

Université ABDERRAHMANE MIRA-Bejaia
Faculté de Technologie
Département d'Automatique de Télécommunication
et d'Electronique

Mémoire de fin d'études

En vue d'obtention du diplôme Master en Télécommunication

Thème

Antenne de Téléphonie mobile, caractérisation et optimisation

Présenté par :

M^{ell} . Melihi Souhila

M^{ell} . Fengal Tine-hinane

Devant le jury composé de :

Mr. S. BERRAH

Mr. KHIRDDINE

Encadré par:

Mr. M. ROUHA

Promotion 2016

Remerciements

On tient tout d'abord à remercier « Allah » le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la force et la patience pour mener ce travail à terme.

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

Nous remercions tout particulièrement les membres de jury qui ont accepté de lire et de juger notre travail, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

On tient à remercier tous ceux qui nous ont aidés de prêt ou de loin même pour un simple conseil.

Dédicace

À mes très chers parents

Je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre amour, votre patience et vos innombrables sacrifices.

Que ce modeste travail, soit pour vous une petite compensation et reconnaissance envers tout ce que vous avez fait pour moi.

Que dieu, le tout puissant vous préserve et vos procure santé et longue vie, afin que je puisse à mon tour vous combler.

À mon frère « A. lazize » et mes chères sœurs « Naima et Kadda »

Aucun dédicace ne serait exprimer profondément ce que je ressens envers vous. Je vous dirais tout simplement merci, je vous aime.

À ma très chère sœur « Zoubida » et son mari « Mahmoud » et leurs enfants
« Adam, Youza, Anas, Kiba, Lehna »

Malgré la distance, vous êtes toujours dans mon cœur. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

À mon très cher fiancé « Yassine »

En témoignage de l'amour sincère qui nous a liées et les bons moments passés ensemble. Je te dédie ce travail en te souhaitant un avenir radieux et plein de bonnes promesses.

À ma binôme « tin-hinane »

À tous mes ami(e)s et à tous les assoiffés du savoir.

Souhila.



Dédicace

A mon cher papa

Aucune dédicace ne serait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation. « Merci papa »

A ma chère mère

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mes frères et sœurs « Dahia, Massinissa, Massina, Nissa »

Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.
Je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.

Je dédie ce modeste travail aussi

A foudil et sa famille.

A tout mes amis sans exception.

A toute la promotion Master II télécommunication 2016.

A ma binôme Souilla et sa famille.

A tous ce qui m'ont aidée de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Tine-hinane

Liste des abréviations

OEM : onde électromagnétique.

2D et **3D** : deux dimensions et trois dimensions.

RF : Radio Fréquence.

VSWR : Voltage Standing Wave Ratio.

ROS : Rapport d'Ondes Stationnaires.

GSM : Global System for Mobile communication.

DCS : Digital Cellular System.

PCS : Personal Communication Service.

WIFI : Wireless-Fidelity.

TEM : Transverse Electromagnétique.

TM : Transverse Magnétique.

eff : effective.

MLT : Méthod de Ligne de Transmission.

FEM : Finite Element Method (méthode des éléments finie).

FDTD : Finite Difference Time Domain.

MOM : Method Of Moments.

HFSS : High Frequency Structure Simulator.

ISM : industriel, scientifique et médical.

Liste des illustrations

Chapitre I : principes fondamentaux des antennes

Figure I - 1: l'onde électromagnétique.....	2
Figure I - 2: types de polarisation.....	4
Figure I - 3: le spectre électromagnétique.....	4
Figure I - 4: rayonnement d'une antenne isotrope.....	5
Figure I - 5: système de coordonnées de référence et la notion d'angle solide.....	6
Figure I - 6: rôle d'une antenne.....	7
Figure I - 7: diagramme de rayonnement d'une antenne directive.....	8
Figure I - 8 : circuit équivalent d'une antenne en émission.....	10
Figure I - 9 : mesure de la bande passante à partir du tracé du coefficient de réflexion.....	13
Figure I - 10: réflecteur parabolique.....	14
Figure I - 11: antenne cornet.....	14
Figure I - 12: aspect d'une antenne micro-ruban rectangulaire.....	15

Chapitre II : Généralités sur les antennes imprimées

Figure II - 1: structure d'une antenne imprimée.....	17
Figure II - 2: différentes formes d'élément rayonnant.....	18
Figure II - 3: distribution de charge et de densité de courant.....	19
Figure II - 4: distribution du champ électrique vertical.....	19
Figure II - 5: alimentation par ligne micro-ruban.....	21
Figure II - 6: alimentation par ligne micro-ruban (a) axiale (b) décalée (c) axiale avec encoche.....	21
Figure II - 7: alimentation coaxiale.....	22
Figure II - 8: le circuit équivalent d'une antenne patch.....	22
Figure II - 9: alimentation couplée par proximité.....	23
Figure II - 10: circuit équivalent d'un patch alimenté par proximité.....	23
Figure II - 11: alimentation couplée par ouverture.....	24
Figure II - 12: circuit équivalent d'une antenne couplée par ouverture.....	24
Figure II - 13: ligne micro-ruban.....	27
Figure II - 14: lignes de champ électrique.....	27
Figure II - 15: antenne patch rectangulaire.....	28
Figure II - 16: vue du haut de l'antenne.....	29
Figure II - 17: vue latérale de l'antenne.....	29
Figure II - 18: modèle de la cavité.....	30
Figure II - 19: distribution de charge et densité de courant sur le patch.....	31

Chapitre III : conception et simulation d'une antenne imprimée sous HFSS

Figure III - 1: la géométrie de l'antenne patch rectangulaire conçue pour le GSM900.....	38
Figure III - 2: coefficient de réflexion S11 du point d'alimentation optimale de l'antenne.....	39
Figure III - 3: résultats du VSWR (rapport d'onde stationnaire).	40
Figure III - 4: répartition du champ sur le patch : (a) champ H, (b) champ E.....	40
Figure III - 5: diagramme de rayonnement 2D du gain : (a) $\phi = 0^\circ$, (b) $\phi = 90^\circ$	41
Figure III - 6: digramme de rayonnement 3D : (a) directivité total, (b) champ E total.....	41
Figure III- 7: paramètres géométriques de l'antenne rectangulaire réalisée sur le FR4- epoxy.....	42
Figure III - 8: la géométrie de l'antenne patch rectangulaire conçue pour le GSM900- DCS1800.	43
Figure III - 9: le coefficient de réflexion de l'antenne simulée.....	43
Figure III - 10: variations du rapport d'onde stationnaire (VSWR).....	44
Figure III - 11: la répartition du champ E sur la surface du patch.....	44
Figure III - 12: la répartition du champ H sur la surface du patch.....	45
Figure III - 13: diagramme de rayonnement 2D du gain : (a) $\phi = 0^\circ$, (b) $\phi = 90^\circ$	45
Figure III - 14:diagramme de rayonnement 3D : (a) champ total E, (b) directivité total.....	46

Liste des tableaux

Tableau (II-1) : caractéristiques de différentes techniques d'alimentation.....	25
Tableau (II-2) : avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentation.....	26
Tableau (III-1) points forts et faibles de ce type d'antenne.....	48

Table des matières

Chapitre I : principes fondamentaux des antennes

I.1	Introduction	1
I.2	Historique	1
I.3	Ondes électromagnétique	1
I.3.1	Définition de l'OEM.....	2
I.3.2	Les sources des OEM.....	3
I.3.3	Les paramètre d'OEM.....	3
I.3.4	Le spectre électromagnétique	4
I.4	Les Antennes	5
I.4.1	L'antenne isotrope	5
I.4.2	Densité de puissance d'une antenne	6
I.4.3	Rôle des antennes.....	7
I.5	Caractéristiques des antennes	7
I.5.1	Diagramme de rayonnement	8
I.5.2	Directivité	9
I.5.3	L'impédance d'entrée	9
I.5.4	Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)	9
I.5.5	Le coefficient de réflexion S_{11} (adaptation).....	11
I.5.6	Le rendement	11
I.5.7	La polarisation	11
I.5.8	Le gain	12
I.5.9	La bande passante (BP).....	12
I.5.10.	La forme et les dimensions	13
I.6	Types des antennes	13
I.6.1	Antennes élémentaires	13
I.6.2	Antennes en réseau	14
I.6.3	Antennes à réflecteurs.....	14
I.6.4	Antenne pour guide d'onde.....	14
I.6.5	Antennes imprimées (micro-ruban)	15
I.7	Conclusion	15

Chapitre II : Généralités sur les antennes imprimées

II.1	Introduction.....	16
II.2	Historique.....	16
II.3	Description d'une antenne imprimée ou "patch"	17
II.4	Les caractéristiques des antennes "patch"	19
II.4.1	Mécanisme de rayonnement d'un "patch"	19
II.4.2	Polarisation de l'antenne "patch"	20
II.4.3	Bande passante de l'antenne "patch"	20
II.5	Alimentation des antennes "patches"	20
II.5.1	Alimentation par ligne micro-ruban.....	21
II.5.2	Alimentation coaxiale	22
II.5.3	Alimentation couplée par proximité.....	23
II.5.4	Alimentation couplée par ouverture.....	24
II.6	Méthodes d'analyse	26
II.6.1	Méthodes analytiques (approximatives).....	27
II.6.1.1	Modèle de la ligne de transmission	27
II.6.1.2	Modèle de la cavité résonnante	30
II.6.2	Méthodes numériques	32
II.6.2.1	Méthode des éléments finis (FEM)	33
II.6.2.2	Méthode des différences finies (FDTD).....	33
II.6.2.3	Méthode des moments	33
II.6.2.4	Méthode d'analyse spectrale	34
II.7	Applications	34
II.8	Conclusion	35

Chapitre III : Conception et simulation d'une antenne imprimée sous HFSS

III.1	Introduction	36
III.2	Logiciel de simulation « HFSS ».....	36
III.3	Les paramètres spécifiques pour la conception d'une antenne patch rectangulaire.....	38
III.3.1	Fréquence de fonctionnement ou de résonance f_r	38
III.3.2.	La constante diélectrique du substrat ϵ_r	39
III.3.3.	L'épaisseur du substrat diélectrique h	39
III.4	Description de l'antenne à réaliser	39
III.4.1	Conception d'une antenne mono-bande GSM à patch rectangulaire alimentée par une sonde coaxiale.....	39
III.4.2	Les résultats de simulation de l'antenne patch rectangulaire fonctionnant à 900Mhz pour GSM	40
III.4.3	Conception d'une antenne bi-bande (GSM-DCS) à patch rectangulaire alimentée par une sonde coaxiale	43
III.4.4	résultats de simulation de l'antenne patch rectangulaire alimentée par une sonde coaxiale fonctionnant à 900 Mhz et 1800 Mhz pour GSM-DCS.....	44
III.5	Avantages et inconvénients de ce type d'antenne	47
III.6	conclusion.....	48

Introduction Générale

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique au cours des dernières années grâce à la forte demande de la population et de l'industrie. Parmi les préoccupations de ce domaine, on trouve les antennes. Ce sont des éléments indispensables pour assurer une opération d'émission ou de réception des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace. Elles sont présentes dans tous les systèmes de communication sans fil.

Afin de répondre aux besoins actuels du domaine de télécommunication les concepteurs ont développé un point important : celui d'être connecté en permanence à un réseau mobile d'où l'apparition d'un nouveau réseau sans fils pour la communication à distance (le réseau de téléphonie mobile). Et cela en élaborant des dispositifs à base des antennes planaires (imprimées). Ces antennes présentent des caractéristiques très avantageuses en ce qui concerne le poids, le volume, le cout, la simplicité de fabrication et surtout la possibilité de les implanter sur tout type de dispositif électronique.

Cependant ce type d'antenne présente des limites notamment la bande passante étroite, le faible gain, et la possibilité de résonner à une seule fréquence.

Aujourd'hui les antennes planaires connaissent un grand intérêt chez les chercheurs à cause de leurs nombreuses applications. En effet, les domaines d'utilisation privilégiés des antennes microbande sont les communications en hautes fréquences tels que les communications spatiales, les systèmes militaires et commerciaux, la navigation aérienne ou terrestre, les réseaux informatiques sans fil et la téléphonie mobile.

Pour une antenne, de nombreuses bandes opérationnelles sont à couvrir suite à l'évolution des standards de communication. Elle est présente dans tous les systèmes de communication sans fil. Face à la croissance de divers standards tels que le GSM, DCS les nouvelles antennes doivent être capable de couvrir le maximum des bandes de fréquences correspondant à ces différents services en un minimum d'encombrement.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier et caractériser une antenne imprimée « patch ». La caractérisation de l'antenne se poursuit également par la détermination de ses paramètres hyperfréquences (fréquence de résonance, bande passante, diagramme de rayonnement et gain) à l'aide d'un logiciel de simulation électromagnétique HFSS (High fréquence structure simulator). Pour atteindre cet objectif, le présent travail est scindé en trois chapitres.

Chapitre I : Une vue générale sur les antennes est donnée, ainsi qu'une présentation de leurs caractéristiques et rôle.

Chapitre II : Il sera consacré à la description générale des antennes imprimées, leurs propriétés et leurs caractéristiques, un rappel théorique sur l'antenne imprimée, une présentation des différentes méthodes d'analyse et les différents techniques d'alimentation.

Chapitre III : Représente dans la première partie une description de l'environnement de l'outil de simulation HFSS utilisé dans ce travail qui est un logiciel de simulation 3D. La deuxième partie de ce chapitre est consacré à la modélisation, conception d'une antenne patch rectangulaire et ces résultats de simulation.

CHAPITRE I

Principes fondamental des antennes

I.1 Introduction

Depuis la découverte de l'onde hertzienne par Hertz, les techniques de l'information et de la communication à distance ont connues une évolution considérable « l'apparition de l'antenne ».

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou pour le capter. Le chapitre I de notre travail est destiné à présenter dans le cas général la description d'une antenne, ces caractéristiques, son principe de fonctionnement ainsi que les principaux types d'antennes employées pour les radiocommunications.

I.2 Historique [8] [9]

Il serait inutile de chercher à attribuer l'invention de l'antenne à un savant en particulier, mais on doit savoir que l'antenne est le résultat de l'accumulation de plusieurs recherches, auxquelles les scientifiques de plusieurs pays ont participé. Au début les chercheurs se sont intéressés beaucoup aux phénomènes électriques et magnétiques :

« Ampère » a remarqué qu'un courant électrique qui circule dans un fil dévie l'aiguille d'une boussole située à proximité.

« Faraday » a pu découvrir qu'un courant électrique circule dans un fil métallique refermé en boucle quand un aimant est approché ou éloigné de cette boucle.

Et c'est au physicien « James maxwell » et théoricien fondateur de l'électromagnétisme, d'unifier les divers observations et relations entre le champ magnétique et électrique pour formuler dans les années 1860/1865 les célèbres équations connues aujourd'hui sous le nom « équations de maxwell » qui ont été publiées ensuite en 1873.

En 1888 le physicien allemand « Heinrich Rudolf Hertz » a démontré l'existence physique des ondes électromagnétiques en construisant un appareil produisant des ondes radio a une fréquence de 1GHz. En suite les expériences de « marconi » dans les années 1890 ont prouvées qu'il est possible d'établir une liaison entre deux points de la terre par propagation d'ondes radioélectriques en espace libre, « marconi » fut le premier à utiliser le terme* **Antenne***.

I.3 Ondes électromagnétique

On commence par la définition d'une onde électromagnétique (OEM), les sources de ces ondes, le rayonnement de ces ondes et les paramètres qui les caractérisent.

I.3.1 Définition de l'OEM

L'onde électromagnétique est la résultante de deux champs : Le champ électrique \mathbf{E} et le champ magnétique \mathbf{H} . Ces deux champs dont les variations temporelles sont sinusoïdaux, se déplacent dans le vide à la vitesse de la lumière soit 300 000 Km/s. Ce sont des vibrations définies par un mouvement ondulatoire sinusoïdal représentées dans « la figure I-1 ». [8]

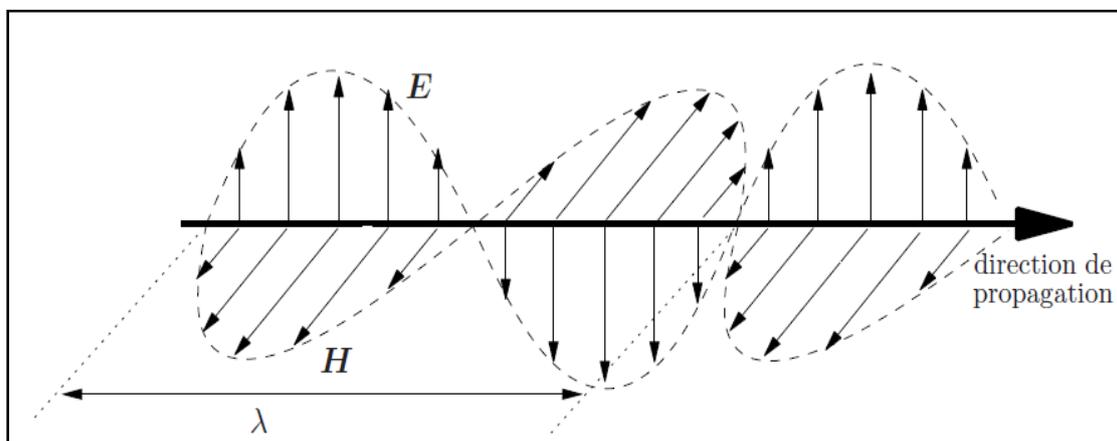


Figure I - 1: l'onde électromagnétique.

Toute charge et toute circulation de charge sont capables de créer des champs électriques et magnétiques autour d'eux et produire ainsi un rayonnement électromagnétique (création d'une onde électromagnétique qui se propage librement dans l'espace) [2]. Le physicien anglais « maxwell » a donné un cadre un peu plus mathématique à ses phénomènes en établissant ainsi les « équations de maxwell ».

Dans le cas général ces équations sont données par :

- Equation de Maxwell – Gauss : $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$ (1.1)

- Equation de Maxwell – Thompson : $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ (1.2)

- Equation de Maxwell – Faraday : $\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$ (1.3)

- Equation de Maxwell-Ampère : $\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \sigma \cdot \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ (1.4)

En combinant alors les équations (1.3) et (1.4) il est possible d'écrire deux équations différentiel dîtes équations de propagation dans le vide:

$$\vec{\nabla}^2 \cdot \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (1.5)$$

$$\vec{\nabla}^2 \cdot \vec{B} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = 0 \quad (1.6)$$

A noter que :

- ρ : densité volumique de charge.
- ε : permittivité électrique, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$: permittivité électrique dans le vide et ε_r permittivité relatif au milieu on a $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$
- μ : perméabilité magnétique, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$: perméabilité magnétique dans le vide et μ_r perméabilité magnétique relatif et on a $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
- σ : la conductivité électrique.

Ainsi l'onde se propage avec une célérité dans le vide: $C = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$

I.3.2 Les sources des OEM

Les ondes électromagnétiques sont émises par deux types de source à savoir : les sources naturelles et les sources artificielles.

- Les premières sont produites de façon naturelle dans l'environnement, par l'activité solaire (émission de la lumière) et atmosphérique (présence de charges électriques dans les nuages) et aussi les cellules vivantes (cœur et le cerveau).
- Les secondes sont produite par l'ensemble des appareils électriques qui génèrent des ondes électromagnétiques, (antenne de téléphone mobile, radio, émission TV, les appareils électroménagers et les dispositifs médicaux comme la radiologie). Les ondes émises par ces sources sont classées selon leur gamme de fréquences.

I.3.3 Les paramètre d'OEM

Les OEM sont caractérisées par certains paramètres liées entres eux il s'agit :

- **La longueur d'onde λ** : c'est la distance parcourue par l'onde au cours d'une période mesurée en mètre (m) et si on appelle C la célérité de l'onde et T sa période on a : $\lambda = C \cdot T = C/f$.
- **La fréquence** : qui est le nombre de longueur d'onde compris dans une seconde, mesuré en hertz (Hz).
- **La densité de puissance surfacique** : qui est les flux énergétique reçu par unité de surface s'exprime en watt /m² elle est donnée par la relation : $P = E^2/377$.

- **La polarisation de l'OEM** : c'est l'orientation du champ électrique E par rapport à l'horizontal, si E est parallèle à l'horizontale on dit que l'onde a une polarisation horizontale si le champ E est perpendiculaire alors la polarisation est verticale. Si la direction de E reste constante on dit que la polarisation est rectiligne (le cas le plus courant), si elle varie on aura deux mode circulaire ou elliptique. [9] « La figure I-2 » donne une représentation des différents types de polarisation.

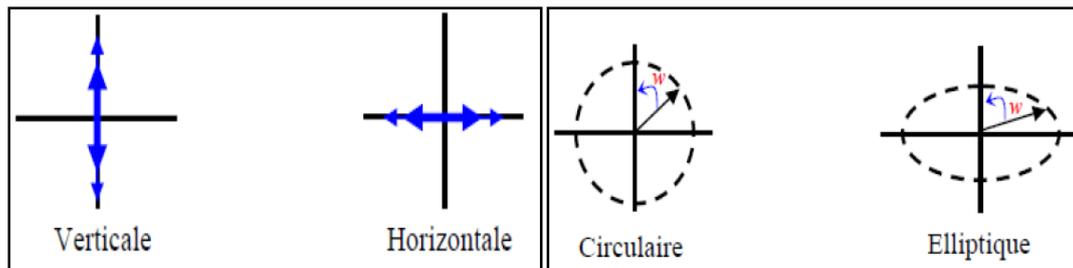


Figure I - 2: types de polarisation.

I.3.4 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique « figure I-3 » est la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence, ou bien de leur énergie. [10]

Les ondes **radioélectriques** ou ondes hertziennes sont des ondes électromagnétiques qui se propagent de deux façons :

- Dans l'espace libre (propagation rayonnée, autour de la terre par exemple)
- Dans des lignes (propagation guidée, dans un câble coaxial ou un guide d'onde)

Et leur domaine des fréquences s'étend de 9 KHz à 300 GHz. Ces ondes sont utilisées pour la transmission radio et télévision [14] et la propagation s'effectue de diverses manières :

- Par onde directe c'est-à-dire sans rencontré des obstacles naturelles (montagne, couches atmosphérique) ou artificielles (les immeubles).
- Par réflexion, lorsque l'onde rencontre un obstacle elle subira des réflexions c'est-à-dire elle est rayonnée dans une direction différente.

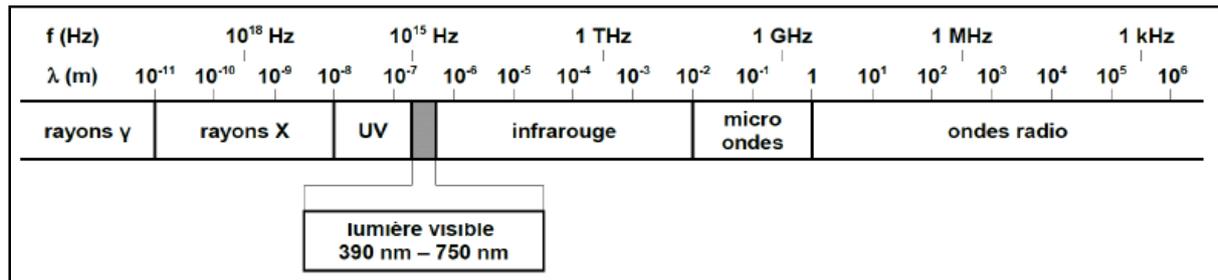


Figure I - 3: le spectre électromagnétique.

I.4 Les Antennes

Les antennes servent pour communiquer sur de grandes distances, car les communications sur petites distances sont moins coûteuses avec l'emploi de câbles ou de guides d'onde. [11]

En radioélectricité, une antenne est peut être définie comme un élément passif permettant le transfert de l'énergie électrique vers une énergie électromagnétique ou vice-versa.

L'antenne d'émission son rôle est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens c'est un transducteur.

L'antenne de réception de façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée.

Les antennes présentent une propriété connue sous le nom de **réciprocité** c'est-à-dire qu'une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes. On dit que son fonctionnement est réciproque. Du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait de différence entre le rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront pour les deux modes de fonctionnement. [12]

I.4.1 L'antenne isotrope

L'antenne isotrope est une référence théorique irréalisable, c'est une antenne fictive ponctuelle qui rayonne la même densité de puissance dans toutes les directions, elle ne sert que de référence à l'évaluation du gain [11]. Le rayonnement de cette antenne est donné dans « la figure I-4 ».

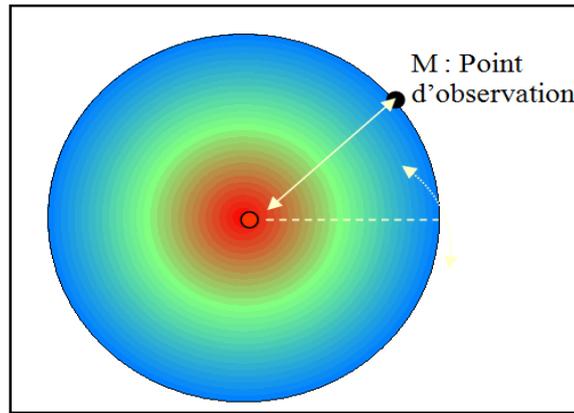


Figure I - 4: rayonnement d'une antenne isotrope.

I.4.2 Densité de puissance d'une antenne

Considérons une source de rayonnement électromagnétique, alimentée par une puissance P_a , rayonnant une onde électromagnétique traversant un élément de surface ds « Figure I-5 ».

On définit la densité de puissance par unité de surface au point M, distant de r par rapport à la source, par la relation suivante [1] :

$$P(r, \theta, \varphi) = \frac{P_a}{4.\pi.r^2} \text{ (Watt/m}^2\text{)} \quad (1.7)$$

La densité de puissance par unité d'angle solide $d\Omega$, qui est parfois appelée intensité de rayonnement est donnée par [2] :

$$P(r, \theta, \varphi) = \frac{P_a}{4.\pi} \text{ (Watt/stéradian)}$$

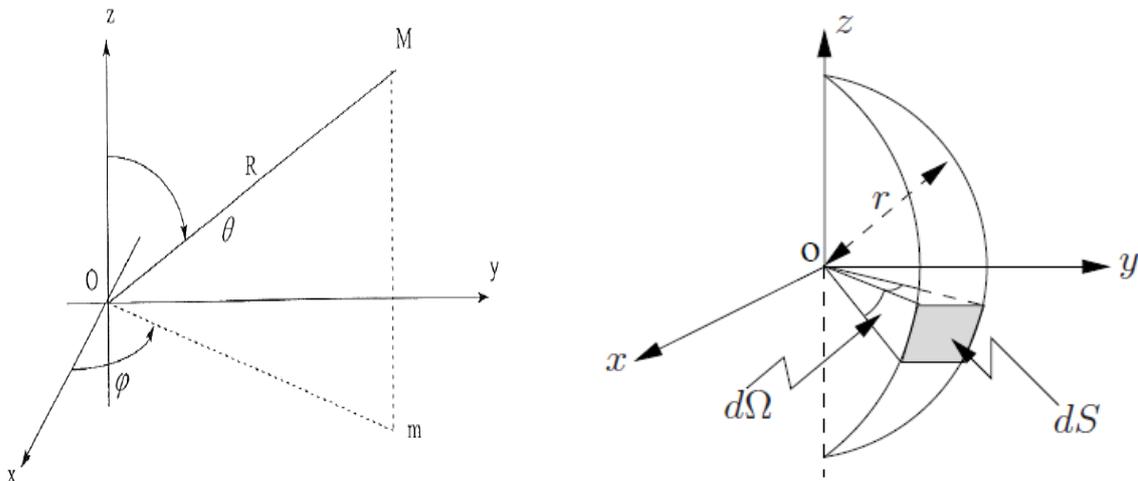


Figure I - 5: système de coordonnées de référence et notion d'angle solide.

Avec ; θ : angle d'élévation par rapport à l'horizontale ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$).

φ : azimut par rapport à l'axe des x ($0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$).

r : distance entre l'origine et le point d'observation.

I.4.3 Rôle des antennes

Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique transportée par une onde électromagnétique. « Figure I-6 »

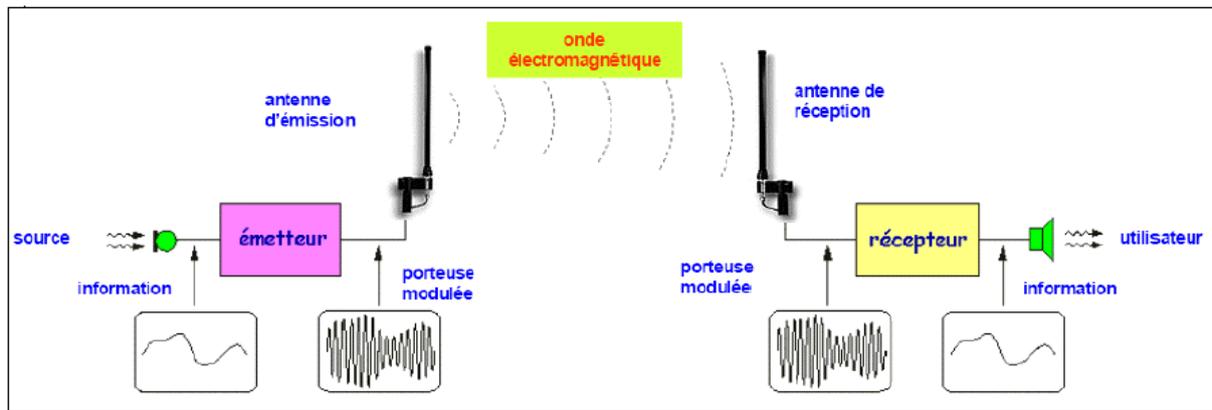


Figure I - 6: rôle d'une antenne.

L'antenne d'émission reçoit le signal électrique de l'émetteur et rayonne l'onde électromagnétique. Cette dernière se propage dans l'espace autour de l'antenne d'émission. En fonction du type et de la forme de l'antenne utilisée certaines directions de propagation peuvent être privilégiées. La puissance produite par l'émetteur est appliquée sur l'antenne et se propage dans l'espace, puis l'antenne de réception capte une faible partie de cette puissance et la transforme en signal électrique. Qui sera appliqué par la suite à l'entrée du récepteur qui en extrait l'information transmise.

I.5 Caractéristiques des antennes

Un grand nombre de paramètres permettent de classer les antennes tels que la directivité, le diagramme de rayonnement, la bande passante, la polarisation, etc.

Alors la performance d'une antenne peut être évaluée à partir de ses paramètres qui sont présentées ci-dessous

I.5.1 Diagramme de rayonnement

La représentation graphique de la fonction caractéristique de l'antenne porte le nom de « diagramme de rayonnement ». C'est la représentation du rayonnement en 2D ou 3D de la puissance, du gain ou du champ électrique rayonné.

En général, le diagramme de rayonnement est relevé dans deux plans qui sont : le **plan E** (plan vertical) et le **plan H** (plan horizontal) ceux sont respectivement les plans pour lesquels les champs électriques et magnétiques atteignent leurs valeurs maximales [13]. C'est un diagramme qui représente les variations de la puissance que rayonne l'antenne par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. En réalité l'énergie rayonnée est répartie inégalement dans l'espace certaines directions sont privilégiées ce sont les lobes de rayonnement.

Un type plus pratique est l'antenne directionnelle qui rayonne plus de puissance dans certaines directions et moins de puissance dans d'autres directions. Le diagramme de rayonnement de l'antenne directive est représenté dans la « Figure I-7 ».

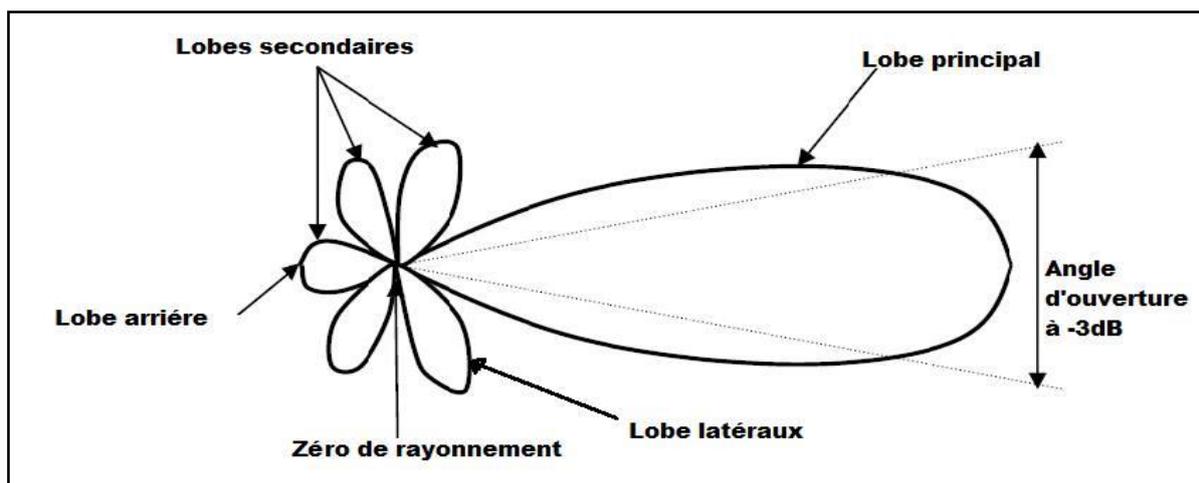


Figure I -7: diagramme de rayonnement d'une antenne directive.

- **Un lobe principal :** C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.
- **Un angle d'ouverture :** C'est l'angle de direction pour lequel la puissance rayonnée est la moitié de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable. Plus cet angle est étroit plus l'antenne est directive.
- **Des lobes secondaires :** Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables.
- **Un lobe arrière :** C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposé à 180° du lobe principal.

I.5.2 Directivité

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité est définie comme : le rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction de l'antenne par rapport à l'intensité de puissance que rayonnerait la source isotrope. Elle est donnée par la relation suivante [3] :

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P(\theta, \varphi)_{iso}} = \frac{P(\theta, \varphi)}{(P_r/4\pi)} \quad (1.8)$$

P_r : est la puissance totale rayonnée.

Une antenne qui a un lobe principal étroit à une meilleure directivité, que celui qui a un lobe principal large, donc elle est plus directive.

I.5.3 L'impédance d'entrée

Pour évaluer l'impédance d'une antenne, on considère une antenne à l'émission. L'antenne est équivalente à une charge à l'entrée de laquelle existent un courant I_{in} et une tension V_{in} [4]. Le rapport de ces deux quantités fournit l'impédance Z_{in} .

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_{in} + j X_{in} \quad (1.9)$$

Avec :

X_{in} : La partie réactive (réactance) de l'antenne, elle représente la puissance stockée dans les régions proches du champ rayonné.

R_{in} : La partie active est reliée aux champs (puissance) rayonnés et a puissance perdue par effet de joules. Elle est constituée de deux composantes, une résistance de rayonnement R_r et une résistance de perte R_p ($R_{in} = R_p + R_r$).

La puissance associée à la résistance R_r est la responsable de rayonnement de l'antenne, tandis que la puissance dissipée par la résistance R_p est perdue en chaleur dans l'antenne. [15][17]

I.5.4 Le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio)

Pour qu'une antenne fonctionne efficacement, le transfert maximum de puissance doit être entre l'émetteur et l'antenne. Ce transfert ne s'effectue pas s'il n'y a pas adaptation entre l'entrée de l'antenne et l'émetteur «Figure I-8». La puissance peut être transférée si l'impédance de l'émetteur est le complexe conjugué de l'impédance de l'antenne :

$$Z_{in} = Z_s^* \quad (1.10)$$

Avec l'impédance de sortie de l'émetteur:

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (1.11)$$

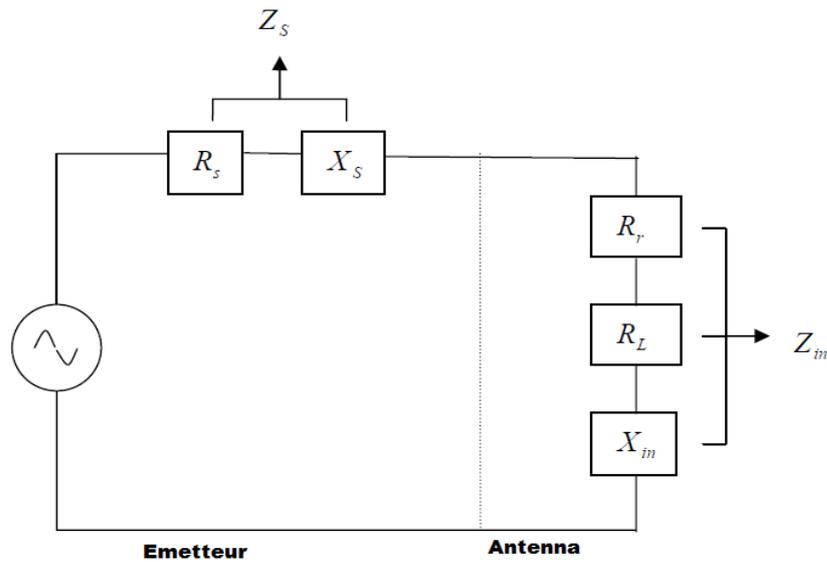


Figure I - 8: circuit équivalent d'une antenne en émission.

Si cette condition n'est pas satisfaite, et une partie de la puissance est réfléchie, cela conduit à la création d'ondes stationnaires, qui peut être caractérisé par un paramètre appelé le rapport d'ondes stationnaires (ROS) ou bien VSWR.

Le VSWR est donné par Markov par [5] :

$$VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (1.12)$$

Avec :

$$S_{11} = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{in} - Z_s}{Z_{in} + Z_s} \quad (1.13)$$

Avec ;

V_r : Amplitude de l'onde réfléchie.

V_i : Amplitude de l'onde incidente.

Le VSWR minimal correspondant à une bonne adaptation. Une bonne conception d'antenne doit avoir une impédance de 50Ω à 75Ω . [16][18]

I.5.5 Le coefficient de réflexion (S_{11}) (adaptation)

D'une manière générale, lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation ou rencontre une nouvelle interface, une partie de cette onde incidente est réfléchiée et l'autre partie est transmise dans le nouveau milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne se définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchiées. Pour une antenne d'impédance Z , reliée à la source par une ligne d'impédance caractéristique Z_s (souvent égale à 50Ω), le coefficient de réflexion peut être défini comme suit :

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_s}{Z_{in} + Z_s} \quad (1.14)$$

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

$$|S_{11}|_{dB} = 20 \log |S_{11}| \quad (1.15)$$

Le coefficient de réflexion permet de connaître la qualité d'adaptation d'une antenne. En effet, plus son module tend vers l'infini, plus l'antenne est adaptée. Souvent, la fréquence de résonance d'une antenne est celle où le coefficient de réflexion est minimal.

I.5.6 Le rendement

Le rendement est le rapport entre l'énergie rayonnée par une antenne et celle qui lui fournit l'alimentation. Il est exprimé par [4] :

$$\eta = \frac{R_r}{(R_r + R_p)} \quad (1.15)$$

Il est aussi exprimé par [7] :

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

I.5.7 La polarisation

La polarisation d'une antenne indique la direction de son champ électrique E (la direction de l'onde qu'elle rayonne ou qu'elle reçoit), il existe trois types de polarisation :

- **Polarisation linéaire** : La direction du vecteur champ électrique reste constante au cours du temps, sa trajectoire est donc un segment de droite. Un dipôle génère classiquement une "OEM" polarisée linéairement. Lorsque la polarisation de l'antenne est linéaire, le diagramme de rayonnement est celui d'un dipôle magnétique. [8]

- **Polarisation circulaire** : La polarisation est dite circulaire lorsque le vecteur champ E décrit un cercle avec le temps. Ce champ E a deux composantes de même amplitude et déphasées de 90° .
- **Polarisation elliptique** : La polarisation est dite elliptique lorsque le vecteur champ E décrit une ellipse dans le temps. Elle correspond au cas général d'un champ E comprenant deux composantes d'amplitudes différentes déphasées de $\pi/2$.

Certaines antennes ont une polarisation elliptique ou circulaire. Si la polarisation de l'antenne n'est pas adaptée à la polarisation de l'onde le signal subit un affaiblissement pouvant aller jusqu'à l'infini.

I.5.8 Le gain

Le gain d'une antenne dans une direction donnée est la quantité descriptive de la performance de l'antenne, c'est la quantité d'énergie rayonnée dans cette direction comparée à l'énergie qu'une antenne isotrope rayonnerait dans la même direction avec la même puissance d'entrée. Le rapport de gain est donné par :

$$G_{\text{ain}} = P(\theta, \varphi) / (P_a / 4\pi) \quad (1.16)$$

Le gain est lié à la directivité, il définit l'augmentation de la puissance émise ou reçue dans le lobe principal, il est dû au fait que l'énergie est focalisée dans une seule direction, il est exprimé en dBi (décibels par rapport à l'antenne isotrope) [6].

$$G_{\text{ain}} = \eta D \quad (1.17)$$

Pour avoir un gain important, l'antenne doit avoir un diagramme de rayonnement directif et réciproquement.

I.5.9 La bande passante (BP)

La bande passante d'une antenne peut être définie comme étant la gamme des fréquences utile, en laquelle l'antenne possède des capacités optimales pour émettre ou recevoir l'énergie électromagnétique correspondante dans l'espace environnement.

La valeur des limites sur les critères de fonctionnement de l'antenne définit un domaine de fréquences situées entre une valeur minimale f_{min} et une valeur maximale f_{max} . La bande passante est donnée par [20] [21] :

$$BP(\%) = \left[\frac{f_{\text{min}} - f_{\text{max}}}{f_c} \right] \cdot 100 \quad (1.18)$$

Avec f_c est la fréquence centrale ou de résonance.

Une méthode pour juger l'efficacité de l'antenne qui fonctionne sur toute la gamme de fréquence est la mesure de VSWR. Un $VSWR < 2$ ($S_{11} < -9.5$ dB) assure une bonne performance. Une méthode pour mesurer la bande passante d'une antenne est représentée sur « la figure I-9 ».

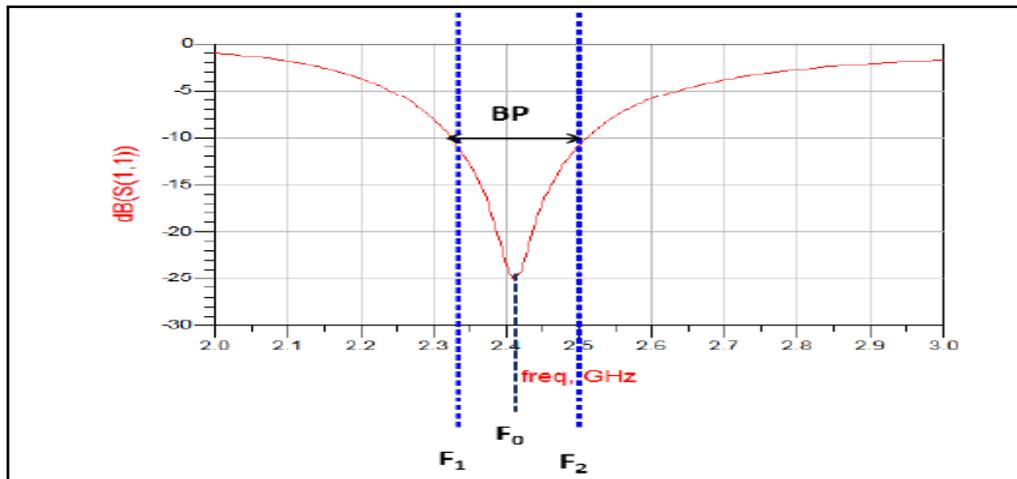


Figure I - 9: mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion.

I.5.10 La forme et les dimensions

La forme et les dimensions de l'antenne varient selon le besoin celle d'un téléphone portable est parfois invisible elle se trouve à l'intérieur du boîtier, par contre l'antenne parabolique a des dimensions importantes, en générale les dimensions d'une antenne seront d'autant plus grandes que son gain sera élevé et son lobe principale plus étroit.

I.6 Types des antennes

Une antenne peut émettre dans toutes les directions (antenne omnidirectionnelle) ou dans une seule direction définie (antenne directionnelle), et dans ces deux catégories les types d'antenne sont multiples et diversifiées mais peuvent être regroupées en famille comme suite :

I.6.1 Antennes élémentaires

Plus simple et moins chère ce genre d'antenne ne permettent qu'une polarisation linéaire dans cette catégorie, on peut citer : antennes isotrope, antennes dipolaires ou doublet demi-onde qui est constitué d'un élément conducteur de longueur égale à la demi longueur d'onde, et antennes monopoles constitué d'un élément conducteur de longueur égale au quart de la longueur d'onde.

I.6.2 Antennes en réseau

C'est un ensemble d'antennes élémentaires à une ou deux dimensions, augmentant ainsi le gain et la directivité. Alimenté de façon synchrone (le déphasage du courant entre deux paires d'antenne est fixe) [1]. Dans cette famille nous énumérons : les antennes YAGI-Uda utilisées pour la réception de la télévision analogique ou numérique terrestre, les antennes rideau (collinaires), les antennes cierges (constitué de plusieurs dipôles demi-onde alimenté de façon à rayonner en phase) et les antennes hybrides.

I.6.3 Antennes à réflecteurs

En hyperfréquence, certaines antennes peuvent utiliser des montages similaires à l'optique avec des réflecteurs plans ou paraboliques. Il s'agit d'antennes à réflecteurs. On peut citer l'antenne parabolique qui est la plus connue pour son usage en télévision satellitaire, elle a un gain élevé lié au diamètre du réflecteur et elle est très directive.

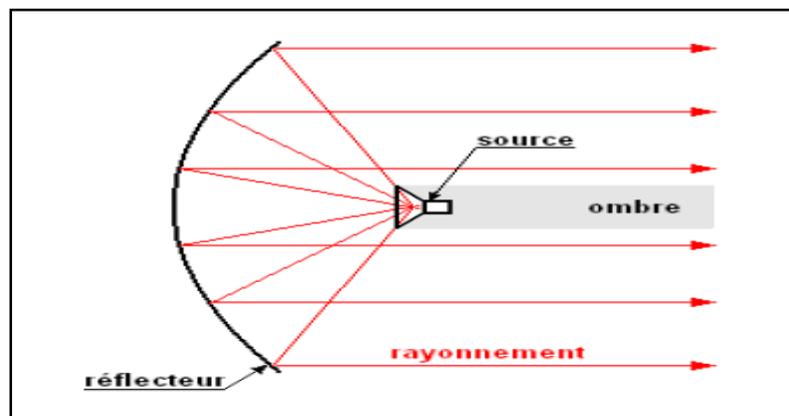


Figure I - 10: réflecteur parabolique.

I.6.4 Antenne pour guide d'onde

L'antenne cornet utilisée en hyperfréquence est une ouverture rayonnante excitée par un guide ou un monopôle, elle est très directive et possède un gain élevé. On trouve aussi les antennes à fente constituées par les réseaux des fentes rayonnantes qui sont des réseaux de dipôles ouvert sur un guide elle est très facile à réaliser, elle devient de plus en plus utilisée surtout dans le domaine des radars utilisé pour la surveillance maritime.

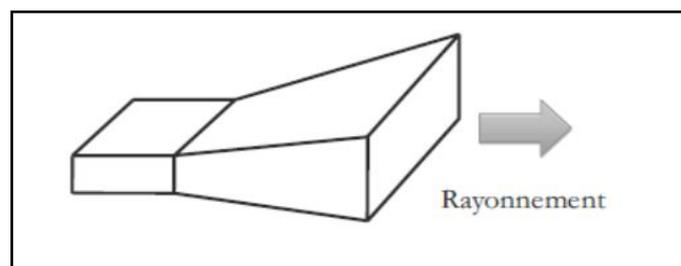


Figure I - 12: antenne cornet.

I.6.5 Antennes imprimées (micro-ruban)

L'antenne imprimée, appelée aussi antenne patch est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents. Elle est constituée d'un diélectrique (substrat), possédant un plan de masse métallique sur une face. Sur l'autre face une gravure métallique permet de supporter des courants de surface (plaque) qui créent le rayonnement électromagnétique « Figure I-12 ». Les courants sont amenés de générateur à l'entrée par une ligne micro ruban.

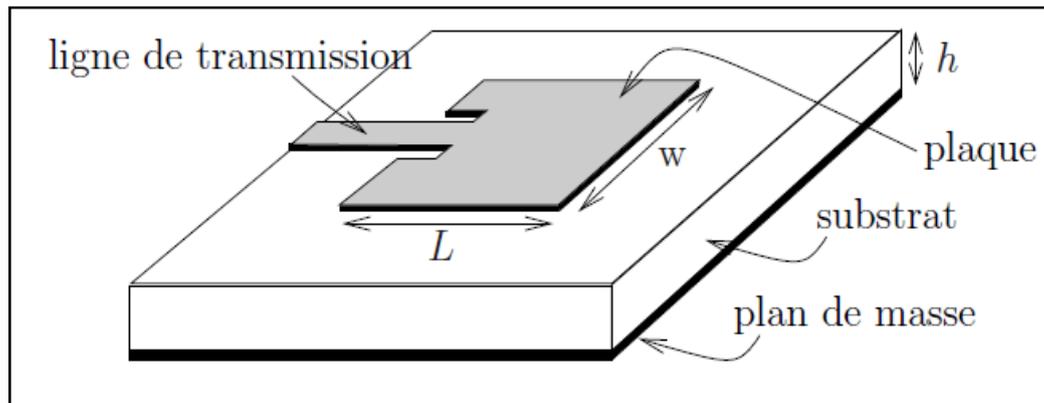


Figure I - 32: aspect d'une antenne micro-ruban rectangulaire.

I.7 Conclusion

La maîtrise de la théorie des antennes est plus que nécessaire, elle nous permet de comprendre leur comportement à des différentes gammes de fréquences. Car pour toute application, il faut choisir des caractéristiques bien conformes au standard spécifique.

Dans ce chapitre nous avons dressé un état de l'art sur les antennes : le rôle des antennes, le rayonnement des antennes. Puis on a présenté les différents paramètres des antennes en suite on a donné un bref aperçu sur quelques types d'antennes.

Après ce passage, on présente l'antenne imprimée qu'on détaillera dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

Généralités sur les antennes imprimées « Antenne Patch »

II.1 Introduction

De nos jours, l'industrie des télécommunications porte un grand intérêt à la miniaturisation des circuits et composants électroniques. En ce qui concerne les objets communicants cet effort se concentre notamment sur l'antenne qui est généralement l'un des éléments les plus encombrants du système. Les terminaux actuels doivent ainsi être capables de fonctionner dans les trois bande traditionnelle utilisées en téléphonie mobile (GSM 900 ; DCS1800 ; PCS1900). Les systèmes micro-ondes à structure micro-ruban ont été à l'origine du développement des antennes imprimées qui sont les plus souvent utilisées en réseaux afin d'améliorer leur performances et de permettre la réalisation des fonctions très particulières.

Le concept des antennes **imprimées** (antennes **micro-ruban** aussi connues sous l'appellation anglaise **patch antenna**) est apparu dans les années 1950. Le véritable développement ne s'est fait que dans les années 1970, en faisant apparaître les premières réalisations qui seront essentiellement réservées à des applications militaires [26] [27].

La technologie actuelle qui vise de plus en plus la miniaturisation des composants a permis de mettre en évidence l'importance et l'utilité des antennes imprimées dans la radiocommunication.

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu la description de la structure simplifiée des antennes imprimées (antennes patch), leurs avantages et limitations, leurs caractéristiques, en suite on se penche sur les différents types d'alimentation et les méthodes d'analyse de ces antennes et on clôture le chapitre par bref aperçu de leurs domaines d'application.

II.2 Historique

L'idée d'un élément rayonnant à micro-ruban date de 1950. Il a été proposé par Deschamps. Quelques années plus tard en France Gutton et Baissinot ont breveté une antenne à base micro-ruban, à cause du manque des bons substrats la recherche a stagné pour une période de 15 ans. Mais le besoin d'une antenne mince pour l'industrie militaire et spatiale a réanimé le développement des antennes imprimées au début des années 1970. La structure planaire qui est constituée d'une plaque conductrice gravée sur un substrat diélectrique qui repose sur un plan de masse a été décrite par Byron, un peu plus tard Munson a réalisé la première antenne micro-ruban. En 1979 un colloque sur les antennes tenu au Mexique lance un intérêt international pour les antennes micro-ruban, plusieurs articles ont été proposés dans

cette réunion. L'un des premiers livres qui définit les caractéristiques des antennes micro-ruban a été écrit par Bahl et Bhartia. [36][37][38][23]

II.3 Description d'une antenne imprimée ou "patch"

Une antenne à éléments rayonnants imprimés « figure II-1 », communément appelée antenne patch est une ligne micro-ruban (microstrip) de forme particulière. Elle effectue ainsi deux fonctions fondamentales qui définissent le principe d'antenne de manière générale, il s'agit bien du rayonnement (émission) et de la réception d'une onde électromagnétique. Elle se compose de :

- **Le plan de masse (ground plane)** est une surface conductrice (cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat. Elle permet de faire rayonner la partie supérieure.
- **Un substrat diélectrique (dielectric substrat)** composé d'un matériau isolant, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde et de permittivité relative ($2,2 < \epsilon_r < 12$). Il est utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne et réduire les pertes par effet de joule et améliorer la bande passante de l'antenne. Parfois, il est préférable d'utiliser des substrats diélectriques d'épaisseur importante et de faible permittivité pour avoir une grande efficacité et une large bande passante.
- **L'élément rayonnant (patch)** est une partie métallique de forme et de taille à définir selon l'application, à géométrie variable (circulaire, rectangulaire, triangulaire ...etc.). Il doit être relié au reste du circuit par une ligne de transmission (micro-ruban) qui doit être adaptée d'impédance à l'antenne et au reste du circuit afin d'éviter le phénomène de réflexion. Dans la pratique, le rectangle et le disque représentent les formes de l'élément rayonnant les plus utilisées. Il est constitué d'une partie conductrice qui va rayonner. La forme et les dimensions conditionnent la fréquence de fonctionnement de l'antenne. [22]

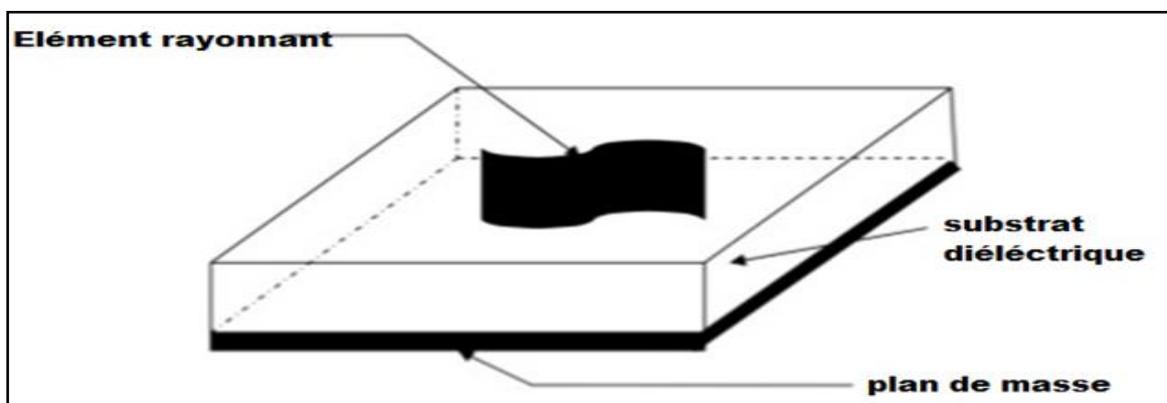


Figure II - 1: structure d'une antenne imprimée.

L'élément rayonnant de l'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carrée, circulaire ou simplement un dipôle de dimension d'ordre de demi longueur d'onde ($\lambda/2$). Les formes suivantes « Figure II-2 » sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant.

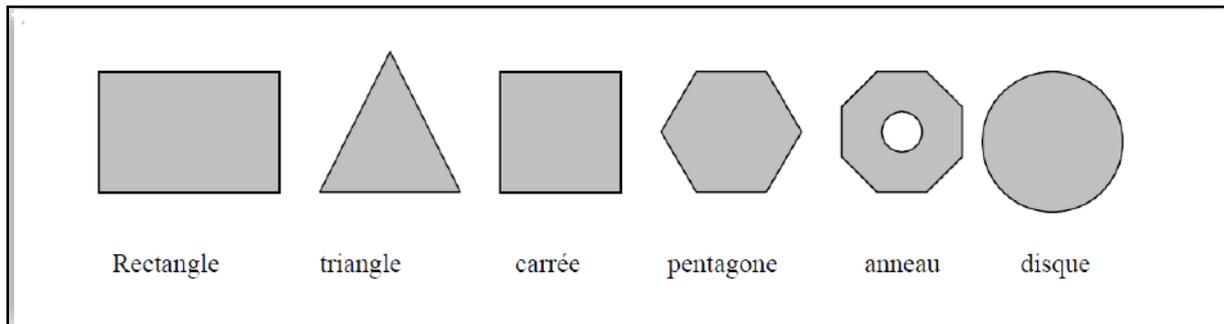


Figure II - 2: différentes formes d'élément rayonnant.

Parmi toutes les formes des éléments rayonnants, le rectangle est le plus facile à appréhender pour la compréhension des mécanismes de rayonnement des antennes patch.

Les antennes imprimées possèdent comme on a déjà souligné une facilité d'intégration et elles sont largement utilisées, leur applications couvrent un large domaine de fréquences (100 MHz à 100 GHz), elles ont beaucoup d'avantages parmi eux :

- ✓ Faible poids, masse, épaisseur, et volume.
- ✓ Possibilité d'être intégrées dans des appareils électroniques transportable.
- ✓ Faible cout et facilité de fabrication.
- ✓ Capables d'émettre à deux ou trois fréquences.
- ✓ Simples, robustes, et moins encombrantes et adaptables aux surfaces planes et non planes. [23] [24]

Néanmoins ces antennes présentent des limitations à savoir :

- ✓ Faible rendement, puissance d'émission ($<100W$) et un faible gain (6 dB).
- ✓ Facteur de qualité Q trop élevé (50 jusqu'à 75) et bande passante étroite (de 1 à 5 %).
- ✓ Faible pureté de polarisation.
- ✓ Pertes de rayonnement par onde de surfaces dans le substrat diélectrique.

Donc la conception des antennes doit répondre à des compromis en termes de performance et de complexité de réalisation. [25]

Les antennes patch ont un facteur de qualité (Q) très élevé. Q représente les pertes lié à l'antenne et un grand facteur de qualité mène à une largeur de bande étroite et un faible

rendement. Le facteur de qualité peut être réduit en augmentant l'épaisseur du substrat diélectrique. [28]

II.4 Les caractéristiques des antennes "patch"

II.4.1 Mécanisme de rayonnement d'un "patch"

Le mécanisme de rayonnement d'une antenne patch s'effectue à partir de sa forme géométrique. Lorsqu'on excite la ligne d'alimentation avec une source RF, une onde électromagnétique va se propager sur cette ligne, puis attaque l'élément rayonnant (de largeur plus grande que la ligne, donc plus apte à rayonner). Une distribution de charge « figure II-3 » va se s'établir à l'interface substrat /plan de masse, sur et sous l'élément rayonnant, et crée un champ électrique vertical « figure II-4 » entre le patch et le plan de masse ce qui va provoquer :

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

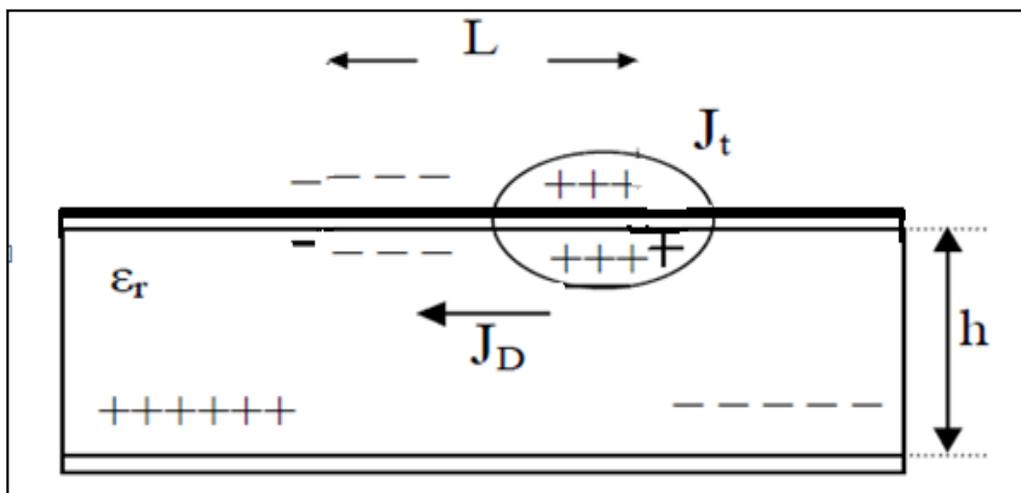


Figure II - 3: distribution de charge et de densité de courant.

Avec : J_D courant de déplacement ; J_t Courant de surface.

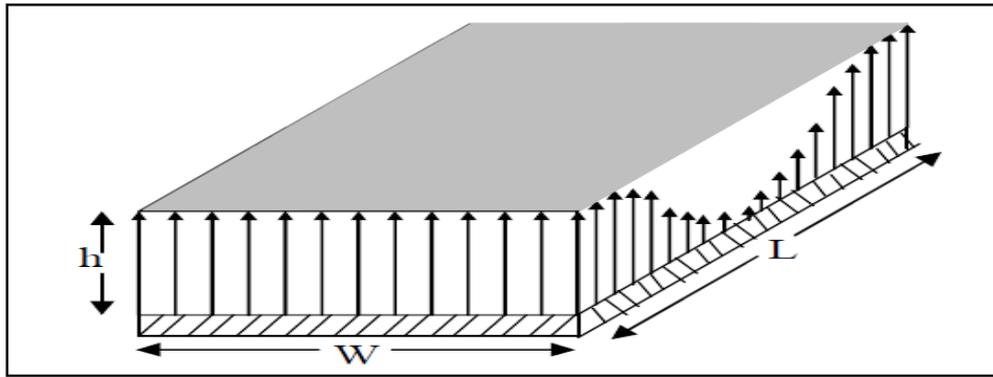


Figure II - 4: distribution du champ électrique vertical.

II.4.2 Polarisation de l'antenne "patch"

La polarisation d'une antenne est déterminée par celle de l'onde radiée dans une direction donnée, elle est identique à la direction du champ électrique c'est-à-dire à celle des brins rayonnant de l'antenne. Si le plan E (électrique) est parallèle au vecteur E de l'onde émise, on parle de polarisation verticale si le plan E est perpendiculaire au sol, s'il est parallèle au sol on parle de polarisation horizontale. Aussi le vecteur du champ électrique instantané trace dans le temps une figure, la figure est généralement une ellipse. Si le chemin du vecteur de champ électrique suit une ligne l'antenne est dite linéairement polarisée. Si le vecteur de champ électrique tourne selon un cercle on dit a polarisation circulaire. [29]

II.4.3 Bande passante de l'antenne "patch"

La bande passante d'une antenne patch est définie comme la gamme de fréquence pour laquelle le patch est adapté a sa ligne d'alimentation, elle est relativement faible. Pour accroître la bande passante il est possible d'augmenter l'épaisseur du substrat. Elle est donnée par la relation :

$$BP (\%) = [(f_{r2} - f_{r1}) / f_r] \cdot 100 \quad (2.1)$$

Avec f_r la fréquence à la résonance, f_{r1} et f_{r2} les deux fréquences minimale et maximale.

D'autres paramètres sont considérées pour la caractérisation des antennes imprimées comme la directivité qui caractérise la concentration du rayonnement dans une direction donnée, le coefficient de réflexion (S_{11}) sur ce que l'on se base lors de l'optimisation, ou bien encor le gin, l'impédance d'entrée et le rendement.

II.5 Alimentation des antennes "patch"

Un problème récurrent dans la conception des antennes patch concerne le choix de la technique d'excitation. L'énergie est fournie à l'élément rayonnant de manière à influencer

directement sur son rayonnement et modifier ces performances. L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif.

Les techniques d'alimentation des antennes imprimées peuvent être classées en deux catégories :

- ✓ Alimentation par contacte (par sonde ou ligne micro-ruban).
- ✓ Alimentation par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou par fente).

II.5.1 Alimentation par ligne micro-ruban

L'alimentation peut se faire par connexion directe avec une ligne micro-ruban « figure II-5 », (généralement de 50Ω), [30] c'est-à-dire en reliant cette ligne au patch rayonnant tel que la largeur de la ligne est petite par rapport à celle du patch rayonnant. Ce genre d'alimentation a l'avantage qu'elle peut être gravée sur le même substrat pour fournir une structure planaire ; Il existe cependant un inconvénient dans ce type d'alimentation vu qu'elle génère un rayonnement parasite. Cette technique est facile à réaliser, simple à modéliser et facilite l'adaptation d'impédance.

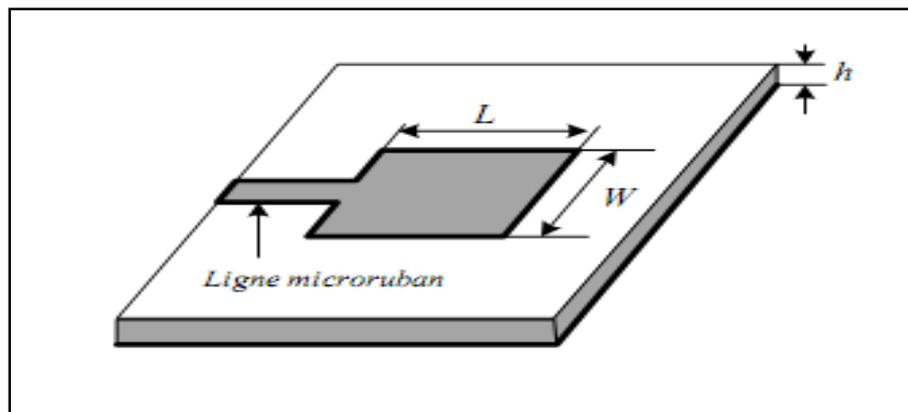


Figure II - 5: alimentation par ligne micro-ruban.

On trouve trois cas illustrés sur la figure (II-6) :

- Le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément (a).
- Le point de jonction est décalé par rapport à cet axe et cela permet une meilleure adaptation d'impédance (b).
- Alimentation axiale avec une encoche (c).

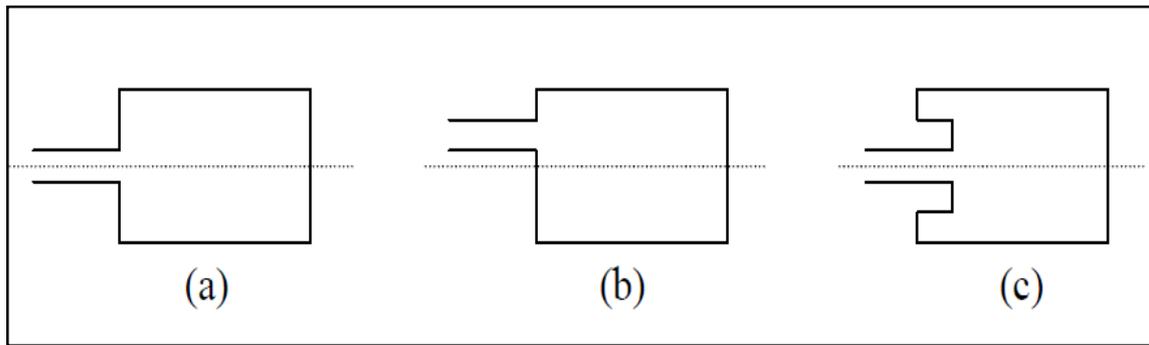


Figure II-6: alimentation par ligne micro-ruban (a) axiale (b) décalée (c) axiale avec encoche.

Dont le premier (a) et deuxième (b) cas permettent une meilleure adaptation d'impédance et l'alimentation axiale avec encoche donne de bons résultats concernant l'adaptation, elle est très utilisée dans les réseaux d'antennes imprimées.

II.5.2 Alimentation coaxiale

Dans ce cas l'élément rayonnant est connecté au conducteur intérieur du connecteur coaxial traversant le diélectrique, tandis que le conducteur externe est soudé directement au plan de masse « Figure II-7 ».

L'avantage principal de ce type d'alimentation est qu'elle peut être appliquée à n'importe quel endroit désiré du patch afin d'assurer l'adaptation d'impédance, cependant cette méthode présente des inconvénients au niveau du diagramme du rayonnement. En effet, la connexion génère un pic de courant localisé au niveau de l'élément rayonnant qui peut induire une dissymétrie dans le diagramme du rayonnement, de plus des pertes apparaissent avec les perçages du plan de masse ainsi que de l'élément plaqué. [31]

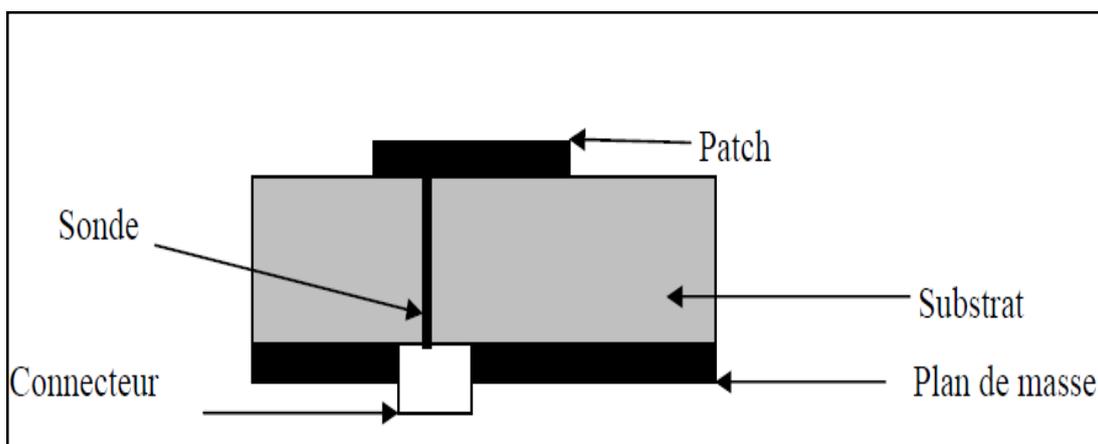


Figure II - 7: alimentation coaxiale.

Le circuit équivalent, des deux types d'alimentation, est formé d'un réseau parallèle RLC qui représente la pièce métallique (patch) rayonnante résonnante et un inducteur série représentant l'inductance de la sonde coaxiale d'alimentation ou de la ligne d'alimentation micro-ruban « Figure II-8 ». [43]

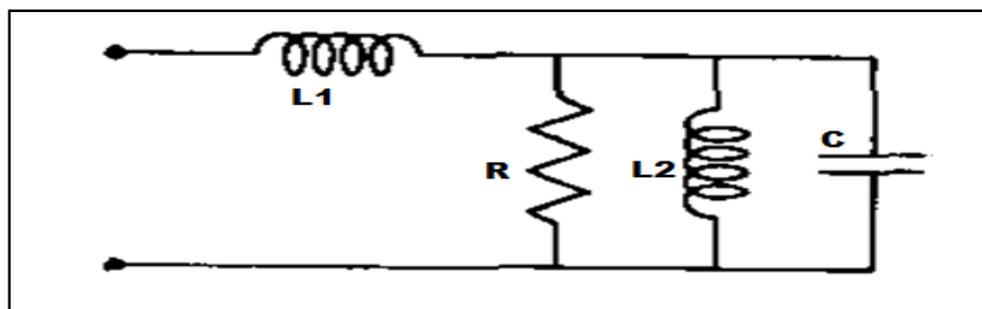


Figure II - 8: le circuit équivalent d'une antenne patch.

De telles méthodes d'alimentation entrant en contact direct, ont l'avantage de la simplicité, mais elles ont également plusieurs inconvénients. L'augmentation, par exemple, de l'épaisseur du substrat dans le but d'augmenter la largeur de la bande passante, mène à une augmentation des faux rayonnements d'alimentation et une augmentation de la puissance d'onde surfacique [32]. Pour ces raisons et d'autres, de telles antennes sont ainsi limitées dans la largeur de bande. Ces deux méthodes d'alimentation offrent essentiellement un degré de liberté dans la conception par le choix de positionnement du point d'alimentation afin d'ajuster le niveau d'impédance d'entrée.

Ces dernières années, une variété d'alimentations sans contact direct ont été développées pour les antennes micro-rubans, d'où la nécessité de détailler deux de ces types:

II.5.3 Alimentation couplée par proximité

Ce type d'alimentation est représenté sur la « figure II-9 », deux substrats diélectriques sont employés tels que la ligne d'alimentation est entre les deux substrats et le patch de rayonnement est sur le substrat supérieur.

L'avantage principal de cette technique d'alimentation est l'élimination du rayonnement parasite et l'obtention d'une bande passante plus large et cela par l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne, la distance entre la ligne d'alimentation et le patch peut être utilisé pour adapter l'impédance de l'antenne. Parmi les inconvénients de cette méthode d'alimentation nous citons la difficulté de fabrication à cause des deux couches diélectriques nécessitant un alignement approprié, ainsi que la difficulté d'intégration de dispositifs actifs. L'adaptation est réalisée en contrôlant la longueur de la ligne d'alimentation.

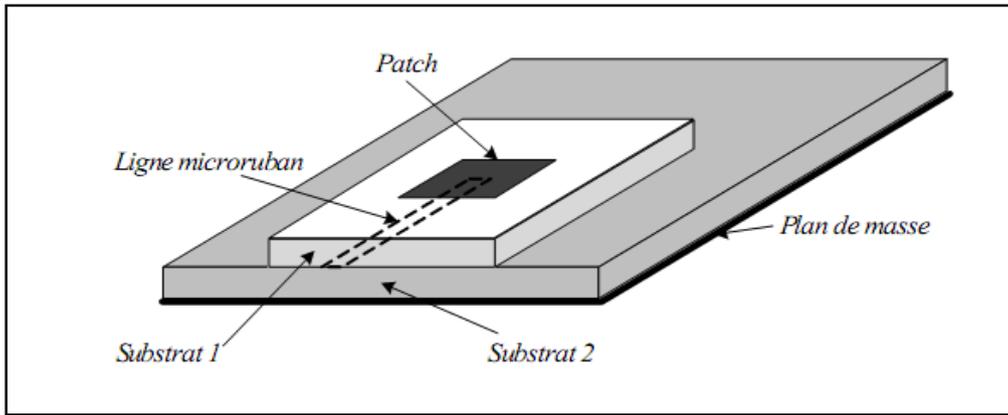


Figure II - 9: alimentation couplée par proximité.

La nature capacitive de cette méthode d'accouplement est reflétée dans le fait que le circuit équivalent, montré dans « la figure II-10 » à un condensateur en série avec le résonateur parallèle RLC qui représente le patch. [43] [44]

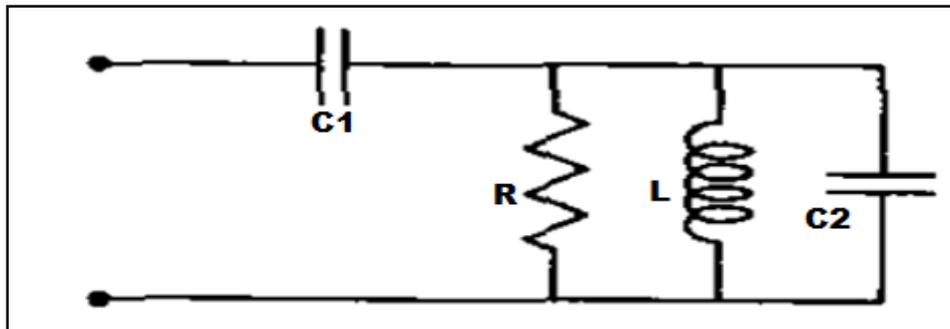


Figure II - 10: circuit équivalent d'un patch alimenté par proximité.

II.5.4 Alimentation couplée par ouverture

Dans ce type d'alimentation illustré dans la « figure II-11 » la pièce rayonnante et la ligne d'alimentation sont séparées par le plan de masse, L'élément rayonnant est gravé sur le sommet du substrat d'antenne (substrat 1), et la ligne d'alimentation est gravée sur le fond (bas) du substrat d'alimentation (substrat 2). Le couplage entre le patch et la ligne d'alimentation est donc assuré par une fente (ouverture) dans le plan de masse, centrée sous le patch.

Généralement, un matériau ayant une constante diélectrique élevée est employé pour le substrat inférieur, alors qu'un matériau épais ayant une constante diélectrique faible est employé pour le substrat supérieur afin d'optimiser le rayonnement du patch [26].

L'avantage principal de cette technique est la réduction des rayonnements indésirables qui est due à la séparation entre le patch et la ligne d'alimentation par le plan

de masse. Cependant son l'inconvénient majeur est qu'elle présente des difficultés au niveau de la fabrication en raison des couches multiples et fournit aussi une largeur de bande étroite.

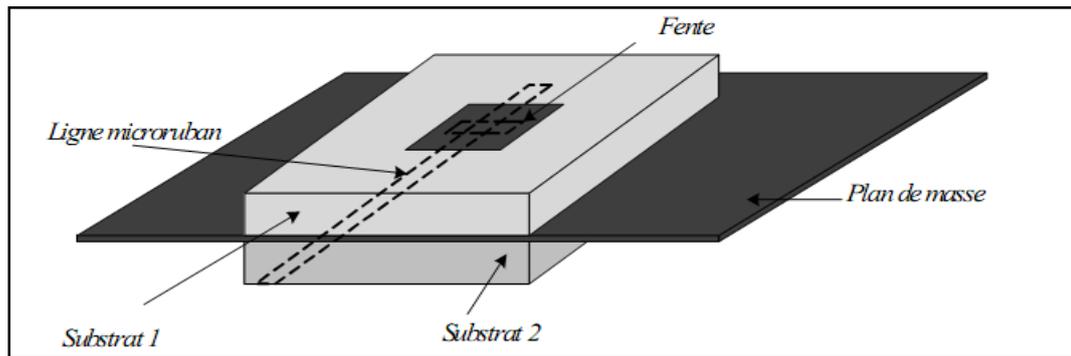


Figure II - 11: alimentation couplée par ouverture.

Le circuit équivalent d'une antenne couplée par ouverture est représenté par la « figure II- 12 » suivante [43]:

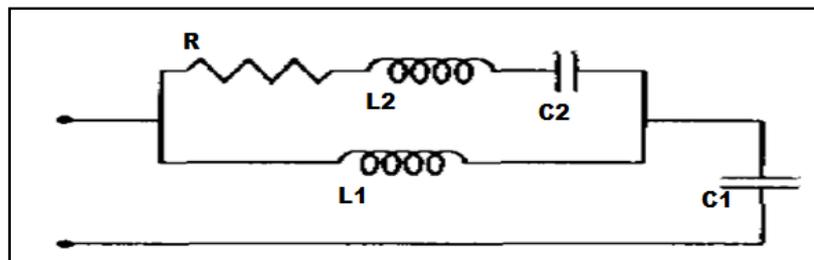


Figure II - 12: circuit équivalent d'une antenne couplée par ouverture.

Et le tableau (II-1) suivant récapitule les caractéristiques des différentes techniques d'alimentation :

Caractéristiques	Alimentation par ligne micro-ruban	Alimentation par câble coaxial	Alimentation par couplage de proximité
Rayonnement parasite d'alimentation	Plus	Plus	Minimum
Fiabilité	Meilleure	Bonne	Fiable à cause de la soudure
Facilité de fabrication	Facile	Nécessite une soudure et un perçage	Nécessité d'alignement
Adaptation d'impédance	Facile	Facile	Facile
Bande passante	2-5 %	2-5 %	13%

Tableau (II-1) : caractéristiques de différentes techniques d'alimentation. [31]

Une comparaison entre l'alimentation avec contact (ligne micro-ruban et câble coaxial) et l'alimentation sans contact (couplage par proximité ou par ouverture) se résume dans le tableau (II-2) suivant :

Méthode		Avantages	Inconvénients
Alimentation avec contact	Câble coaxial	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de pertes de rayonnement de ligne. - sélection possible d'un mode privilégié. - obtention d'une impédance d'entrée adéquate par positionnement de la sonde. - prédiction aisée de l'impédance d'entrée pour des substrats de faible hauteur. - Technique de perçage simple jusqu'à 10GHz. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dans le cas de substrat épais, la réactance inductive supplémentaire apportée par la sonde affecte de la bande passante. - technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique. - la difficulté d'excitations de chaque élément d'un réseau seul.
	Ligne micro-ruban	<ul style="list-style-type: none"> - procédé technologique le plus simple par gravure sur la même face de l'antenne et du circuit d'alimentation. - adaptation de l'aérien possible par contact pénétrant. 	<ul style="list-style-type: none"> - rayonnement parasite de la discontinuité ligne-aérienne. - rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétriques. - structure figée après gravure.
Alimentation sans contact	Par couplage	<ul style="list-style-type: none"> - dessin du circuit modifiable par aux aériens. - bande passante plus large par augmentation de la hauteur. 	<ul style="list-style-type: none"> - deux couches du substrat requises. - difficulté pour l'intégration des dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur.

Tableau (II-2) : avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentation. [31]

II.6 Méthodes d'analyse

Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'analyse des antennes imprimées. Elles peuvent être classées dans une des deux catégories : méthodes analytiques (approximatives) et méthodes numériques (rigoureuses). [39]

Les méthodes approximatives sont basées sur des hypothèses simplificatrices donc elles ont des limitations et elles fournissent des solutions moins précises, elles sont généralement utilisées pour la modélisation des antennes à élément unique à cause de la difficulté rencontrée dans la modélisation du couplage entre les différents éléments.

Cependant elles offrent un bon aperçu physique avec un temps de calcul généralement très petit. [40]

Les méthodes numériques dites aussi rigoureuses tiennent compte de tous les mécanismes importants de l'onde et s'appuient énormément sur l'utilisation d'algorithmes numériques efficaces. Ces méthodes sont plus précises elles peuvent être employées pour des modélisations d'une variété d'antennes y compris les antennes réseaux et elles ont tendance à être plus complexes et fournissent moins d'aperçu physique. Souvent elles nécessitent plus de calculs donc un temps de calculs plus élevé. [40]

II.6.1 Méthodes analytiques (approximatives)

Ces méthodes sont basées sur la distribution du courant magnétique du patch, les principes de cette catégorie sont le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité.

II.6.1.1 Modèle de la ligne de transmission

Le traitement théorique basé sur le modèle de la ligne de transmission (MLT) était le premier et le plus simple modèle utilisé pour l'analyse et la synthèse des antennes micro-rubans. Dans ce modèle l'élément rayonnant est vu comme un prolongement d'une ligne de transmission, ce modèle est utilisé pour les antennes Patch rectangulaires [34] [35]. La « figure II-13 » représente l'antenne patch rectangulaire par deux fentes de largeur « W » et de hauteur « h » séparée par une ligne de transmission de longueur « L ». le micro-ruban est essentiellement une ligne non homogène de deux diélectriques, généralement le substrat et l'air.

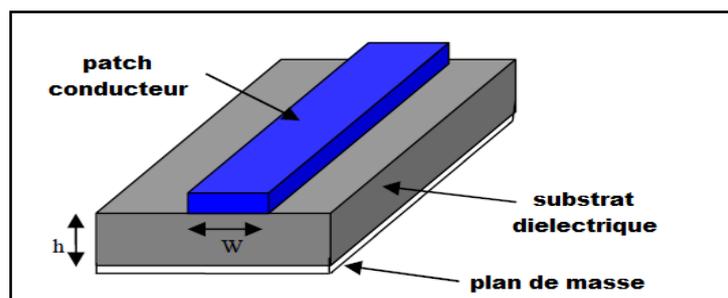


Figure II - 13: ligne micro-ruban.

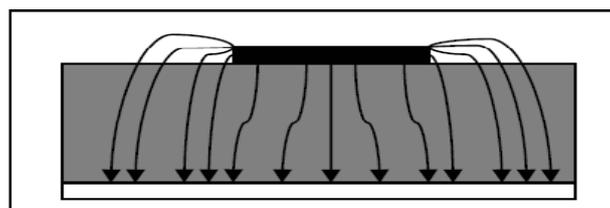


Figure II - 14: lignes de champ électrique.

A partir de la « figure II-14 » on voit que la plupart des lignes de champ électrique résident dans le substrat et dans quelque partie de l'air.

Par la suite cette ligne de transmission ne peut pas soutenir le mode de transmission **TEM** étant donné que les vitesses de phase seraient différentes dans l'air et le substrat

Au lieu de cela le mode de transmission dominant serait le mode **quasi-TEM**. Par conséquent une constante diélectrique efficace (ϵ_{reff}) doit être obtenue afin d'expliquer la propagation des ondes frangeantes dans la ligne.

La valeur de (ϵ_{reff}) est légèrement inférieur de (ϵ_r) par ce que les champs frangeants (marginiaux) autour de la périphérie de l'élément rayonnant ne sont pas confinés dans le substrat diélectrique mais sont aussi étendus dans l'air. « Figure II-14 »

L'expression de (ϵ_{reff}) est donnée par : [26]

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2.2)$$

Avec :

- ϵ_{reff} constante diélectrique efficace.
- ϵ_r constante diélectrique du substrat.
- h hauteur du substrat.
- W largeur du patch.

Considérant la « figure II-15 » qui montre une antenne patch rectangulaire de longueur « L » et de largeur « W » reposant sur un substrat de hauteur « h ».

L'axe de coordonnées est choisit de telle sorte que la longueur est dans la direction X, la largeur est dans la direction Y et la hauteur est dans la direction Z.

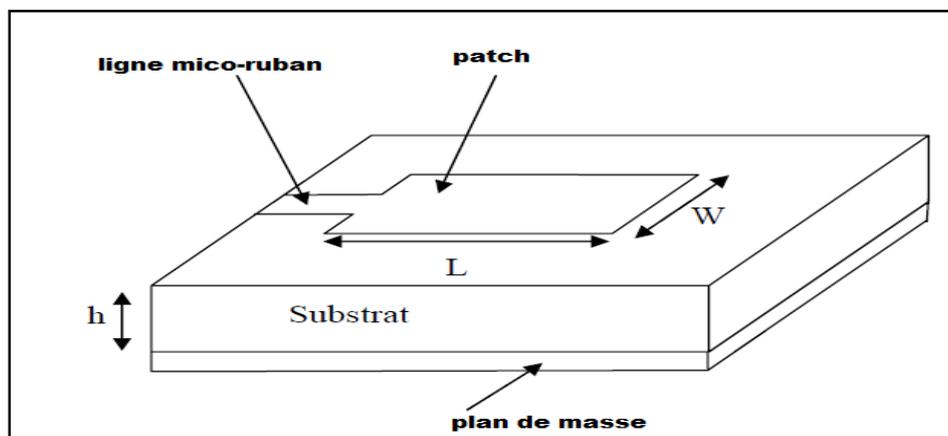


Figure II - 15: antenne patch rectangulaire.

Pour faire fonctionner en mode fondamental TM_{10} , la longueur du patch doit être légèrement inférieure à $\lambda/2$ ou λ est la longueur d'onde dans le milieu diélectrique qui est égale à

$$\lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \quad (2.3)$$

Où λ_0 est la longueur d'onde dans l'espace libre.

Le mode TM_{10} implique que le champ varie au moins de $\lambda/2$ le long de la longueur et il n'y a aucune variation sur toute la largeur du patch. La « figure II-16 » représente une antenne patch rectangulaire en deux fentes séparées par une ligne de transmission de longueur « L » et en circuit ouvert pour les deux autres extrémités. Toute au long de la largeur du patch la tension est maximal et le courant est minimal due aux extrémités ouvertes. Les champs aux bords peuvent être résolus en composantes normales et tangentiels par rapport au plan de masse.

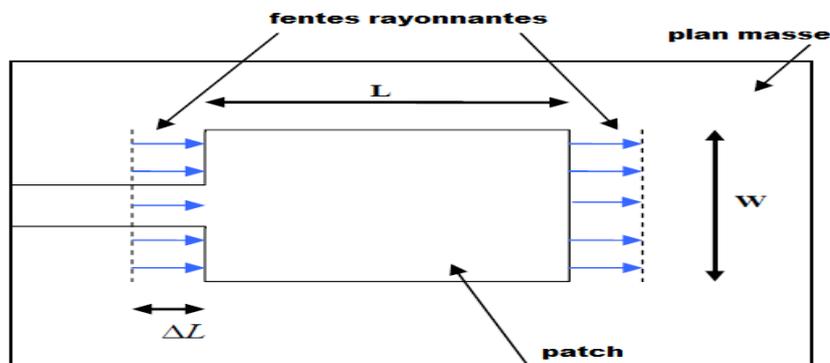


Figure II - 16: vue du haut de l'antenne.

Comme il le montre « la figure II-17 » les composante du champ électrique aux deux extrémités sur toute la largeur sont dans des directions opposées et donc sont déphasées puisque le patch est de $\lambda/2$ de longueur et donc qu'ils s'annulent l'un de l'autre dans les extrémités. Les composantes tangentielle, « figure II-17 » sont en phase, signifient que les champs résultants se combinent pour donner le maximum de champ normal rayonné à la surface de la structure.

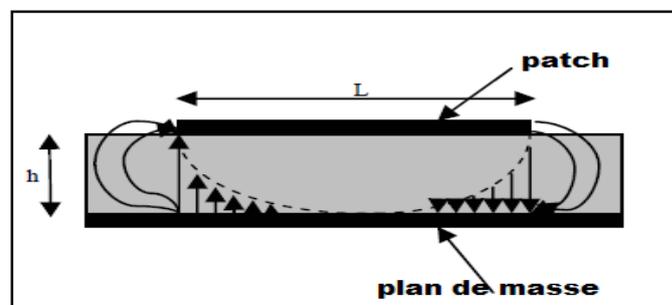


Figure II - 17: vue latérale de l'antenne.

D'où sur toute la largeur, les extrémités peuvent être représentées par deux fentes rayonnantes, qui sont en phase de $\lambda/2$ et rayonnantes dans le demi-espace au dessus du plan de masse. Alors électriquement le patch de l'antenne micro-ruban apparait plus grand que ses dimensions physiques. Les dimensions du patch sur toute sa longueur sont étendues à chaque extrémité par une distance ΔL qui est donnée empiriquement par [42] :

$$\Delta L = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (2.4)$$

Et la longueur effective L_{eff} du patch devient :

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (2.5)$$

Pour une fréquence de résonance f_r , la longueur effective est donnée par :

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (2.6)$$

Et pour un rayonnement efficace la largeur est donnée par Bahal et Bhartia comme [41] :

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.7)$$

II.6.1.2 Modèle de la cavité résonnante

Malgré que le précédent modèle « MLT » soit facile à utiliser, il souffre de nombreux inconvénients ; il est seulement utile pour des patches de forme rectangulaire, et il ne tient pas compte des variations des champs rayonnant sur toutes les extrémités. Ces inconvénients et d'autres peuvent être éliminés dans le modèle de cavité. [33] [34]

Dans ce modèle l'antenne imprimée peut être assimilée à une cavité fermée par deux murs électriques horizontaux (le plan de masse et l'élément rayonnant) et quatre murs magnétiques verticaux. Le champ électrique dans la cavité admet une composante suivant l'axe (Oz) et le champ magnétique comporte deux composantes suivant (Oy) et (Ox) illustré par la « figure II-18 ».

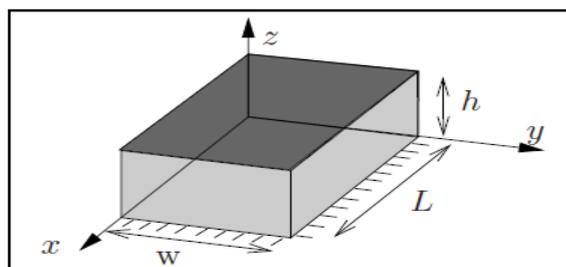


Figure II - 18: modèle de la cavité.

Considérant la « figure II-19 » ci-dessous, quand on alimente l'élément rayonnant micro-ruban on voit une distribution de charge sur les surfaces supérieure et inférieure du patch et à la partie inférieure du plan de masse. Cette distribution de charge est contrôlée par deux mécanismes [40] :

- Mécanisme attractif est compris entre les charges opposées sur le coté inférieur du patch et le coté supérieur du plan de masse.
- Mécanisme répulsif est compris entre les charges identiques sur la face inférieure du patch, qui cause la poussée de quelques charges du fond au dessus du patch.

En raison de ce mouvement de charges, les courants circulent sur la face supérieure et inférieure du patch, mais comme ce modèle suppose que le rapport (hauteur / largeur) est très petit ($L > h$) le mécanisme dominant est le mécanisme attractif qui provoque plus de concentration de charges et moins de courant sur la surface du patch.

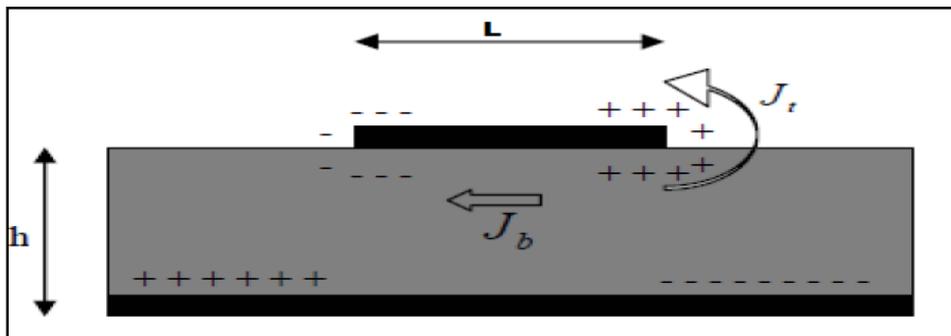


Figure II - 19: distribution de charge et densité de courant sur le patch.

Plus que le courant qui passe à la surface supérieure du patch est petit, et plus que le rapport hauteur sur largeur est diminué donc le courant sur la surface supérieure du patch est presque égale à zéro, ce qui ne permet pas la création d'aucune composantes tangentielle des champs magnétique au bord du patch. Par conséquent les quarts parois latérales peuvent être modélisées comme des surfaces magnétiques électriquement conductrices.

Etant donné que les parois et le matériel au sien de la cavité sont sans pertes la cavité ne rayonnerait pas et son impédance d'entrée serait purement réactive. Et pour tenir compte du rayonnement et du mécanisme de perte il faut introduire une résistance de rayonnement R_r et une résistance de perte R_p .

Une cavité avec perte peut représenter une antenne et ces pertes sont prises en considération par la tangente de perte effective δ_{eff} donnée par la relation suivante

$$\delta_{eff} = \frac{1}{Q_T} \quad (2.8)$$

Sachant que Q_T est le facteur de qualité totale de l'antenne donné par la relation suivante [42] :

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r} \quad (2.9)$$

Avec :

- Q_d représente facteur de qualité du diélectrique qui est donné par :

$$Q_d = \frac{\omega_r \cdot W_T}{P_d} = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.10)$$

Avec ; ω_r : est la fréquence de résonance angulaire.

W_T : est l'énergie totale emmagasinée dans le patch à la résonance.

P_d : est la perte diélectrique.

$\tan \delta$: est la tangente de perte de diélectrique.

- Q_c représente le facteur de qualité du conducteur est donné par :

$$Q_c = \frac{\omega_r \cdot W_T}{P_c} = \frac{h}{\Delta} \quad (2.11)$$

Avec ; P_c : est la perte du conducteur.

Δ : est la profondeur de pénétration du conducteur.

h : est la hauteur du substrat.

- Q_r est le facteur de qualité du rayonnement défini par :

$$Q_r = \frac{\omega_r \cdot W_T}{P_r} \quad (2.12)$$

Ou ; P_r : est la puissance rayonnée à partir du patch.

En remplaçant les équations (2.9), (2.10), (2.11) et (2.12) dans l'équation (2.8) nous obtenons :

$$\delta_{\text{eff}} = \tan \delta + \frac{\Delta}{h} + \frac{P_r}{\omega_r W_T} \quad (2.13)$$

Ainsi l'équation (2.13) décrit la tangente de perte effective totale de l'antenne micro-ruban.

II.6.2 Méthodes numériques

Le principe de ces méthodes repose sur la résolution numérique des équations de Maxwell et la détermination de la répartition de champs et courants sur la surface du patch, parmi ces méthodes on peut citer :

II.6.2.1 Méthode des éléments finis (FEM)

Cette méthode est beaucoup plus employée dans le domaine fréquentiel, elle s'applique aux dispositifs de forme quelconque, consiste à discrétiser les équations de Maxwell, la première étape consiste à mailler le domaine de calcul grâce à des éléments géométriques adaptés (les triangles pour les problèmes à deux dimensions et les tétraèdres dans les cas tridimensionnels). A chacun de ces éléments géométriques est associé un certain nombre de nœuds aux quelles sont attribuées des fonctions de base linéairement indépendantes les unes des autres et sont une approximation continue de la solution du problème.

La deuxième étape consiste à choisir une distribution de fonctions de test, respectant les conditions de dérivabilité et de continuité dans le domaine de calcul, ceci permet alors de reformuler les équations d'onde et d'éliminer les dérivées à l'ordre un et d'aboutir ainsi à une formulation variationnelle. Le cas particulier où les fonctions 'test' et 'd'essai' sont les mêmes est appelé procédure de Galerkin.

L'avantage de cette méthode réside dans la simplicité du traitement pour les géométries complexes et les matériaux non homogènes. [46][47]

II.6.2.2 Méthode des différences finies (FDTD)

La méthode des différences finies dans le domaine temporel la FDTD (Finite Difference Time Domain) est une approche numérique permettant la résolution des équations différentielles dans le domaine temporel dans une structure uniformément maillée. La méthode consiste à approcher les dérivées ponctuelles spatiales et temporelles qui apparaissent dans les équations de Maxwell par des différences finies centrées. Les composantes électrique et magnétique sont décalées d'une demi-cellule spatiale et calculées d'une manière alternative et itérative, à des multiples pairs et impairs du demi-pas temporel.

Cette technique a l'avantage de permettre une caractérisation dans une large bande de fréquence d'une structure en une seule simulation. [35] [48]

II.6.2.3 Méthode des moments

La méthode des moments a été développée pour la première fois par Newman, c'est une méthode utilisée essentiellement dans le domaine fréquentiel, est une technique numérique qui permet de résoudre efficacement le système d'équations intégrales en le transformant en un système matriciel résolu par ordinateur [5]. Pour utiliser cette méthode il faut décomposer la structure étudiée en plusieurs parties ou cellules. Elle est basée sur le

critère de nullité d'une fonctionnelle constitué à partir d'une intégrale des résidus, due à la différence entre la solution approximative et la solution exacte, pondérée par des fonctions de test. La fonction d'essai est exprimée sous forme de fonction de base dont les coefficients de pondération sont déterminés en résolvant le système linéaire. La procédure de Galerkin qui consiste à choisir des fonctions test identiques aux fonctions de base est applicable aussi dans cette méthode.

La méthode des moments est très précise, très souple, peut traiter un élément seul ou plusieurs en réseau ou empilés. Cependant, elle est très complexe, permet moins l'interprétation physique et nécessite un temps de calculs considérable. [49]

II.6.2.4 Méthode d'analyse spectrale

Ce modèle prend en considération l'équation intégrale du champ électrique, dans le domaine spectral. Cette méthode permet de résoudre efficacement le système d'équations intégrales dans le domaine spatial. Elle est basée sur la connaissance des champs électromagnétiques dans chaque région, le système d'équations à résoudre peut s'écrire sous la forme matricielle, le choix de la condition de continuité surfacique et le vecteur de courant sur le patch permet de réduire une relation entre les composantes tangentielles des champs électromagnétiques et les courants surfaciques. L'approche de l'équation intégrale dans le domaine spectral est largement utilisée dans l'analyse et la conception de structures imprimées.

Il ya d'autre différentes méthodes approché ont été proposé comme la méthode des moindres carrés, les méthodes de raccordement des modes, l'approche quasi-statique ...etc.

II.7 Applications

Vu l'explosion technologique dans la télécommunication et les recherches scientifiques continues concernant les antennes imprimés, et vu les exigences multiples dans le domaine de communication l'utilisation des antennes micro-ondes classiques devient incapable de répondre a ces exigences. Pour cette raison les antennes imprimées remplacent les antennes classiques dans la plupart des applications parmi ces application on cite :

- La commande et contrôle.
- La télémétrie par missile.
- Les équipements portatifs.
- Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- Les antennes d'émission utilisées en médecine.

- Les récepteurs satellite de navigation.

L'antenne patch est de plus en plus utilisée en télécommunication, tout particulièrement dans le secteur de la téléphonie mobile.

II.8 Conclusion

Les antennes ont des propriétés et des caractéristiques, selon lesquelles elles sont valorisées. Plusieurs techniques existent pour les réaliser et pour assurer un bon fonctionnement il faut choisir celle la plus adapté à l'application envisagée.

Dans notre travail, le choix s'est porté sur la technologie des **antennes imprimées**, leurs avantages nombreux permettent de les utiliser dans divers secteurs et surtout les communications mobiles.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'évolution technologique des antennes imprimées, on a donné une petite description ; quelques techniques d'alimentations ainsi que son mécanisme de base a savoir le modèle (MLT et cavité résonante), nous nous sommes également étalé sur les méthodes d'analyse les plus utilisées pour des structures de forme quelconque. Aucune de ces méthodes citées n'est parfaite toutes présentent des avantages et des inconvénients, la méthode des moments peut être considéré comme rigoureuse pour son utilisation assez large.

Après ce bref aperçu sur les bases des antennes imprimées, le chapitre suivant sera consacré pour la conception et la simulation de ces antennes par le logiciel **HFSS**.

CHAPITRE III

Conception et Simulation d'une antenne imprimée sous HFSS

III.1 Introduction

La phase de conception d'une antenne, à l'aide d'un logiciel adapté est une étape obligatoire dans un souci de gain, de temps et d'optimisation de structure aux paramètres désirés. La conception permet également de prendre en compte les paramètres diélectriques et conducteurs des matériaux bas cout choisis, qui ne sont pas parfaits, et de nous permet aussi de rapprocher des futures antennes réalisées. Pour cela nous avons choisis un outil de simulation électromagnétique « **HFSS** ». Le choix de ce logiciel pour notre application est justifiée, en effet c'est un logiciel dédié à la simulation haut fréquence des circuits micro-onde. Il s'agit d'un logiciel puissant qui étudie et simule des structures complexe en trois dimension, il est exploité notamment pour calculer les paramètres S, les fréquences de résonances ainsi que les champs électrique et magnétique et aussi la visualisation du diagramme de rayonnement en 3D.

Dans ce chapitre nous allons développer la phase de conception en présentant un bref récapitulatif sur le logiciel de simulation « **HFSS** », en suite nous présentons les structures de l'antenne réalisée (antenne bi-bandes). En finira par exposer les résultats de quelques simulations de ces antennes.

III.2 Logiciel de simulation « **HFSS** »

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un logiciel de simulation qui calcule le comportement électromagnétique d'une structure. Pour analyser ce comportement en détails le logiciel met à notre disposition des différents outils d'interprétation telle que les paramètres S, les fréquences de résonances et les champs.

Ce genre de simulation fait intervenir des équations aux dérivées partielles. Il existe trois méthodes principales comme vu dans le chapitre précédent : la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies et la méthode des moments. Le principe de ces méthodes est de discrétiser l'espace à l'aide d'un maillage propre à la méthode et de résoudre les équations. Le logiciel présenté ici utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les équations de maxwell. [44]

La géométrie du modèle étudié sous HFSS, est automatiquement divisée en un grand nombre de tétraèdres sur lesquels le calcul mathématique sera plus faisable. La valeur d'un vecteur champ (E ou H) en un point à l'intérieur d'un tétraèdre est calculée par l'interpolation des valeurs des champs dans les sommets du tétraèdre. Ainsi en représentant les valeurs des champs de cette manière, HFSS calcul les champs séparément dans chaque élément en fixant des critères de convergence, qui correspond à l'incertitude maximale entre au moins deux itérations successives pour être validées comme représentatives de réalité. Cette incertitude

est calculée comme étant le pourcentage entre deux solutions successives, et si le rapport entre ces deux solutions est supérieur au critère de convergence, il faut continuer les itérations, sinon la solution est dite stable et le calcul s'arrête.

Un projet HFSS est un dossier qui contient un (ou plusieurs) modèles appelés design. Chaque modèle contient une structure géométrique, ses conditions aux limites et le choix des matériaux utilisés, ainsi que les solutions de champs électromagnétiques et les interprétations post traitement. Tous ces composants peuvent être atteints par la fenêtre Project Manager dans l'espace HFSS. [45]

Pour créer une structure en 3D il suffit de la dessiner avec les outils mis à disposition par le logiciel. Ici nous ne présentons que les étapes les plus difficiles à mettre en œuvre.

La conception

- On peut dessiner des objets 3D en utilisant les commandes du HFSS, pour établir un modèle il faut aller à « Draw », puis on choisit un modèle parmi les modèles proposés (rectangle, cercle, cube...etc).
- Après avoir dessiné un modèle on doit définir les frontières (boundaries)
 - **Perfect E** : appelé aussi conducteur parfait ce type de limite force le vecteur champ électrique à être perpendiculaire à la surface du conducteur.
 - **Perfect H** : conducteur magnétique parfait, il est tangentiel à la surface du conducteur.
 - **Finite conductivity** : on attribue une conductivité finie au matériau conducteur ainsi que sa tangente de pertes (imparfait).
 - **Radiation** : limites de rayonnement, aussi appelée frontières absorbantes. Elle nous permet de modéliser une surface électriquement ouverte, les ondes peuvent alors sortir de la structure et s'arrêter vers la limite de rayonnement où elles sont absorbées. Elle évite ainsi les réflexions qui pourraient perturber le fonctionnement du système.
- Et pour que l'antenne rayonne, il faut exciter la structure. Il existe différents types d'excitations mais le plus souvent on utilise les Wave port et les Lumped port qui ont pour rôle d'indiquer la zone où l'énergie entre et sort de la structure.

La Simulation

Ici on résume les étapes nécessaires pour réussir une simulation :

- Définir les unités.
- Définir les matériaux de base.

- Dessiner le modèle de la structure à simuler.
- Définir la gamme des fréquences ainsi que les ports d'excitations.
- Définir les conditions aux limites (boundaries).

Après avoir rempli toutes les étapes précédentes, il faut compiler en validant et analysant le projet en cliquant sur (validate check >> analyze all). Une fois l'analyse terminée, il faut aller aux résultats, un clic droit sur résultat et choisir ce que on souhaite visualiser (diagramme de rayonnement, paramètre S_{11} , gain ... etc).

III.3 Les paramètres spécifiques pour la conception d'une antenne patch rectangulaire

Les trois paramètres essentiels pour la conception d'une antenne patch rectangulaire sont : [6]

III.3.1 Fréquence de fonctionnement ou de résonance (f_r)

La fréquence de résonance d'une antenne doit être sélectionnée de manière appropriée

- Le système de communication **GSM 900** : (Global System for Mobile communication) un système radio-mobile basé sur la norme GSM à vocation urbaine et rurale (macro cellule) et utilise deux bandes de fréquences de 25MHz autour de 900 MHz les bandes fréquentielles sont [890-915] MHz et [935-960] MHz, ce fut le premier numérique implémenté en France. La fréquence de résonance prise est égale à 0.9 GHz
- Le système de communication **DCS 1800** : (digital cellular system) système radio mobile dérivé du GSM 900 à vocation urbaine (micro cellule) utilisant actuellement deux bandes de fréquences de 75 MHz autour de 1800 MHz, la première bande est de [1710-1785] Mhz et la deuxième [1805-1880] MHz. La fréquence de résonance est de 1.8 GHz
- Le système de communication **PCS 1900** : personale communication system utilise deux bandes de fréquences la 1^{er} est [1850-1910] MHz et la 2eme est [1930-1990] MHz, ainsi l'antenne conçue doit être capable de fonctionner dans cette gamme (la fréquence de résonance prise est de 1.9 GHz).

III.3.2 La constante diélectrique du substrat (ϵ_r)

Le choix du matériau diélectrique du substrat dépend de la constante diélectrique ; plus elle est élevée plus les dimensions de l'antenne sont réduites.

III.3.3 L'épaisseur du substrat diélectrique (h)

Pour l'antenne patch utilisée dans le téléphone cellulaire (mobile), il est essentiel que l'antenne soit peu encombrante par conséquent la hauteur du substrat est toujours prise petite (quelque millimètre).

III.4 Description de l'antenne à réaliser

L'objet de ce travail consiste de décrire la conception d'une nouvelle antenne qui puisse travailler dans les deux bandes GSM900 (880-960 MHz) et DCS1800 (1710-1880 MHz).

Pour se faire nous nous intéressons à l'optimisation de l'antenne patch rectangulaire, et afin d'obtenir une conception précise, nous avons opté une méthode d'alimentation par câble coaxial, qui s'est avérée être un outil très utile et précise pour l'analyse et la conception des structures patches.

Nous avons dans un premier temps dimensionné l'antenne rectangulaire. On détermine les dimensions géométriques de la structure à réaliser (la largeur W , la longueur L ...) nécessaire pour calculer les paramètres de rayonnements dans une zone lointaine (coefficient de réflexion, diagramme de rayonnement, le gain, le rapport d'onde stationnaire ROS).

III.4.1 Conception d'une antenne mono-bande GSM à patch rectangulaire alimentée par une sonde coaxiale

L'antenne proposée est une antenne patch rectangulaire (mono-bande) dédiée à l'application GSM900 placée dans un terminal portable. Elle est constituée d'un patch rectangulaire de largeur ($W=64$ mm) et de longueur ($L=29.3$ mm) gravé sur un substrat de mêmes dimensions. Le substrat est constitué d'un matériau diélectrique, le FR4_epoxy car il présente un bon rapport prix/qualité. Il est caractérisé par une permittivité relative ($\epsilon_r = 4.4$), une perméabilité relative de ($\mu_r=1$), une tangente des pertes diélectriques ($\tan \delta = 0.02$) et une épaisseur ($e=0.8$ mm). Pour le choix de l'épaisseur du substrat, une bonne épaisseur favorise l'extension des champs alors la radiation vers l'extérieur [50]. Le patch a une hauteur de ($h=11$ mm). Il est relié au plan de masse par l'intermédiaire d'une languette de court circuit de même hauteur et de largeur ($W_1=3$ mm). Le plan de masse a comme dimensions (90 mm x 64 mm). Le patch est alimenté à l'aide d'un câble coaxial d'impédance caractéristique

50 Ω . Cette alimentation est assurée par un (Wave port), simulant une source d'onde d'excitation. La structure est confinée dans un boîtier servant à absorber le rayonnement comme représenté dans la « figure III-1 ».

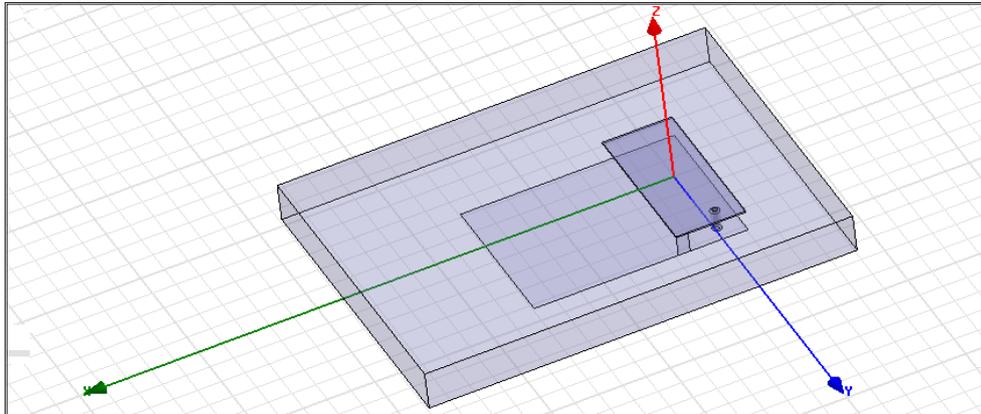


Figure III - 1 : la structure de l'antenne patch rectangulaire (mono-bande) conçue pour le GSM900.

On attribue au patch et au plan de masse la propriété de conducteurs parfaits "Perfect E". On affecte le matériau cuivre à la surface latérale du conducteur externe du câble d'alimentation. Pour la languette de court circuit, elle est définie à conductivité finie, les plans tout au tour du substrat et les plans de boîte de l'air seront définis comme surface de radiation sauf le plan confondu avec la structure rayonnante, pour que le logiciel les traite comme des extrémités de propagation de l'énergie magnétique vers l'extérieure.

III.4.2 Les résultats de simulation de l'antenne patch rectangulaire fonctionnant à 900Mhz pour GSM

Après modélisation de notre structure d'antenne patch, le travail qui suit consiste à simuler l'antenne avec différents points d'alimentation et trouver le point d'alimentation optimal, s'il correspond à la fréquence de résonance spécifique au standard sachant que cette fréquence de résonance est prise pour le coefficient de réflexion le plus faible.

Après simulation de cette antenne, les résultats sont présentés sous forme de graphes obtenus après variation du point d'alimentation sur toute la surface du patch. Cette variation a suivi une méthode choisie, fixant les coordonnées de (x) sur une valeur quelconque en variant (y) puis, fixant (y) sur une valeur précise en variant (x), qui ont données la fréquence de résonance et le coefficient de réflexion adéquat (soit le minimum possible).

Après la simulation de l'antenne avec des différents points d'alimentations, on prend les valeurs (x=-5, y=25) puisque cette position donne le résultat du coefficient de réflexion le plus petit et assure une meilleure bande passante.

➤ Paramètre S

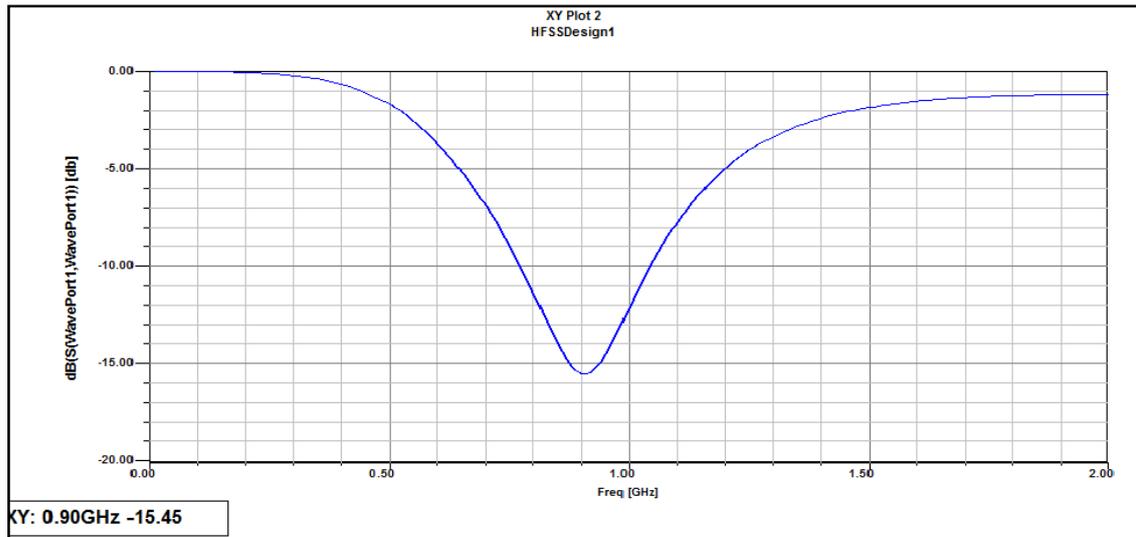


Figure III - 1: coefficient de réflexion S_{11} du point d'alimentation optimale de l'antenne GSM900.

Le paramètre S_{11} présente le coefficient de réflexion qui joue le rôle de perturbation sur la transmission des données. La « figure III-2 » présente la variation de coefficient de réflexion S_{11} à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence dans la bande [0- 2] GHz. Nous remarquons qu'une bonne adaptation est de ($S_{11} = -15.45$ dB) avec une bande passante à -10 dB de (270 Mhz) autour de la fréquence de résonance souhaitée (0.9 GHz).

➤ Le rapport d'onde stationnaire (VSWR)

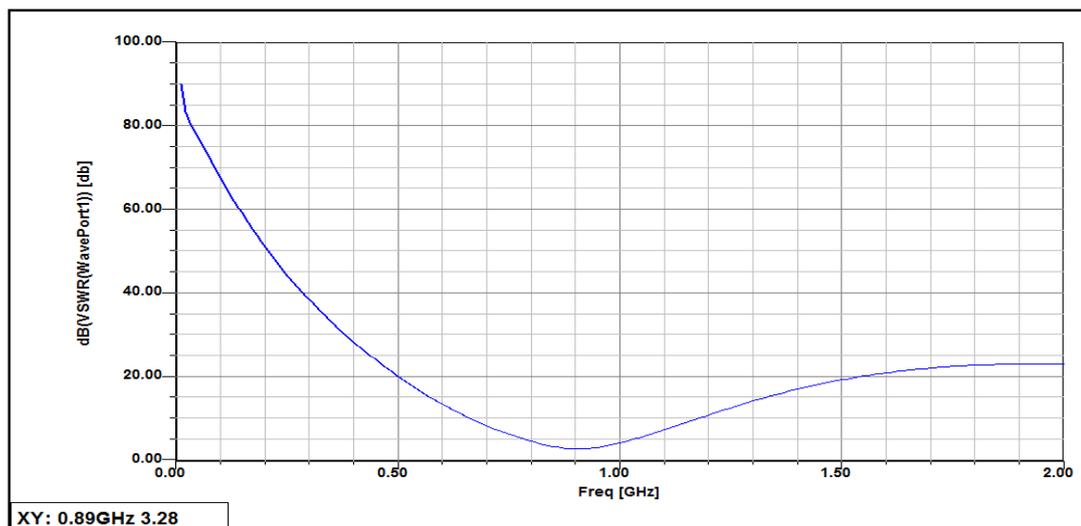
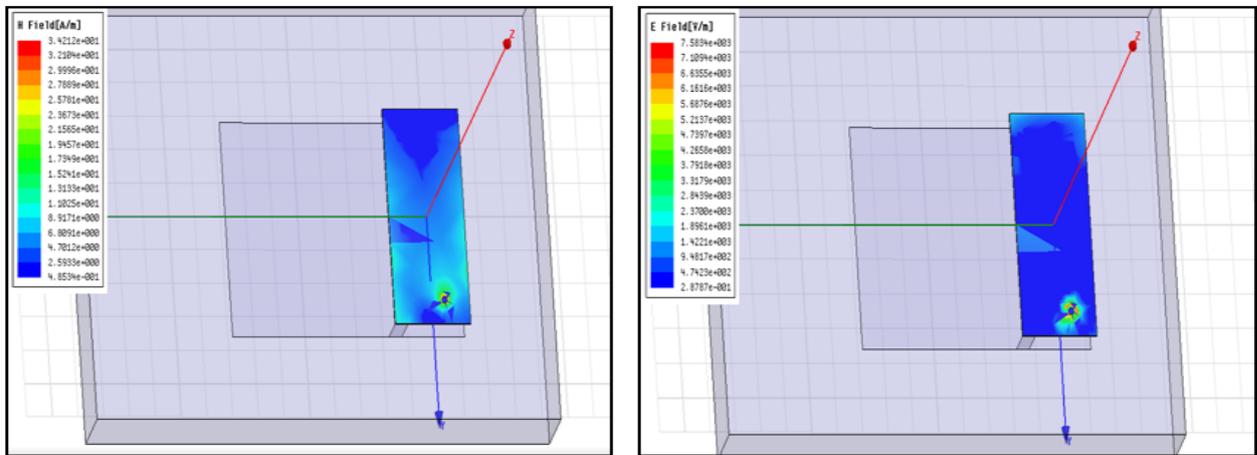


Figure III - 2: résultats du VSWR (rapport d'onde stationnaire).

La « figure III-3 » montre les valeurs du rapport d'ondes stationnaire (désadaptation de l'antenne par rapport aux systèmes d'émission ou de réception) calculées en fonction de la

fréquence. On remarque que le VSWR à la fréquence de résonance 0.9 GHz, tend vers 3 dB. Ce qui montre que l'alimentation et l'antenne sont adaptées.

➤ La répartition des champs E et H



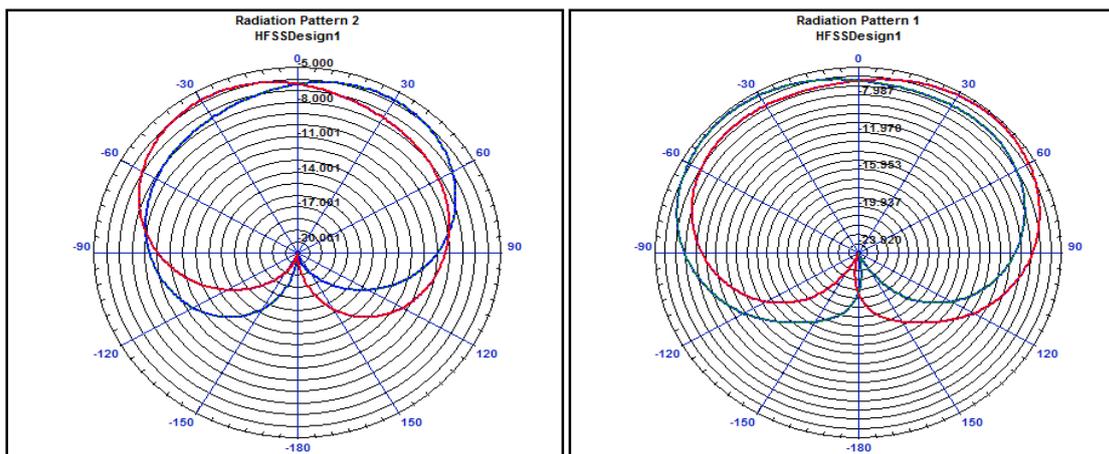
(a)

(b)

Figure III - 3 : la répartition du champ sur le patch : (a) champ H, (b) champ E.

La distribution de champ électrique et magnétique « figure III-4 » sur le patch illustre la cartographie de champ dans l'antenne. On observe d'une part que, le champ E est concentré au niveau des extrémités, et d'autre part, on constate une absence du champ E au centre du patch. Ce qui explique que le rayonnement de ce type d'antenne s'effectue principalement sur ses bords.

➤ Les diagrammes de rayonnement



(a)

(b)

Figure III - 4 : diagramme de rayonnement 2D du gain : (a) $\phi = 0^\circ$, (b) $\phi = 90^\circ$.

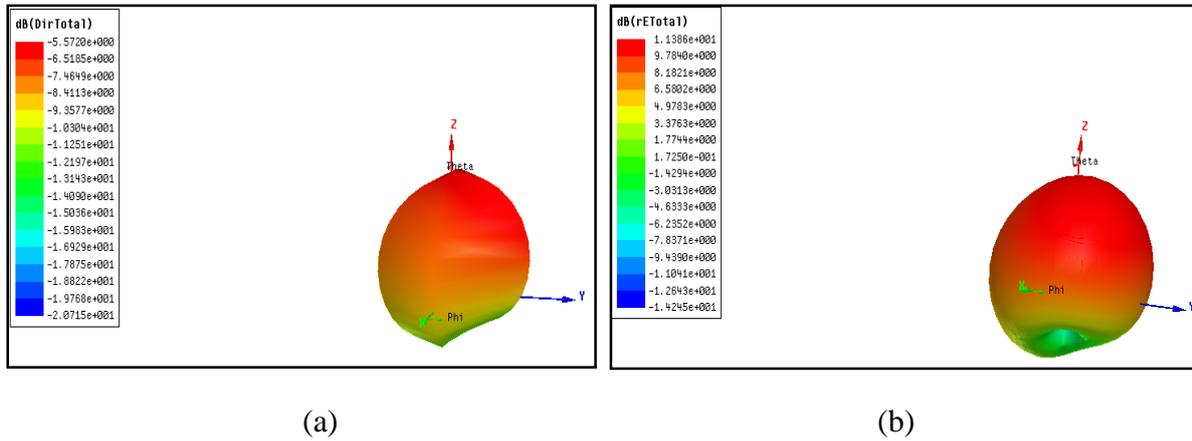


Figure III - 5 : digramme de rayonnement 3D : (a) directivité total, (b) champ E total.

Le diagramme du rayonnement d'une antenne permet de visualiser les lobes dans deux ou trois dimensions, dans le plan horizontal ($\phi=0^\circ$) ou dans le plan vertical ($\phi=90^\circ$) incluant le lobe le plus important.

En observant les diagrammes de rayonnement en 3D, on peut constater que la plupart du rayonnement va dans la direction Z. La valeur maximale du rayonnement est de 10.23dB. Le diagramme de rayonnement montre que l'énergie est rayonnée dans la direction normale au plan de masse de l'antenne.

L'antenne simulée est une antenne directive elle a un gain important le gain maximal atteint est de (7.95dB).

III.4.3 Conception d'une antenne bi-bande (GSM-DCS) à patch rectangulaire alimentée par une sonde coaxiale

L'évolution des standards a un impact direct sur les antennes. Le nombre de bandes à couvrir augmente en même temps que l'évolution de la technologie.

Le téléphone mobile "mono-bande" qui utilise seulement la bande GSM est rapidement remplacé par le téléphone "bi-bande" (GSM-DCS) avec la popularité de la 2G. Une nouvelle bande DCS est allouée à cause du manque de capacité en GSM900. Dans ces nouvelles applications de télécommunications, l'antenne doit répondre à plusieurs standards de télécommunications (GSM, DCS, PCS, WIFI ... etc.). Afin de répondre à cet objectif nous avons pensé à concevoir l'antenne bi-bandes en optimisant l'antenne mono-bande.

La recherche sur les antennes a proposé divers techniques pour les rendre multi-bandes à savoir, l'ajout d'un ou plusieurs courts circuits, l'ajout des résonateurs parasites, la juxtaposition qu'elle s'agit d'une technique basée sur l'association de plusieurs éléments rayonnants, ou bien encore la modification de la géométrie de l'élément rayonnant (en forme de triangle, rectangle ... etc).

Dans ce travail on va essayer d'optimiser l'antenne qu'on a simulé précédemment (patch rectangulaire du GSM900) en agissant sur la forme de l'élément rayonnant. Et pour se faire on a gravé un matériau isolant sous forme d'un triangle sur l'élément rayonnant comme indiqué dans la « figure III-8 » qui représente la structure géométrique de l'antenne et la « figure III-7 » représente le cahier des charges qui nous impose les valeurs caractérisant des différents éléments de l'antenne.

Properties: Project8b - HFSSDesign1

Local Variables

Value Optimization Tuning Sensitivity Statistics

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
W	29.3	mm	29.3mm	longueur du patch.
L	64	mm	64mm	largeur du patch.
E	0.8	mm	0.8mm	l'épaisseur du substrat.
W1	3	mm	3mm	largeur de la languette.
H	11	mm	11mm	hauteur du patch.
WG	90	mm	90mm	longueur du plan de masse.
LG	L		64mm	largeur du plan de masse.
A	1	mm	1mm	rayon du coaxial interne
B	2	mm	2mm	rayon du coaxial externe
x0	-5	mm	-5mm	position x du point d'alimentati...
y0	25	mm	25mm	position y du point d'alimentati...
px	13	mm	13mm	position selon x du triangle
py	17.3	mm	17.3mm	position selon y du triangles

Add... Remove Show Hidden

Figure III-7: paramètres géométriques de l'antenne rectangulaire réalisée sur le FR4-epoxy.

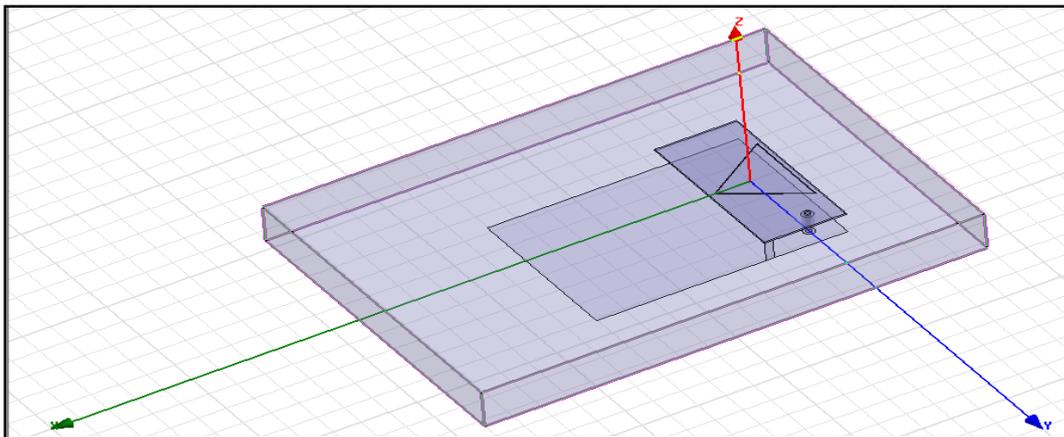


Figure III - 8 : la géométrie de l'antenne patch rectangulaire (bi-bandes) conçue pour le GSM900-DCS1800.

III.4.4 résultats de simulation de l'antenne patch rectangulaire alimentée par une sonde coaxiale fonctionnant à 900 Mhz et 1800 Mhz pour GSM-DCS

Après la simulation de cette antenne avec différentes dimensions du triangle ajouté, on prend les valeurs (31.2mm et 34.6mm) comme dimensions finale respectivement pour les

cotés et la base du triangle, car elles assurent des bons résultats concernant le paramètre S_{11} et aussi les meilleures bandes passantes. Les courbes qui résument toute les résultats de simulation sont déposées par la suite.

➤ Paramètre S

Les résultats des paramètres S_{11} de l'antenne sont illustrés sur la « figure III-9 » dans une gamme de fréquence [0-2.5GHz].

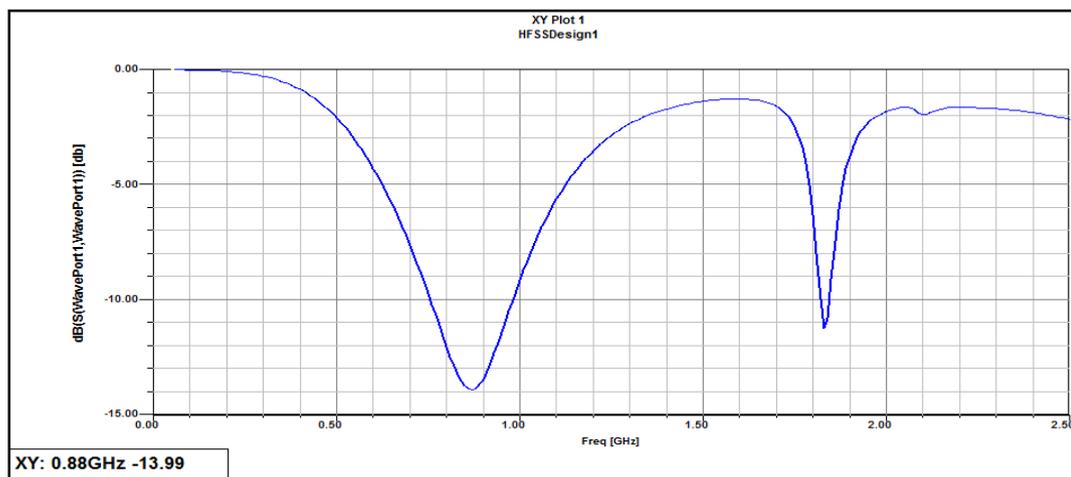


Figure III - 9 : le coefficient de réflexion de l'antenne simulée.

D'après « la figure III-9 », nous pouvons en déduire que l'adaptation est de l'ordre de (-14 dB) autour d'une fréquence de (0.88 GHz). Dont nous devons trouver une fréquence de (0.9 GHz), ce qui n'est pas le cas, cela est due à la modification que nous avons porté à la géométrie du patch. Ce résultat nous montre aussi la présence d'une résonance avec un niveau d'adaptation de (-11.5 dB) autour d'une fréquence de (1.82 GHz), cette dernière est proche de la fréquence souhaitée qui est de l'ordre de (1.8 GHz). Les bandes passantes sont de (230MHz) pour GSM et (30MHz) pour le DCS.

➤ Le rapport d'onde stationnaire (VSWR)

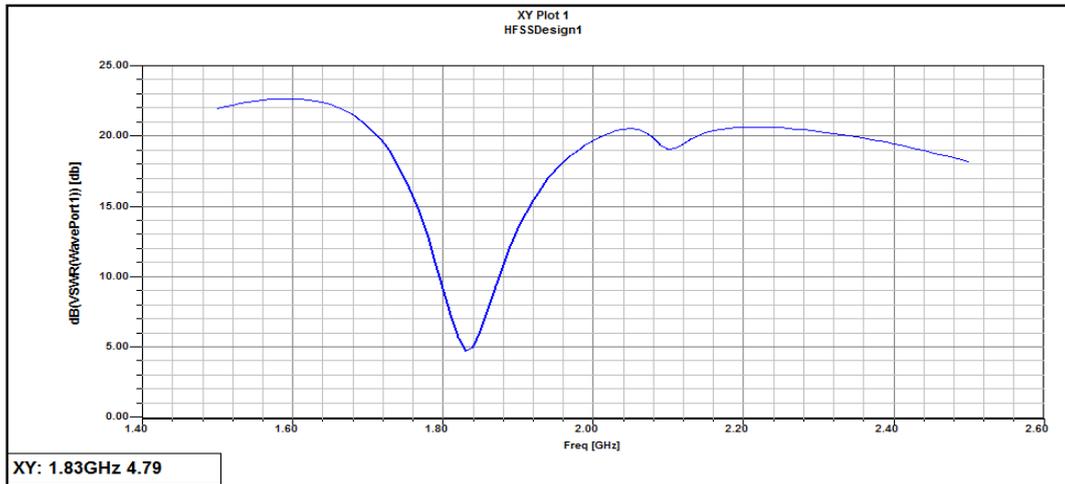


Figure III - 10 : variations du rapport d'onde stationnaire (VSWR).

La « figure III-10 » représente les variations du VSWR en fonction de la fréquence.

➤ La répartition des champs E et H

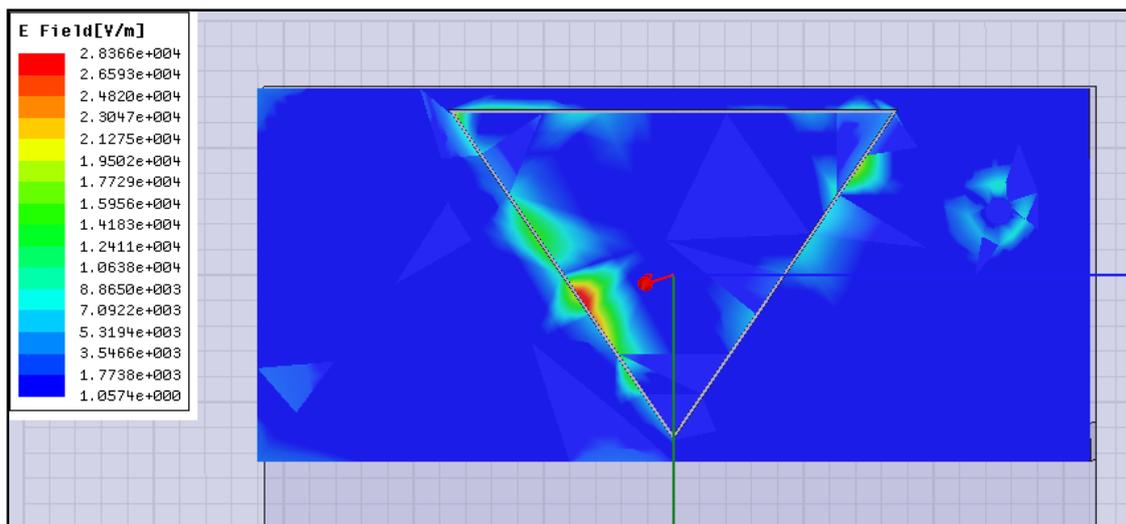


Figure III - 11 : la répartition du champ E sur la surface du patch.

La « figure III-11 » représente la répartition du champ électrique E sur la surface du patch. Il est notable que le maximum de champ E se trouve concentré aux extrémités du triangle rajouté.

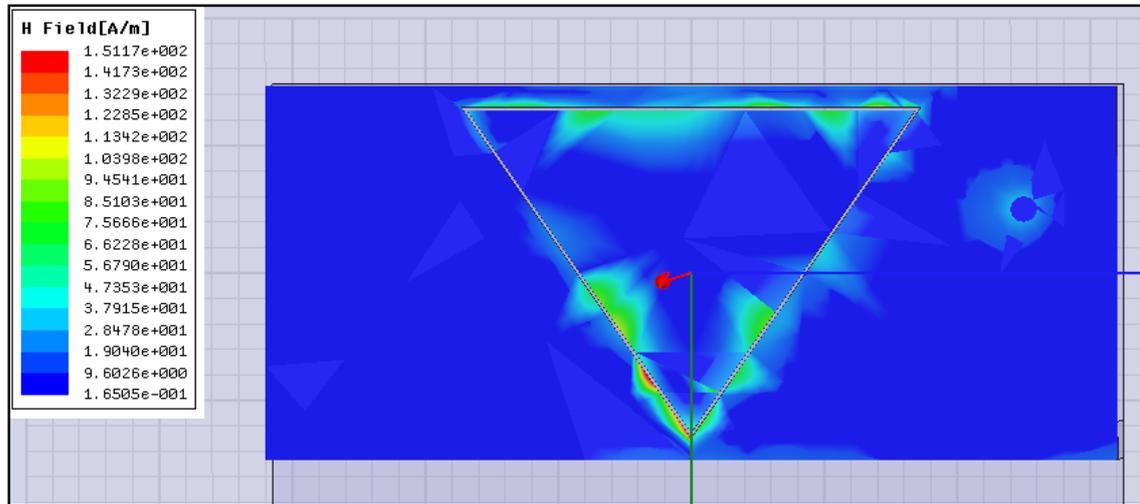


Figure III - 12 : la répartition du champ H sur la surface du patch.

De même que précédemment la « figure III-12 » illustre la répartition du champ magnétique H sur la surface du patch. On voit bien que le maximum du champ H se trouve concentré sur les bords du triangle.

➤ Les diagrammes de rayonnement

Le diagramme de rayonnement 2D du gain de l'antenne pour les différents plans E et H est représenté sur la « figure III-13 »

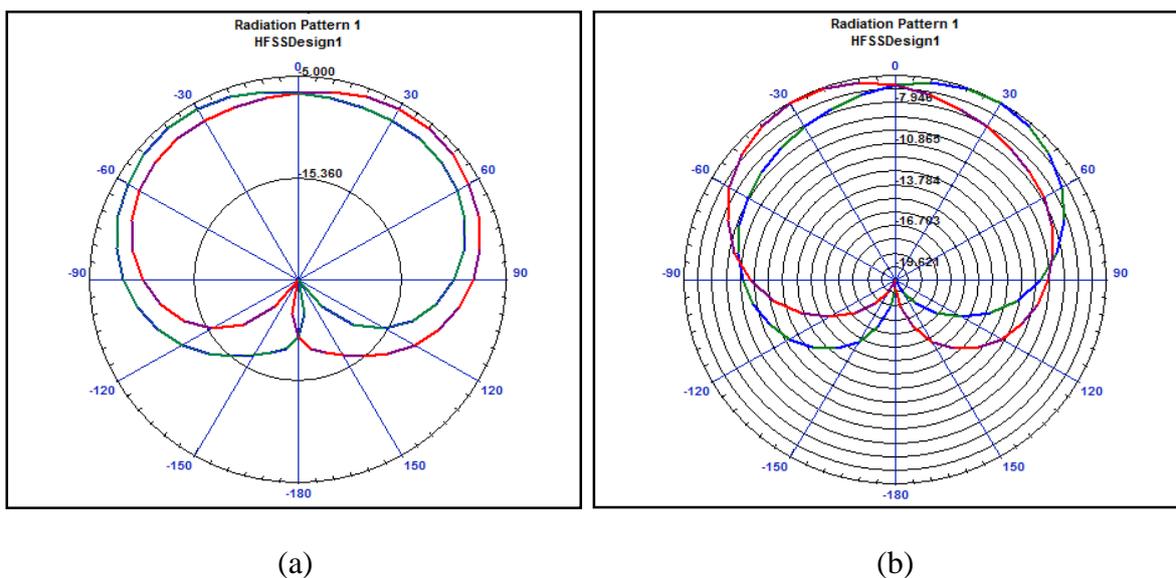


Figure III - 13 : diagramme de rayonnement 2D du gain : (a) $\phi = 0^\circ$, (b) $\phi = 90^\circ$.

Et le diagramme de rayonnement tridimensionnel (3D polaire) du champ total E et de la directivité de l'antenne simulée sont illustrés sur la « figure III-14 ».

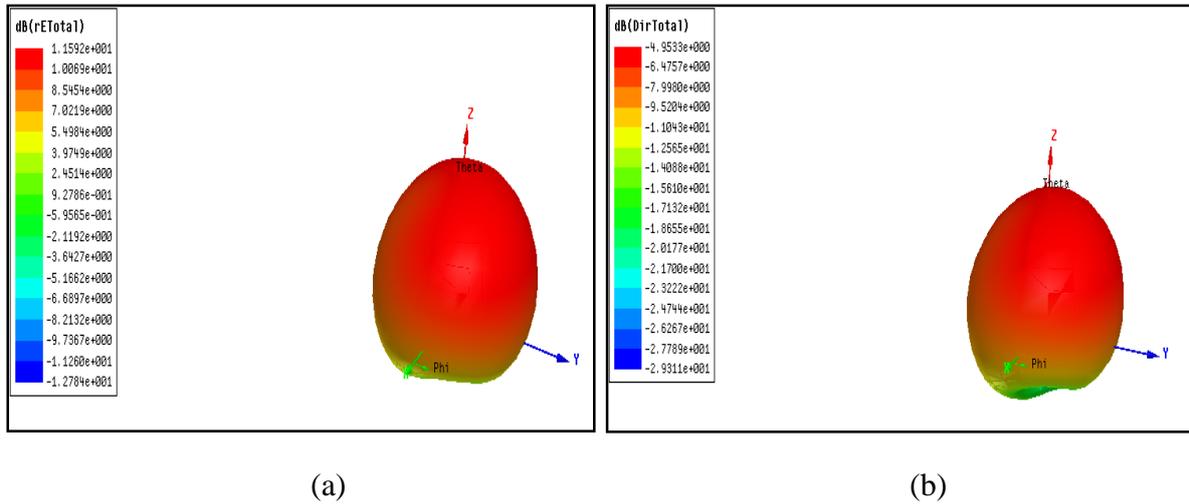


Figure III - 14 : diagramme de rayonnement 3D : (a) champ total E, (b) directivité total.

Les courbes précédentes nous permettent d’observer l’orientation et le niveau du lobe principal (qui est d’environ 8dB) qui paraît dirigé selon l’axe Z.

III.5 Avantages et inconvénients de ce type d’antenne

Les avantages ainsi les inconvénients de l’utilisation du concept d’antennes avec les techniques d’obtention du comportement multi-bandes pour l’obtention d’antennes multi-bandes sont donnés dans le tableau (III-1).

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -forte sélectivité. -porte de traitement simplifier. -profils simples. -miniature (compacte). 	<ul style="list-style-type: none"> -manque de règle de conception ou dimensionnement pour l’aspect multi bande. -fabrication relativement difficile couteuse. -faible bandes passantes. -polarisation des ondes et rayonnement difficilement maitrisables -nombre de bande à couvrir limité. -plus sensible aux erreurs de fabrication.

Tableau (III-1) points forts et faibles de ce type d’antenne.

III.6 conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons commencé par un acquis des informations sur un nouveau logiciel de simulation qu’il s’agit du HFSS.

Nous avons ainsi présenté une phase de conception d’une antenne patch rectangulaire destinée à la norme (GSM900) pour la téléphonie mobile. Et puisque l’antenne doit répondre à plusieurs standards à la fois, il était judicieux de penser à des antennes multi-bandes. Et dans

ce sens nous avons présenté une méthode qui permet d'obtenir une antenne bi-bandes (GSM900-DCS1800) répondant aux besoins.

Nous avons également présenté les résultats des simulations de ces antennes obtenus par HFSS, qu'il s'agit des différents paramètres des antennes notamment le paramètre S_{11} , le gain la directivité ainsi que la distribution des champs E et H. Enfin on a conclu que la géométrie de l'antenne (patch) est un paramètre très sensible l'hors de la conception des antennes car il s'influence sur toutes les caractéristiques du rayonnement.

Conclusion générale

L'organisation de notre travail nous a permis de bien assimiler l'ensemble des connaissances collectées dans le domaine des antennes. Nous avons dans un premier temps présenté l'essentiel de la théorie des antennes, en étudiant quelques éléments fondamentaux caractérisant l'antenne en générale. Ainsi que la technologie des antennes imprimées (patch) et leur caractéristique particulières par rapport aux autres antennes.

L'essentiel du travail que nous avons entrepris sur les généralités des antennes imprimées porte sur la description de ces antennes, les différentes techniques d'alimentation et aussi sur les méthodes d'analyse. Cela nous a aidés à constater que les méthodes analytiques sont plus faciles pour le calcul des différents paramètres tel que, la fréquence de résonance, la bande passante, le facteur de qualité... etc. Mais ces méthodes restent imprécises et se limitent à des formes géométriques simples où le substrat devrait être mince. Par contre les méthodes numériques sont plus complexes et peuvent ne pas converger si le choix des fonctions de base est mauvais. Mais elles permettent de traiter des formes géométriques plus complexes.

L'objectif principal de ce travail était la conception d'une structure planaire imprimée sous forme rectangulaire adaptée sur les deux bandes de fréquences (GSM900, DCS1800) à l'aide du logiciel de simulation hyperfréquence HFSS. Qui est un outil performant à onde électromagnétique qui fait la simulation du champ d'un model arbitraire en 3D. Il intègre la simulation, visualisation, modélisation des objets, et l'automatisation dans un environnement facile à utiliser où les solutions des problèmes ondes électromagnétiques sont obtenues rapidement et avec précision.

Nous avons simulé sous HFSS une antenne patch constituée d'un élément rayonnant de forme rectangulaire imprimé sur un substrat diélectrique (FR4-époxy). Ce travail a été complété par l'optimisation de cette antenne en gravant un matériau isolant de forme triangulaire sous l'élément rayonnant. Dans cette étude, l'épaisseur du patch et le plan de masse ont été considérées comme étant nulle.

Les résultats obtenues sont satisfaisants et vérifient bien le cahier de charge, toutes les caractéristiques de l'antenne (coefficient de réflexion, le gain et le rayonnement) obéissent au cahier de charge.

Le dimensionnement (géométrie) de l'élément rayonnant de cette antenne lui confère l'avantage d'être flexible, c'est-à-dire qu'elle peut être facilement modifiée pour satisfaire à d'autres applications ou bandes de fréquences. En jouant sur les dimensions et les coordonnées du point d'alimentation afin d'aboutir à une antenne multi-bandes avec les fréquences de résonances désirées.

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées à partir de ce travail. Tout d'abord il paraît intéressant de continuer les recherches sur l'antenne imprimée en optimisant ces structures dans le but de concevoir des antennes tri-bandes qui fonctionnent simultanément sur les trois bandes de fréquences (GSM900, DCS1800, la sous-bande wifi ISM). Également pour valider les résultats d'antennes simulées, il est important de réaliser ces structures proposées et effectuer des mesures sur ses différentes configurations. Un autre axe de recherche concernant ces antennes multi-bandes, consisterait en l'étude d'autres formes géométriques d'élément rayonnant (circulaire, triangulaire..), à l'aide d'autre logiciel électromagnétique 3D. En effet ce paramètre important peut varier énormément les formes du diagramme de rayonnement de ce type d'antennes.

Bibliographie

- [1] P.F.Combes " Micro-ondes ", Dunod, 1997.
- [2] Thomas .A.Milligan "Modern Antenna design", Wiley, IEEE, July 2005.
- [3] Keit.R.Caver and James.W.Mink , "Microstrip antenna Technology", IEEE.1981.
- [4] Stalling, D, Zockler, M; Hege, H-C: "Fast display of illuminated field lines "Visualization and computer Graphics ", IEEE transaction on .Vol.3, Issue2, pp.118-128, June 1997.
- [5] S. N. Marcov, "Antenna EM modeling with matlab", Josh Wiley & sons, N.J 2002.
- [6]Punit S.NA "Design of Mircostrip Patch à compact for use in wireless cellular Devices", thèse Master of Science: Florida state University, 2004.
- [7] Djamel. Bennjima et Tarek. Rahmani "Etude, conception et réalisation d'un réseau d'antennes patches", Institut supérieur des études technologique en communication de Tunis, 2002.
- [8] Site web; [http://:www.Wikipédia.org](http://www.Wikipédia.org).
- [9] Cours antenne, Alexander Bayer : institut national des sciences appliquées de Toulouse ,4ème année informatique et réseau, Oct 2011.
- [10] Cours antennes dispensés au département génie électrique à l'INSA de Renne.
- [11] Dominique Garnier, "Antenne et propagation radio" (GEL 202/ GEL7019), hiver 2016.
- [12] Odile Picon et Coll, "antennes théorie conception et application ",Dunod, paris 2009.ISBN978-210054245-1.
- [13] Ulaby, F.T, "Fundamentals of Applied Electromagnetic" Prentice Hall, 1999.
- [14] Tahar Neffati, " L'électronique de A à Z", Dunod, 2006.
- [15] Airza Karemipour "Contribution à l'étude du couplage entre antennes, application à la compatibilité électromagnétique et à la conception d'antenne et de réseaux d'antennes", thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des télécommunications, spécialité communication et électronique, juin 2002.
- [16] Daihua Wang, Linli Song, Hanchang Zhou, Zhijie Zhang, "A compact annular ring microstrip antenna for WSN applications", pp. 8663-8674 sensors 2012.

- [17] Yu-Ming Lee, Shuming T. Wang, Hsien-chiao Teng and Shen Cherng "A functional microstrip circuit module for annular slot antenna" progress in electromagnetic research, Vol. 136, pp. 225-207, 2013.
- [18] Vaudon Patrick, "Les antennes imprimées", Master recherche Télécommunication hautes fréquences et optique, IRCOM – 2014.
- [19] C.A. Balanis, "Modern antenna handbook", John Wiley & Sons, NY, 2008.
- [20] M. Gujral, J.L.W. Li, T. Yuan, and C.W. Qiu, "Bandwidth improvement of microstrip antenna array using dummy EBG pattern on feed line" national university of singapore, progress in electromagnetic research, Vol.127, pp.79-92, 2012.
- [21] Md. Maruf Ahmed, Kishore Bhowmik, Md. Shahidulla, Md. Shihabul Islam, Md. Abdu Rahman "Rectangular microstrip patch antenna at 2GHz on different Dielectric constant for pervasive wireless communication", International journal of electrical and computer engineering (IJECE) Vol.2, N°3, pp.417-424, June 2012.
- [22] Leila Chouitti, "contribution à l'étude d'antenne imprimées rectangulaires doubles-bandes et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage", Thèse magistère, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009.
- [23] I. J. Bahl and P. Bhartia, "Microstrip Antenna", Dedham, Artech House, 1980.
- [24] D.M. POZAR "Microstrip Antennas", IEEE, Vol.80 N° 1, pp. 79-91, January 1992.
- [25] G. Kumar and K.P. Ray, "Broad band microstrip antennas" Aartech house Boston. London 2003.
- [26] C.A. Balanis "Antenna theory: Analysis and design" third edition, John Wiley & Sons, NY, 2005.
- [27] John L. Volakis "Antenna engineering" HAND BOOK University Stuttgart. 2007.
- [28] Y. Qian and al, "A microstrip patch antenna using novel photonic band gap structures", Microwave J, Vol. 42, pp. 66-67, Jan 1999.
- [29] Hubregt J. Visser, "Array and phased array antenna basics," Antenna Engineer, the Netherlands 2005.
- [30] A.K. Bha Hacharyya "Long rectangular patch antenna with a single feed" IEEE Trans Antennas Propagate, Vol.38, pp. 987-993 July 1990.
- [31] M. Dibling "Développement du concept de l'antenne à résonateur biré pour la génération de la polarisation circulaire", Université de Limoges, thèse de Doctorat, 20 mars 2006.

- [32] D. H. Schaubert, D. M. Pozar and A. Adran "Effect of microstrip antenna substrate thickness and Permittivity: comparison of theories and experiment" IEEE Trans. Antennas propagation, Vol.37, PP.677-682, June 1989.
- [33] K.R. Car Ver and E.L coffe, "Theoretical investigation of the microstrip antenna" physics and Sci lab New mexico state University las cruces, tech.Rep PTOO929, Jan 23-1979.
- [34] Y.T. LO, D. D Harrison D. Solomon, G A Deschamps and .F.R, Ore, "Study of microstrip antennas, microstrip phased Arrays, And Mircostrip Feed Networks ", Rome Air Development centre The Rep TR. 77-406, Oct.21, 1977.
- [35] P.A Turkis and C.A Balanis, (Finite-difference time-domain method for Antenna radiation), IEEE transactions Antennas and propagation Vol. 40, PP.334-340, March 1992.
- [36] G.A Dechamps, "Microstip Microwave Antenna", third USAF symp. On antennas 1953.
- [37] H.Gutton, G. Baissinot, "flat Aerial For Ultra High Frequencies", French patten, N° 703-113, 1955.
- [38] Van Bladel, J : "Some remarks on green's dyadic for infinite space", antennas and propagation, IEEE transactions. Vol.9,issue 6, November 1961, pp.563-566.
- [39] M. Tiaouine, "Analyse des Antennes micro rubans de formes arbitraires par la méthode des moments et le modèle générale de la cavité " thèse Doctorat. Université de Sétif 2007.
- [40] F. Chebbara, " Etude des caractéristiques de résonance et de rayonnement des antennes microbandes réalisées avec des matériaux ayant une anisotropie de type électrique et magnétique ", thèse doctorat Université de Batna, Juin 2011.
- [41] Garg, R ,Bhartia, P, Bahl, I. Ittipi boon, "A Microstrip Antenna Design handbook " Artech House Inc, 2001.
- [42] Hamerstad, E.O, "Equation for Microstrip circuit design", Proc. Fifth European Microwave, Conf, PP.268-272, September, 1975.
- [43] D.M. Pozar and B. Kaufman, "Increasing the Baud with of a microstrip antenna by proximity coupling", Electron, Lett, Vol.23, PP.368-369, 1987.
- [44] Ansoft HFSS 9.1 user manual. Pdf
- [45] Hamid Megedadi, Jean-Charles Paux, "Simulation 3D HFSS de filtres", FTI.2.2006.
- [46] J. M. Jin and J. L. Volakis, "A hybrid finite element method for scattering and radiation by microstrip patch antennas and arrays residing in a cavity" IEEE Transactions on antennas and Propagation, Vol. 39, pp. 1598-1604, Nov. 1991.

- [47] Z. Lou and J. M. Jin, "Finite element analysis of phased array antennas", *Microwave Optical Technologic Letters*, Vol. 40, no 6, pp. 490-496, March 2004.
- [48] K. L. Shlager and G. S. Smith, "Near field to near field transformation for use with FDTD method and its application to pulsed antenna problem", *Electronic Letters*, Vol. 30, pp. 1262-1264, 4, August. 1994.
- [49] T. Farkas, and P. Hajach, "Analysis of aperture-coupled microstrip antenna using Method of Moments", *Radioengineering*, Vol. 10, no. 4, pp. 5-8, Dec. 2001.

Résumé

Notre travail s'est porté sur les antennes Patch. Nous avons traité les antennes en général, ainsi que leurs caractéristiques, ensuite nous avons traité les antennes patch en particulier, leurs fabrications, leurs techniques d'alimentation et leurs modélisation.

La conception des antennes utilisant le logiciel HFSS se base essentiellement sur la variation de la forme de l'antenne et de matériau conducteur, la nature et l'épaisseur du substrat afin d'avoir une structure qui résonne dans les fréquences désirées pour des applications précises.

L'objectif de notre travail est d'étudier et de concevoir d'antenne patch ayant des caractéristiques satisfaisantes de point de vue coefficient de réflexion, gain, et rayonnement utilisant le logiciel HFSS.

Abstract

Our work is focused on the Patch antennas. We treated the antennas in general, as well as their characteristics, then we treated antennas patch in particular, their manufacture, their feeding techniques and their modelling.

The design of antennas using HFSS software is essentially based on the shape of the antenna and the conductive material variation, nature and the thickness of the substrate in order to have a structure that resonates in the frequencies you want for specific applications.

The objective of our work is to study and design of patch antenna with satisfactory characteristics of the reflectance coefficient, gain, and radiation using HFSS software.

