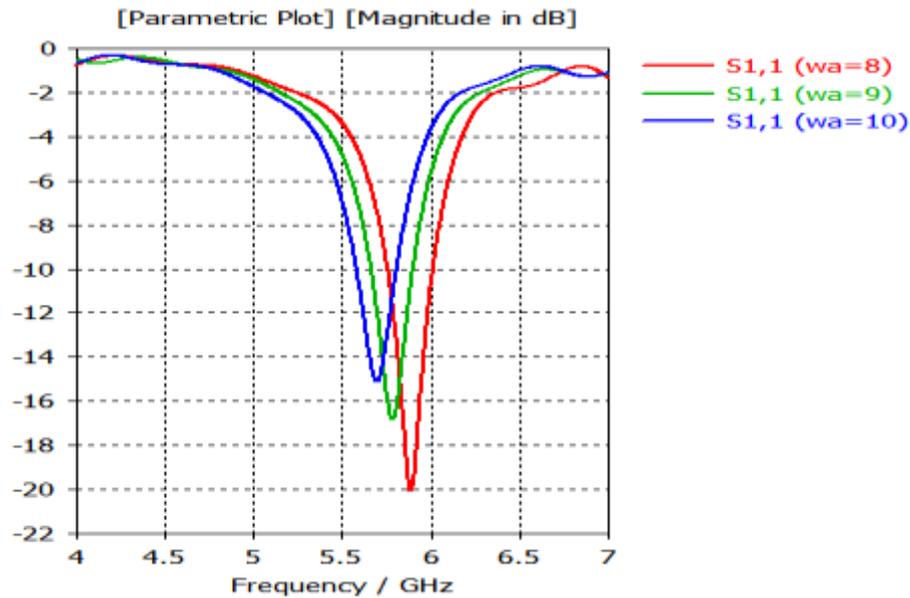


Figure III.9 : Coefficient de réflexion (S_{11}), pour différentes valeurs de la largeur du résonateur

III.2.3 Effet de la hauteur du résonateur h_1 :

La Figure III.10 montre l'effet de la variation de la hauteur du résonateur sur le coefficient de réflexion de l'antenne. On remarque que cette variation affecte la fréquence de résonance, et a aussi un effet sur l'adaptation de l'antenne.

Le changement de la hauteur du résonateur a fait diminuer la fréquence de résonance de 5.878 GHz ($h_1=5.5$ mm) à 5.32 GHz pour ($h_1=7.5$ mm).

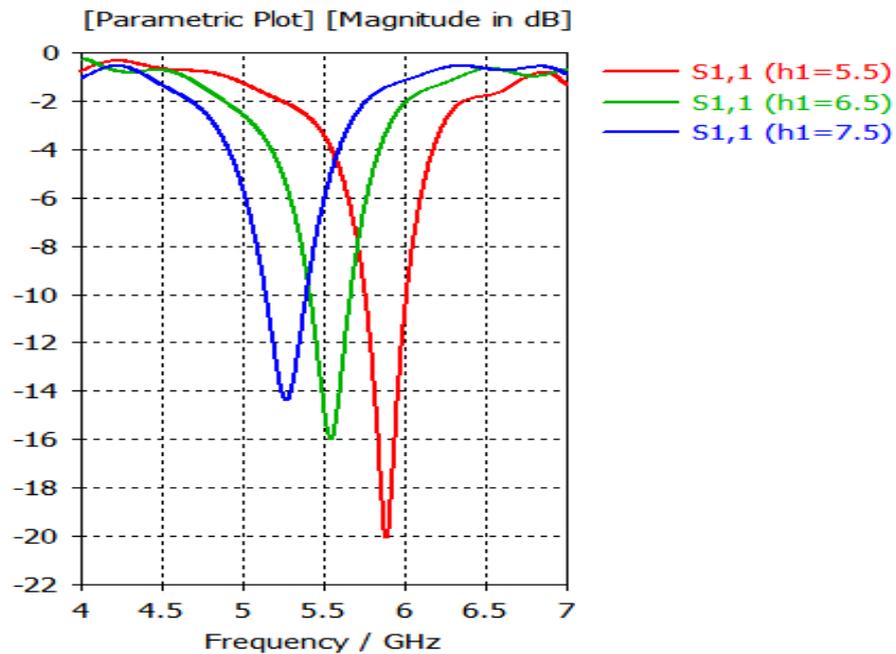


Figure III.10 : Coefficient de réflexion (S₁₁), pour différentes valeurs de la hauteur du résonateur

D'après l'étude paramétrique, on remarque que la fréquence de résonance et l'adaptation de l'antenne sont très sensibles aux dimensions du résonateur.

III.2.4 Influence des dimensions de la fente

Le couplage de l'énergie électromagnétique entre la ligne microruban et le résonateur diélectrique est assuré par la fente. De ce fait, l'analyse de ces dimensions est importante pour améliorer les performances de l'antenne.

Nous allons d'abord fixer la longueur du stub (ϵ), par la suite nous faisons varier la largeur et la longueur de la fente (w_s et l_s).

III.2.5 Effet de la largeur de la fente w_s

La Figure III.11 montre l'effet de la variation de la largeur de la fente sur le coefficient de réflexion de l'antenne.

L'augmentation de la largeur de la fente produit une augmentation de la fréquence de résonance et une dégradation de l'adaptation de l'antenne.

En faisant varier la largeur de 1 mm à 3 mm la fréquence de résonance varie de 5.887 GHz à 6.037 GHz et l'adaptation de l'antenne se dégrade de plus en plus.

On peut noter que, l'adaptation de l'antenne est fortement dépendante de la variation de la largeur de la fente.

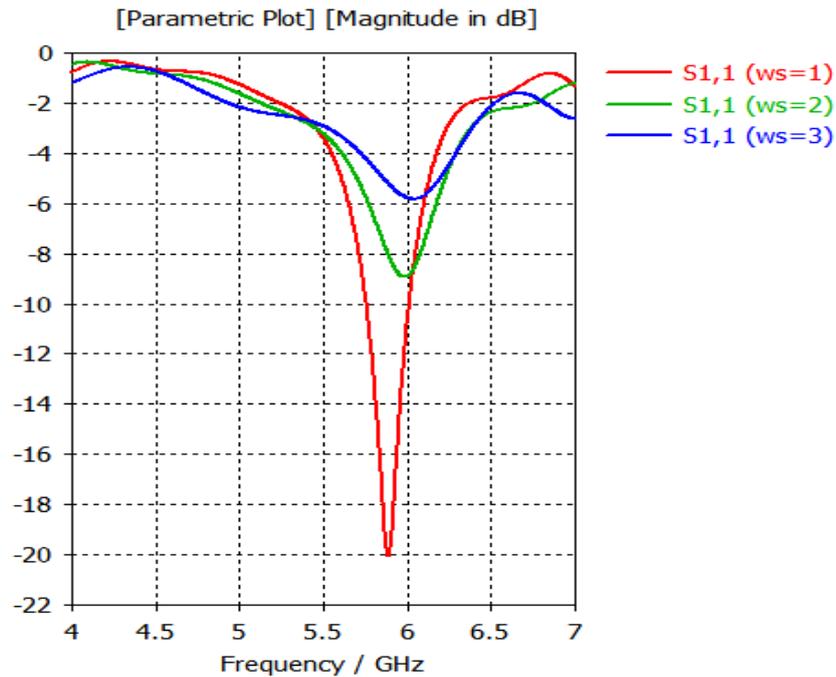


Figure III.11 : Coefficient de réflexion (S11), pour différentes valeurs de la largeur de la fente

III.2.6 Effet de la longueur de la fente l_s :

En maintenant fixe la largeur de la fente à 1mm, nous avons varié la longueur de la fente. L'effet de cette variation sur le coefficient de réflexion de l'antenne est montré sur la figure III.12.

Nous constatons que l'adaptation de l'antenne n'est pas affectée par la variation de la longueur de la fente. Par contre, la fréquence de résonance diminue légèrement lorsque la longueur de la fente augmente.

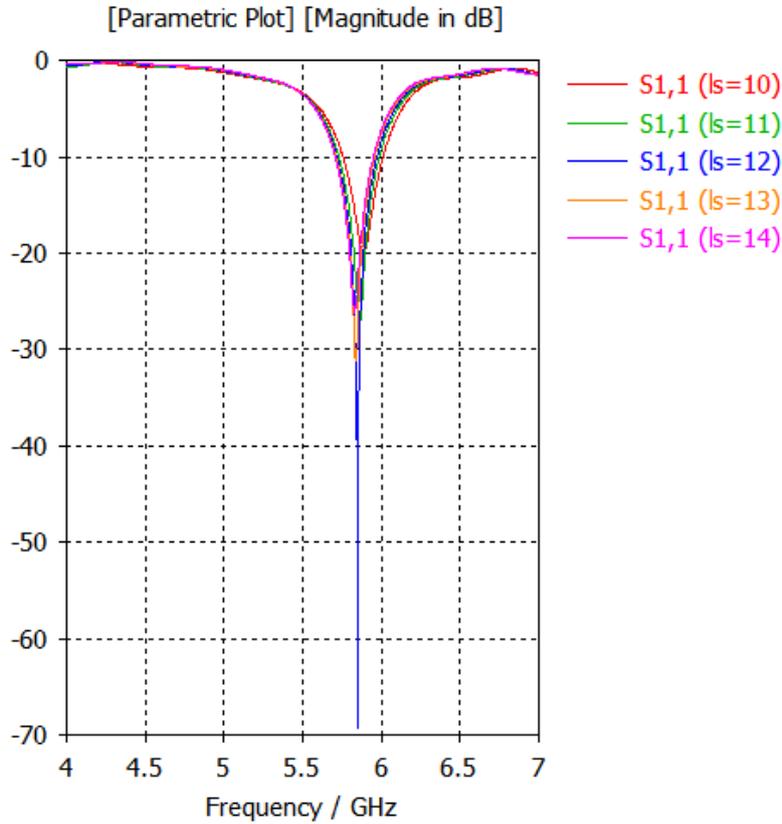


Figure III.12 : Coefficient de réflexion (S11), pour différentes valeurs de la longueur de la fente

III.2.7 Effet de la longueur du stub e

La Figure III.13 montre l'effet de la variation de la longueur du stub sur le coefficient de réflexion de l'antenne.

On remarque que l'adaptation de l'antenne est très sensible à la variation de la longueur du stub.

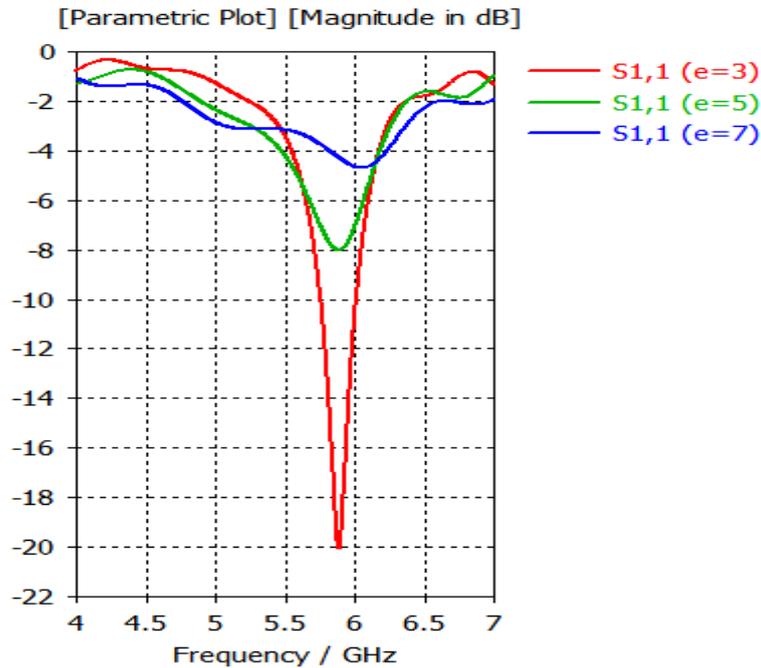


Figure III.13 : Coefficient de réflexion (S11), pour différentes valeurs de l’extension e

III.3 Etude et conception d’une antenne à résonateur diélectrique cylindrique

La deuxième antenne étudiée est une antenne à résonateur diélectrique cylindrique. La géométrie et les dimensions de cette antenne sont illustrées par la figure III.14 et III.15.

Le résonateur rectangulaire a été remplacé par un résonateur cylindrique de permittivité $\epsilon_r = 10$, de rayon $r = 7$ mm et d’une hauteur $h = 8$ mm. Les autres paramètres de l’antenne sont inchangés.

Les résultats des simulations effectuées avec cette antenne permettent de déterminer les paramètres de l’antenne qui influencent le plus ses performances.

L’antenne est alimentée par sonde coaxiale comme le montre la figure III.15.

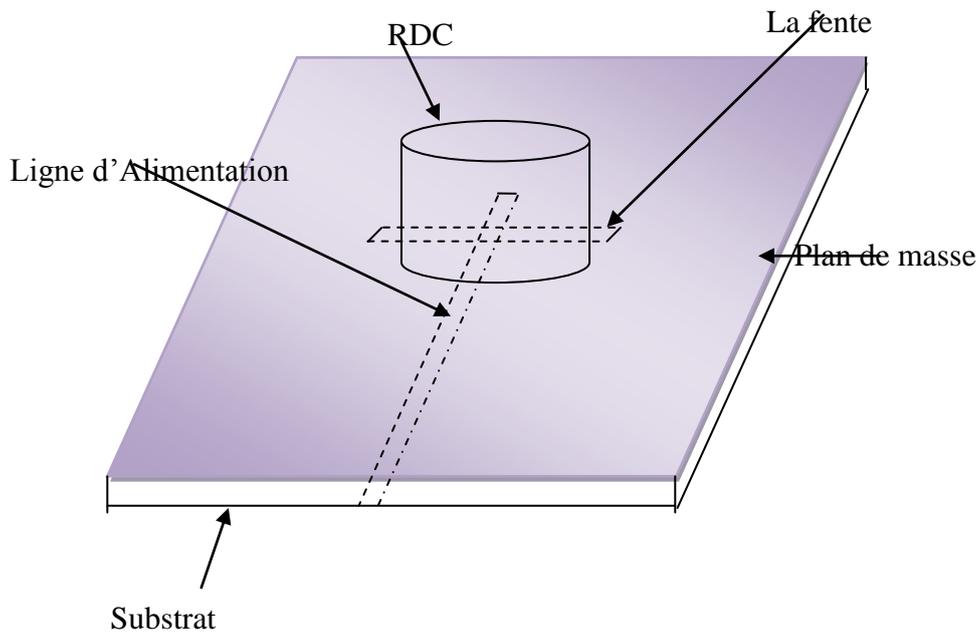


Figure III.14 : Structure de l'antenne à résonateur diélectrique cylindrique, en 3D

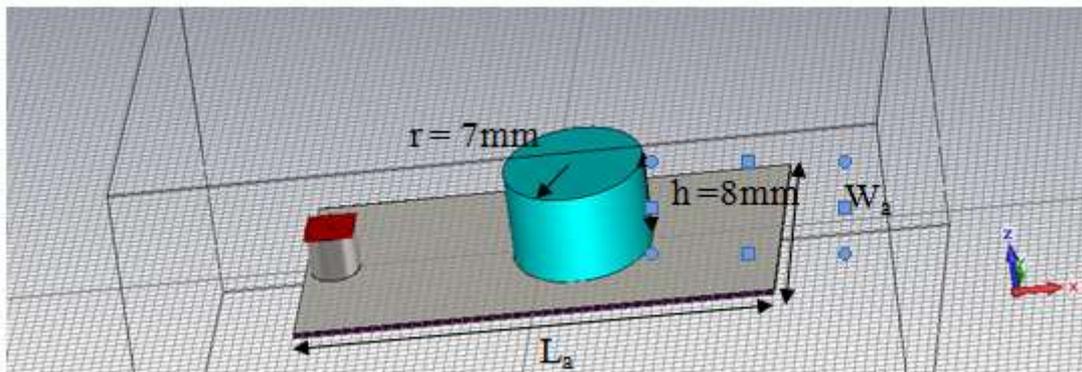


Figure III.15 : Structure de l'antenne à résonateur diélectrique cylindrique simulée par CST

La figure III.16 montre la représentation du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence. La bande passante à -10 dB est égale à 460 MHz et la fréquence de résonance est de 6.07GHz.

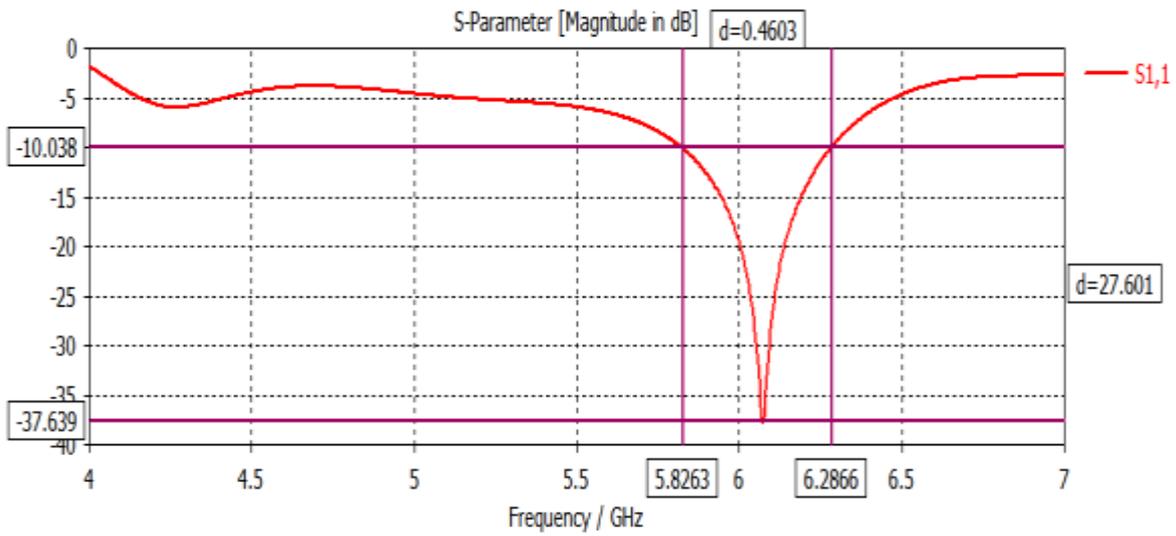


Figure III.16 : Coefficient de réflexion (S 11) en fonction de la fréquence

Les diagrammes de rayonnement en 2D et 3D sont donnés par les figures III.17.

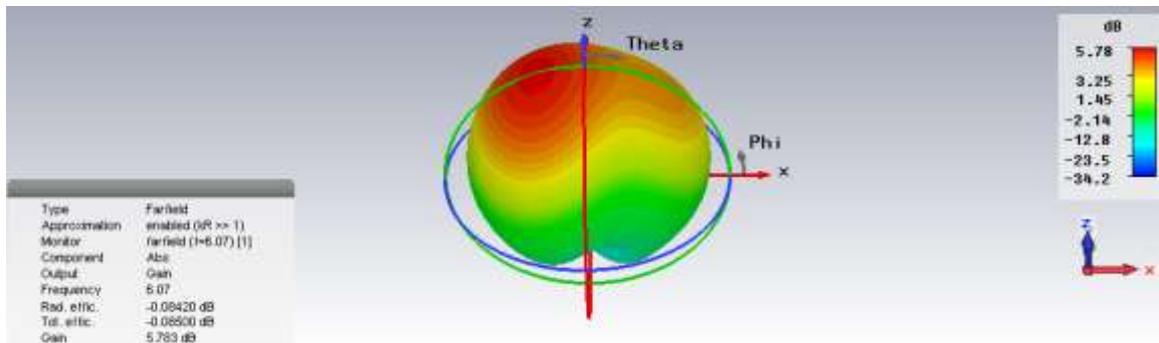
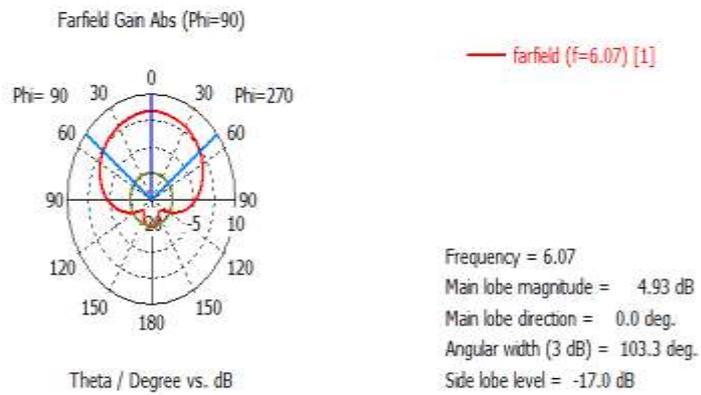


Figure III.17 : Diagrammes de rayonnement en 2D et 3D pour f = 6.07 GHz

III.3.1 Etude paramétrique

Une étude paramétrique est aussi faite, pour voir l'influence de chaque paramètre sur les performances de l'antenne.

On va étudier tout d'abord l'effet de la longueur du stub, puis l'influence des dimensions de la fente (longueur (l_s), largeur (w_s)).

III.3.1.1 Effet de la longueur du stub (e)

Les dimensions initiales de la fente sont $l_s=12$ mm et $w_s= 1$ mm. Nous faisons varier la longueur de stub e .

La Figure III.18 montre l'effet de la variation de la longueur du stub sur le coefficient de réflexion de l'antenne. On remarque que cette variation affecte la fréquence de résonance, et a aussi un effet sur l'adaptation de l'antenne.

Le changement de la longueur du stub a fait diminuer la fréquence de résonance de 6.0769 GHz ($e= 3$ mm) à 5.3219 GHz pour ($e = 7$ mm).

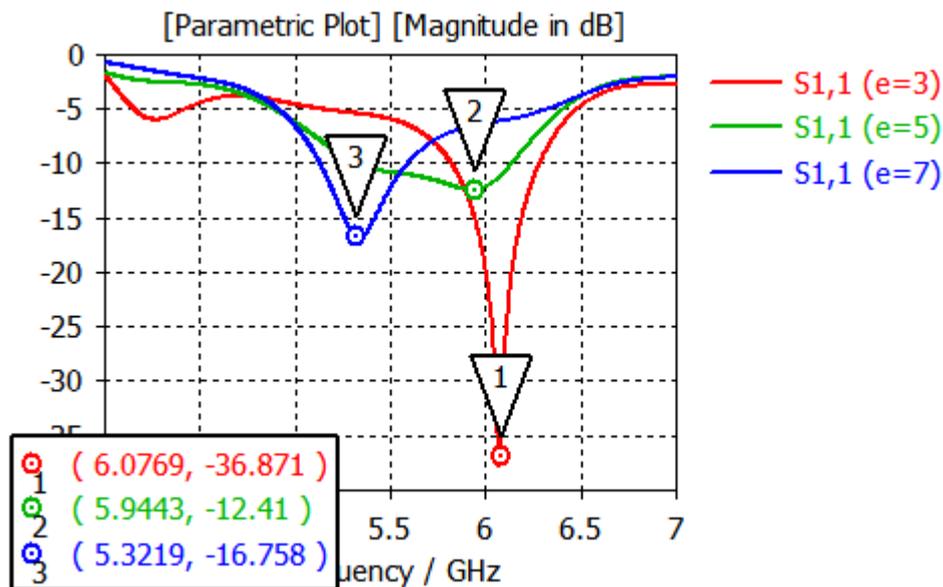


Figure III.18 : Variation de la fréquence de résonance en fonction de la longueur du stub

Le Tableau III.2 indique les bandes passantes (à -10dB) ainsi que les fréquences de résonances obtenues.

L'extensione (mm)	Fréquence(GHz)	Bande passante(MHz)
3	6.07GHz	(5.81GHz-6.29GHz)
5	5.92GHz	(5.32GHz-6.15GHz)
7	5.33GHz	(5.12GHz-5.59GHz)

Tableau III-2 : Variation de la fréquence de résonance et de la bande passante en fonction de la longueur du stub e

Nous constatons d'après le tableau III.2 que pour $e = 7$ mm, on a une fréquence qui est égale à 5.33 GHz associé au mode HEM qui est égale a 5.36 GHz.

Les diagrammes de rayonnement en 2D et 3D sont donnés par les figures III.19.

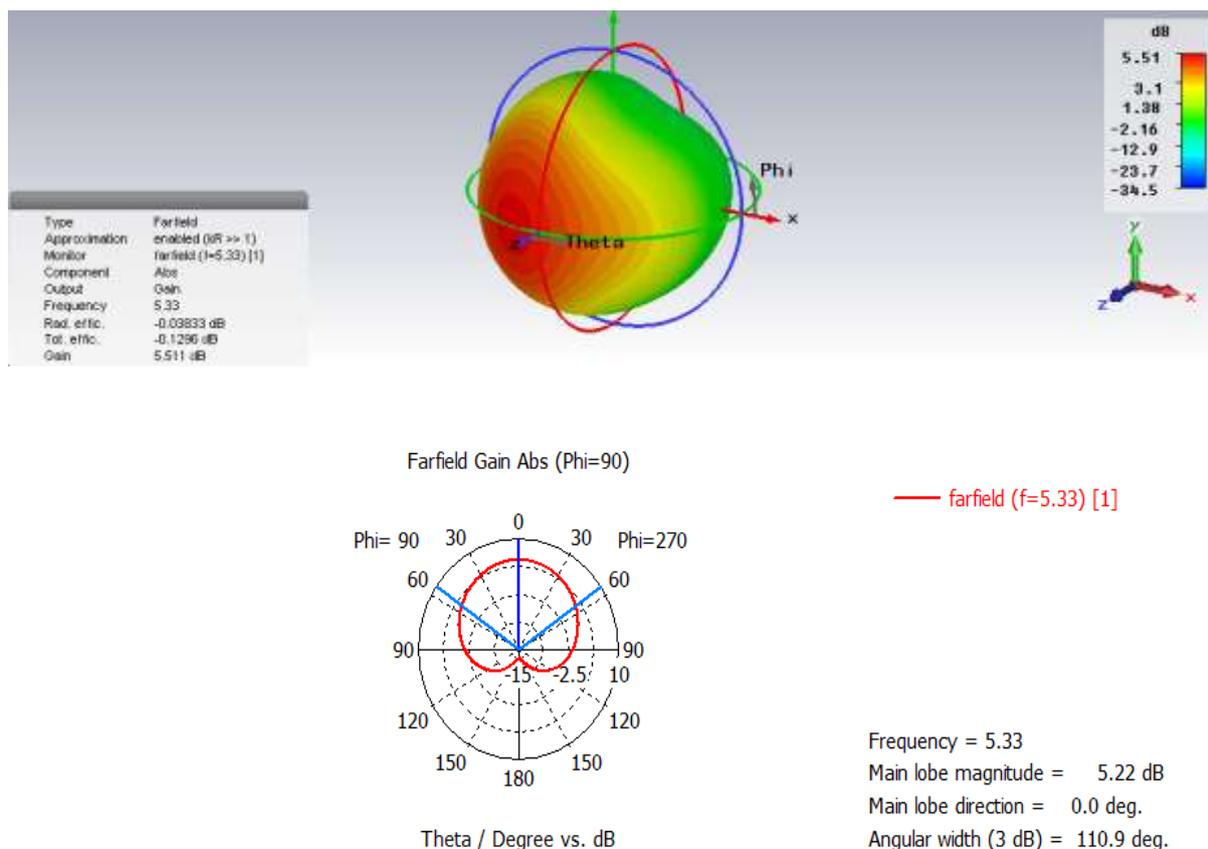


Figure III.19 : Diagrammes de rayonnement en 2D et en 3D pour $f = 5.33$ GHz

III.3.1.2 Effet du rayon du résonateur

Dans le deuxième chapitre nous avons vu que le rayon du résonateur a un effet important sur la fréquence de résonance. Pour vérifier ça, on a fait varier la valeur du rayon de 6.5 mm à 7.5 mm par un pas de 0.5 mm pour voir son effet sur les performances de l’antenne.

La figure III.20 donne l'effet de cette variation sur la valeur du coefficient de réflexion. Comme on peut le constater, cette variation affecte la fréquence de résonance et l’adaptation.

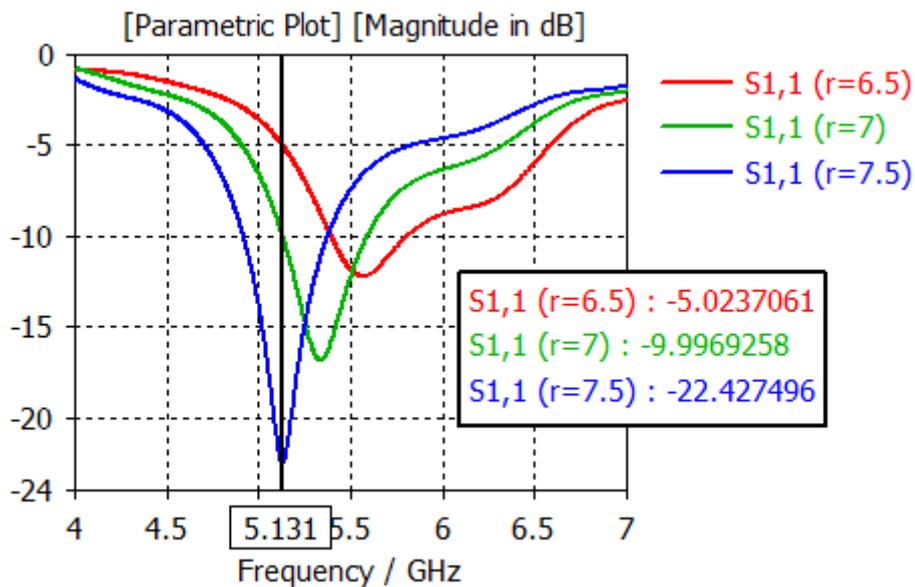


Figure III.20 : Variation de la fréquence de résonance en fonction du rayon (r)

III.3.1.3 Effet de la hauteur du résonateur h

La figure III.21 donne l'effet de la variation de la hauteur h du résonateur diélectrique sur la valeur du coefficient de réflexion. En faisant varier la hauteur h2 du résonateur diélectrique de 7 mm à 9 mm avec un pas de 1 mm, nous remarquons que cette variation affecte la fréquence de résonance et l’adaptation.

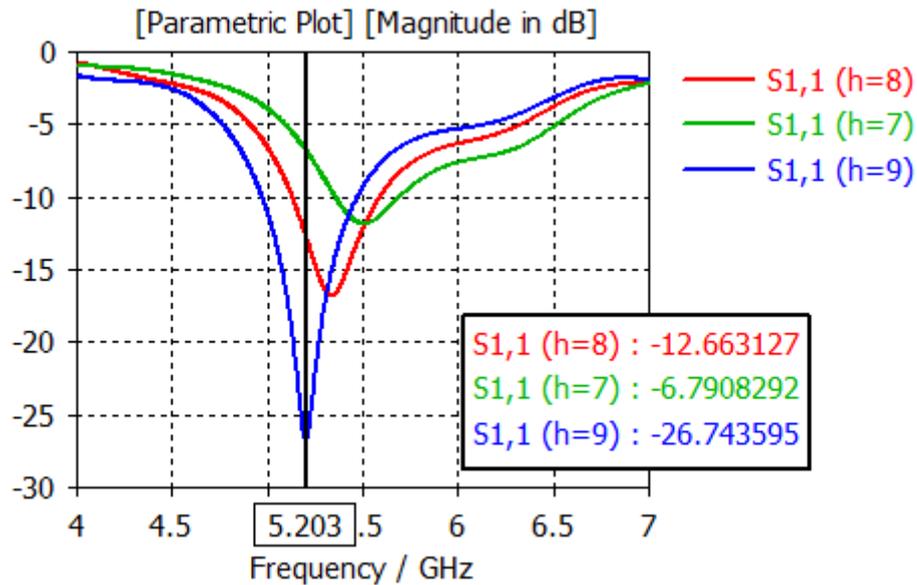


Figure III.21 : Variation de la fréquence de résonance en fonction de la hauteur du cylindre

III.3.1.4 Influence des dimensions de la fente

Nous allons d’abord fixer la longueur du stub (e), par la suite nous faisons varier la largeur et la longueur de la fente (w_s et l_s).

III.3.1.5 Effet de la longueur de la fente

La Figure III.22 montre l’effet de la variation de la longueur de la fente sur le coefficient de réflexion de l’antenne.

L’augmentation de la longueur de la fente produit une diminution de la fréquence de résonance et une dégradation de l’adaptation de l’antenne.

En fixant la largeur de la fente à 1 mm et en faisant varier la longueur de 5 mm à 12 mm la fréquence de résonance varie de 5.49 GHz à 5.34 GHz et l’adaptation de l’antenne se dégrade de plus en plus.

On peut noter que, l’adaptation de l’antenne est fortement dépendante de la variation de la longueur de la fente.

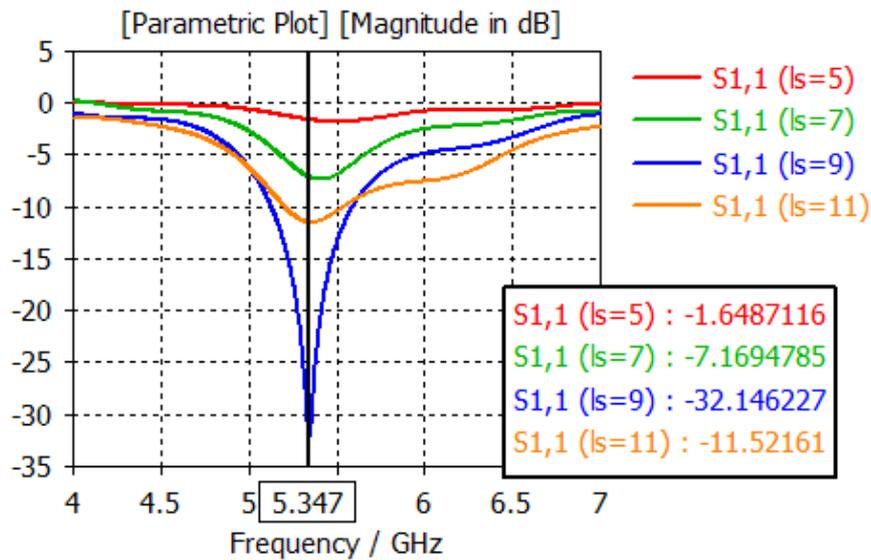


Figure III.22 : Influence de la longueur de la fente l_s sur la fréquence de résonance

III.3.1.6 Effet de la largeur de la fente

Maintenant en fixant la longueur de la fente à 10 mm, et en faisant varier sa largeur de 0.5 mm à 1.5 mm, nous constatons que cette variation entraîne une légère variation de la fréquence de résonance.

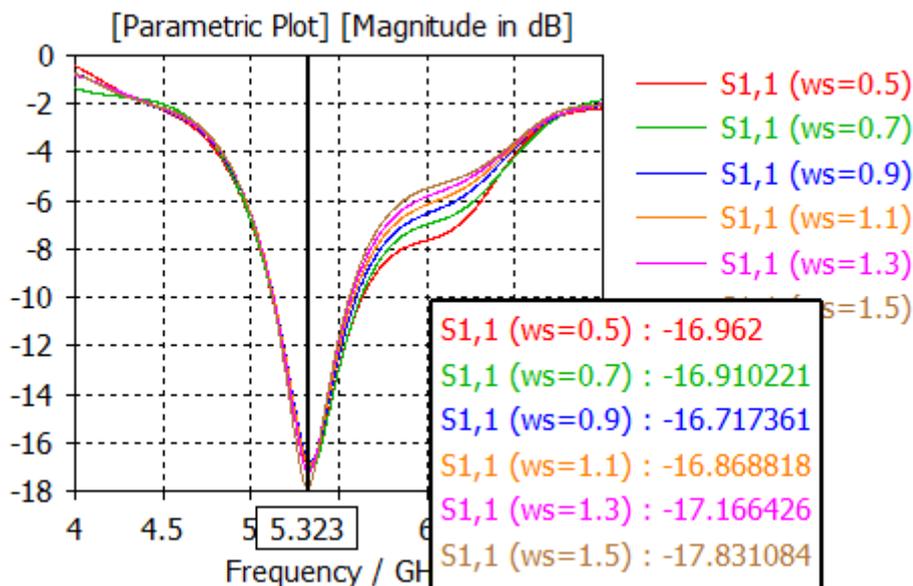


Figure III.23 : Influence de la largeur de la fente w_s sur la fréquence de résonance

III.4 Etude et conception d'une antenne à résonateur diélectrique conique

La troisième et dernière antenne étudiée est une antenne à résonateur diélectrique conique [33-34] qui a un degré de liberté en plus par rapport à la forme cylindrique du fait que le rayon supérieur du résonateur est différent du rayon inférieur. La géométrie et les dimensions de cette antenne sont illustrées par la figure III.24 et III.25.

Le résonateur cylindrique a été remplacé par un résonateur conique de permittivité $\epsilon_r = 10$, de rayon inférieur $r_1 = 7.5$ mm, de rayon supérieur $r_2 = 5.5$ mm et d'une hauteur $h = 10$ mm. Les autres paramètres de l'antenne sont inchangés.

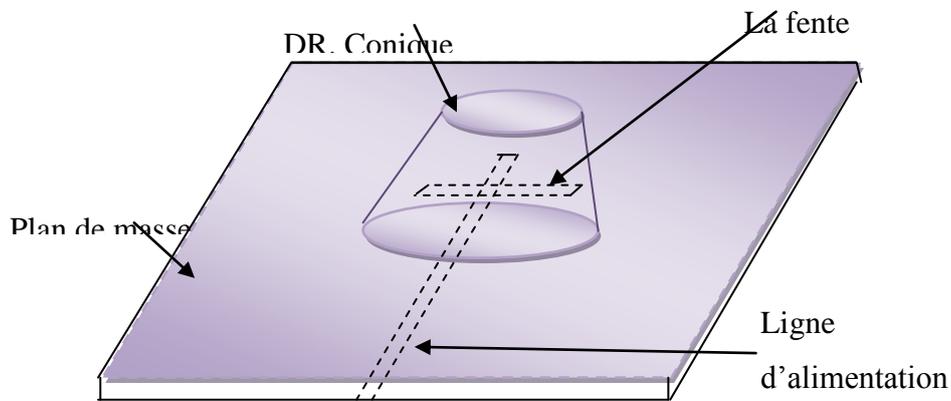


Figure III.24 : Géométrie de l'antenne conique

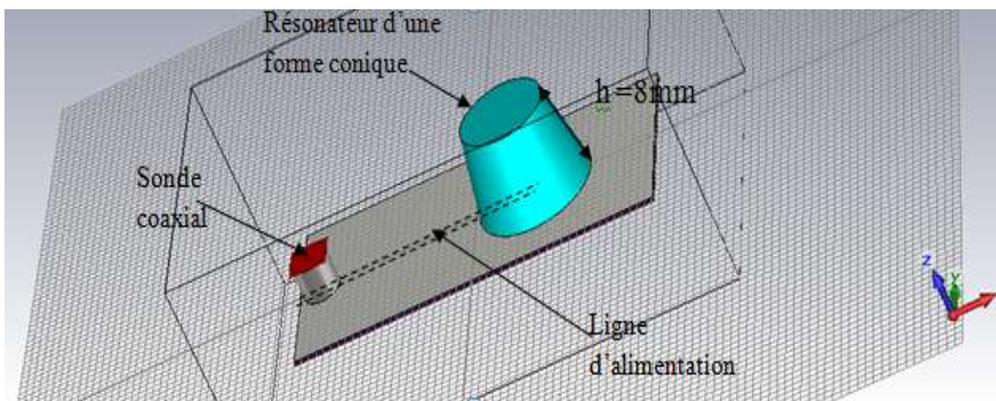


Figure III.25 : Antenne conique alimentée par sonde coaxiale

La figure III.26 montre la représentation du coefficient de réflexion S_{11} en fonction de la fréquence. La bande passante à -10 dB est égale à 480 MHz et la fréquence de résonance est de 6.34 GHz.

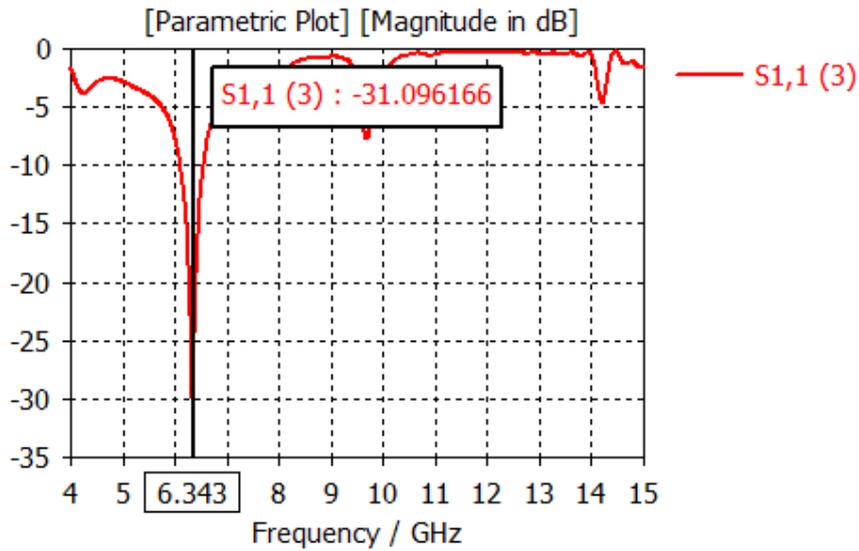


Figure III.26 : Coefficient de réflexion S_{11}

Le diagramme de rayonnement en 3D est donné par la figure III.27

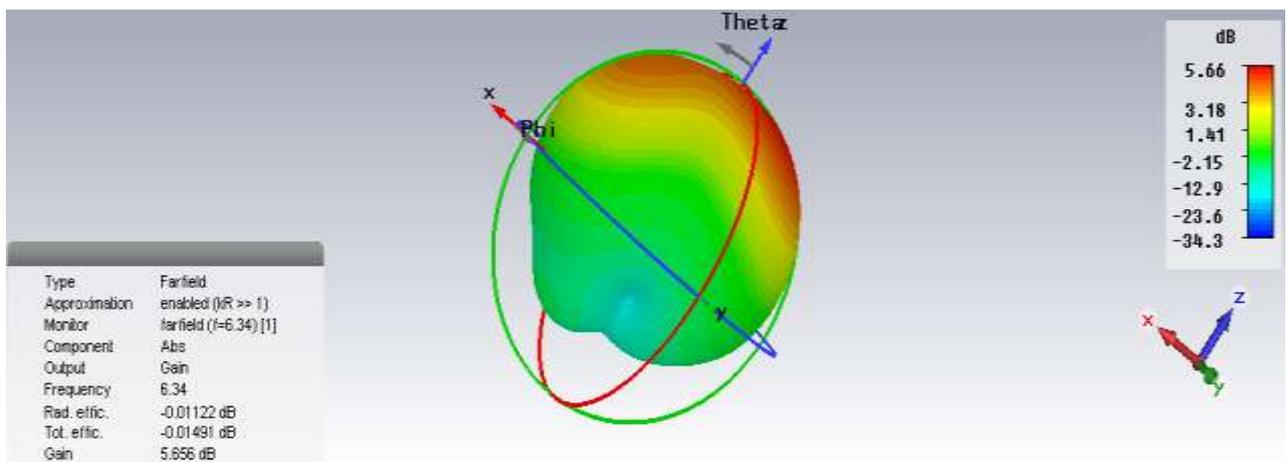


Figure III.27 :Diagramme de rayonnement en 3D pour $f = 6.34\text{GHz}$

La simulation est effectuée à plusieurs reprises, pour différentes valeurs du rayon supérieur du résonateur pour voir l'impact de cette variation sur les caractéristiques de l'antenne.

La Figure III.28 montre l'effet de cette variation sur le coefficient de réflexion de l'antenne. Nous remarquons qu'en faisant varier ce rayon de 5 mm à 7 mm par un pas de 0.5 mm, la fréquence de résonance change.

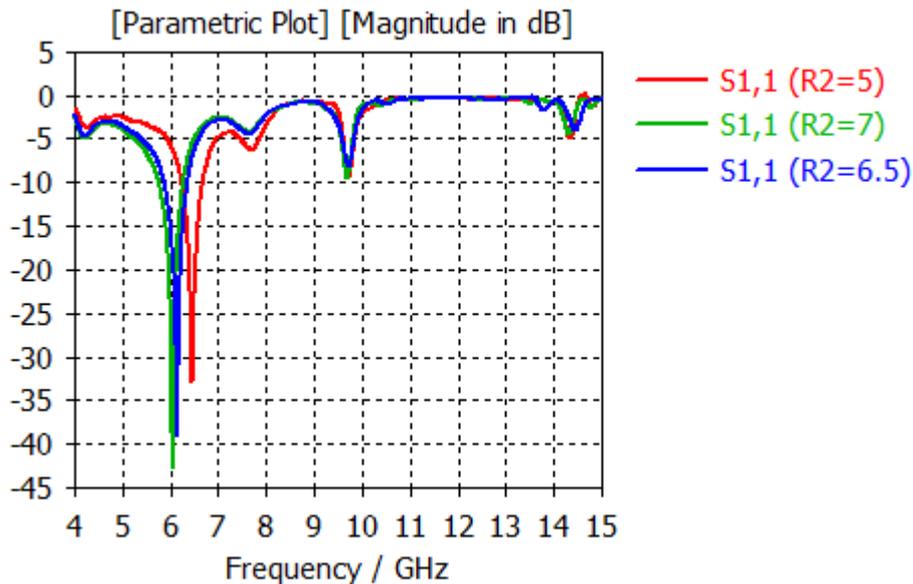


Figure III.28 : Influence de la valeur du rayon R2 sur la fréquence de résonance

Les différentes simulations effectuées pour les trois antennes étudiées montrent que l'antenne à résonateur diélectrique conique possède une meilleure bande passante que celle de l'antenne à résonateur cylindrique et rectangulaire.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et conçu trois antennes à résonateur diélectrique : antenne à résonateur diélectrique rectangulaire, antenne à résonateur diélectrique cylindrique et antenne à résonateur diélectrique conique. La géométrie et les dimensions de ces antennes ont été optimisées en utilisant le logiciel CST. Pour chaque antenne, nous avons fait plusieurs simulations afin de déterminer les paramètres de l'antenne qui influencent le plus ses performances. Les résultats de simulation ont été présentés et discutés.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le domaine des microondes, les résonateurs diélectriques ont pris une place très importante dans différents systèmes, aussi bien passifs, qu'actifs, comme par exemple, les oscillateurs, les dispositifs de filtrage et les antennes.

Les antennes à résonateur diélectrique, composé principalement de résonateurs de formes variées, constitue une alternative intéressante aux antennes imprimées qui offrent une bande passante limitée et présentent des pertes dans le domaine des microondes.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur les antennes à résonateur diélectrique. Trois antennes à résonateur diélectrique ont été étudiées et conçues.

Dans le premier chapitre nous avons présenté, dans un premier temps, les caractéristiques fondamentales des antennes. La définition, les paramètres fondamentaux des antennes ont alors été présentés. Nous avons présenté également, en fin de ce chapitre, la définition ainsi que les techniques d'alimentation les plus utilisées des antennes patches.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les antennes à résonateur diélectrique. Les modes de fonctionnement, les formules de détermination des fréquences de résonance ainsi que le facteur de qualité pour les résonateurs de formes cylindrique et rectangulaire ont été présentés.

Trois antennes à résonateur diélectrique ont été étudiées et conçues dans le troisième chapitre. La première antenne est antenne à résonateur diélectrique rectangulaire, la seconde antenne est une antenne à résonateur diélectrique cylindrique. Finalement la troisième antenne conçue antenne à résonateur diélectrique conique. La géométrie et les dimensions de ces antennes ont été optimisées en utilisant le logiciel CST. Pour chaque antenne, nous avons fait plusieurs simulations afin de déterminer les paramètres de l'antenne qui influencent le plus ses performances. Les résultats de simulation ont été présentés et discutés.

Les résultats de simulation obtenus par le logiciel CST ont montré que les antennes conçues présentent de bonnes performances. La perspective à notre travail est d'essayer des réseaux linéaires d'antennes à résonateur diélectrique dans le but d'améliorer les performances de l'antenne.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : Paul F. Combes, "Micro-ondes tome II circuits passifs, propagation, antennes," Dunod, Paris, 2-10-002753-0, 1997
- [2] Odile Picon et coll « LES ANTENNES Théorie, conception et application » Préface de Maurice Bellanger, Paris, 2009.
- [3] C. A. Balanis, « Antenna Theory: A Review, » Proc. IEEE, Vol. 80, No. 1, pp. 7–23, January 1992.
- [4] : C. A. Balanis, „Antenna theory analysis and design, 2eme edition John Wiley and Sons, 1997.
- [5] : K.F. Lee, “ Principles of antennas theory”, John Wiley& Sons,U.S.A,1984.
- [6] BALANIS C.A. « Antenna Theory Analysis and Design », New Jersey, A. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [7] : P. F. Combes, «Circuits Passifs, Propagation, Antennes," Micro-ondes Tome 2, Dunod, 1997
- [8] Aldo Petosa, “*Dielectric Resonator Antenna Handbook*”, Artech House, Incorporated, 2007
- [9] : Y. Kobayashi, S. Tanaka, " Resonant Modes of a dielectric rod resonator short circuited at both ends by parallel conducting plates, " IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 28, pp: 1077-1085, Oct. 1980
- [10] Samiha Mekerta : Modélisation électromagnétique de structures microondes planaires à résonateurs diélectriques, application au filtrage microonde
Revue « Nature & Technologie ». n° 05/Juin 2011. Pages 17 à 25
- [11] : Dielectric Resonator Antennas (DRA) for satellite and body area network applications
Muhammad Faiz Alam thèse Université Paris-Est, 2012
- [12] : Mr. Agouzoul-Abderrahmane (conception et réalisation d’une antenne a résonateur diélectrique a 60 Ghz pour les applications souterraines) ;2013.
- [13] : McAllister M.W., S. A. Long and G. L. Conway. 1983. "Rectangular Dielectric Resonator Antenna", Electronics letters, vol. 19, No.6: 218-219.

- [14] Hedi Ragad : étude et conception de nouvelles topologies d'antennes à résonateur diélectrique. Thèse de doctorat novembre 2013 université Nantes France
- [15] : Leung K. W., 2000a. "Conformal Strip Excitation of Dielectric Resonator" IEEE Transactions on Antennas and Propagations, vol. 48, No.6, pp 961-967.
- [16]: Mc Allister M. W and S. A. Long. 1984."Resonant Hemispherical Dielectric Antenna" Electronic letters, vol. 20, No.16: 657-659.
- [17]: Tarn, M.T.K.et R. D. Murch. 2000. "Circularly Polarized Circular Sector Dielectric Resonator Antenna" IEEE Transactions on Antennas and Propagations, vol. 48, No.1: 126-129.
- [18] :Mr. Alexandre BADEV (Matériaux diélectriques à faibles pertes utilisés comme résonateurs et filtres dans les circuits micro-ondes.) ; 2008.
- [19]: Leung, K. W. et al. 2002 "High permittivity dielectric resonator antenna excited by a rectangular waveguide," Microwave and optical technology letters, Vol. 34, No. 4: 157-158.
- [20]: Kishk, A. A. 2003. "Wide-Band Truncated Tetrahedron Dielectric Resonator Antenna Excited by a Coaxial Probe", IEEE, Transaction on Antennas and Propagation, vol. 51, No. 10:1500-1504.
- [21]: R.K. Mon gia, A. Ittipiboon," Theoretical and Experimental Investigations on Rectangular Dielectric Resonator Antennas", IEEE Transactions on Antennas and Propagations, vol. 45, no.9: 1348-1356. 1997
- [22] : Mr. Idris Messaoudene (modélisation et réalisation de nouvelles antennes diélectriques larges bandes pour les communications sans fil) ; 2014.
- [23] : Mr. Ahmed Benomar (Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques. : Application aux Réseaux de Télécommunications) ; thèse 2015
- [24] : Leung K.W., 2000b. "Analysis of Aperture-Coupled Hemispherical Dielectric Resonator Antenna with a Perpendicular feed" IEEE Transactions on Antennas and Propagations, vol. 48, No.6: 1005-1007
- [25]: A.A. Kishk, G. Zhou, A.W. Glisson, "Analysis of dielectric-resonator antennas with emphasis on hemispherical structures", Antennas and Propagation Magazine, IEEE, vol.36, no.2, pp.20-31, Apr 1994
- [26]: Kishk, A. A. 2003. "Dielectric Resonator Antenna, a Candidate for Radar Applications, IEEE Radar Conference: 258-264
- [27]:M.W. Mc Allister, S.A. Long", Resonant Hemispherical Dielectric Antenna", Electronicletters, vol. 20, No.16: 657-659,1984

[28] : Kranenburg, R. A, S. A. Long et J. T. Williams, 1990."Coplanar Waveguide excitation of dielectric resonator antenna" IEEE Transactions on Antennas and Propagations, vol. 39, no.1: 119-122

[29] : K.W. Leung, "Conformed Strip Excitation of Dielectric Resonator", IEEE Transactions on Antennas and Propagations, vol. 48, no.6, pp 961-967, 2000

[30] : Huang, C.Y., J. Y. Wu, et K. L.Wong 1999 "Cross-Slot-Coupled Microstrip Antenna and Dielectric Resonator Antenna for Circular Polarization" IEEE Transactions on Antennas and Propagations, vol. 47, No4: 605-609

[31] : Kranenburg R. A. et S.A. Long. 1988. "Microstrip transmission line excitation of Dielectric Resonator Antenna ", Electronics Letters, vol24, No 18: 1156-1157

[32] : K.W. Leung, "High permittivity dielectric resonator antenna excited by a rectangular waveguide", Microwave and optical technology letters, vol. 34, no. 4: 157-158, 2002

[33] : Kishk, A. A, Y. Y an et A. W. Glisson. 2002. " Conical dielectric resonator antennas for Wide-band applications", IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 50 no.4, 469-474.

[34] : A.A Kishk, Y.Y. an, A.W. Glisson", Conical dielectric resonator antennas for wide-band applications", IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 50 no.4, 469-474, 2002