

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. Yahia Farés de MEDEA

Faculté des sciences et de la technologie

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Filière : Télécommunication
Spécialité : Système de Télécommunications

Réalisé par :

-BOUKHELKHAL NOURELHOUDA

-SAFIELDINE HAYET

Thème

Etude et simulation d'une antenne Patch par le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS

Soutenu publiquement
Le 13/06/2018

Devant les jurys :

- Mr. BOUCHERIT Ismail — Président
- Mr. ESSAID Billel — Examinateur
- Mr. KEHILECHE Brahim — Encadreur

Année universitaire 2017/2018

REMERCIMENTS

Nous remercions avant tout premièrement

À Allah le tout puissant de nous avoir donné la chance, le Courage, la volonté, la force et la patience pour Terminer ce mémoire.

Nos reconnaissances à Monsieur. B.KEHILECHE

Qu'il trouve ici l'expression de nos sincères

Remerciements d'avoir bien voulu accepter d'encadrer ce mémoire et de nous avoir dirigé avec patience et intérêt pendant ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres de jury qui ont acceptés d'évaluer, d'examiner et d'enrichir notre travail.

Monsieur. I.BOUCHREITE

Monsieur. B.ESSAIDE

Professeurs au département du Génie des électrique et de l'informatique, UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

N'oublier pas tous les enseignants et les responsables de notre département d'Electronique à l'université de MEDEA

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à La réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail.

Tout d'abord à mes très chers parents pour leurs soutien et leurs

Encouragements et qu'aucune dédicace ne pourra compenser

Leur sacrifice pour mon bien être et mon bonheur.

Je tiens à dédier cet humble travail à mes très cheres sœurs « Selma , Amira » et ses enfant « MOUHAMED, RACHDA… »

A mon chère frère « Ahmed »

À mes cheres amies « HOUDA, SOUHILA, ZINEB et MERIEM » et à tous ceux que j'aime,

En particulier ma collègue du présent projet et ceux de la promotion de la 2ème année MASTER

À notre promoteur Mr. B. KEHILECHE

Je le dédie aussi à tous ceux qui ont a encouragé à la réalisation de ce travail.

En fin, nous remercions tous ceux qui ont contribué à notre formation durant 16 ans d'étude.

Merci Encore une autre fois.

NOURELHOUDA

Dédicace

Je remercie le dieu le tout puissant de m'avoir motivé à

Réaliser ce modeste travail.

Je dédié ce travail à :

Mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments

Les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes

Côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père que la

Miséricorde d'Allah sur lui

Merci mes parents que dieu les protèges contre tout mal.

À ma sœur : Nabila

À ma frère : Abd allah

A toute ma famille (safieddine et abd allah-el-hadj) sans exception.

A tous mes collègues de l'université de MEDEA.

Hayet

الملخص:

الهوائي هو عنصر مهم في مجال الاتصالات اللاسلكية لإرسال و استقبال المعلومات على شكل موجات كهرومغناطيسية, و هناك أنواع مختلفة من الهوائيات

وفي أطروحتنا سنقوم بإجراء دراسة على الهوائي التصحيح باستعمال برنامج COMSOL MULTIPHSICS والهدف من عملنا هوا نجاز هوائي ثلاثي الأبعاد و دراسة كيفية النمط الإشعاعي له و لأجل هدا قمنا بالاستعمال معادلات MAXWELL ولتعين قيمت العددية إلى كل نقطة خاضعة للنمط الإشعاعي نستعمل طريقة العناصر المحددة MEF

الكلمات المفتاحية:

هوائي التصحيح ، معادلات MAXWELL ، طريقة العناصر المحددة ، برنامج COMSOL MULTI-PHYSICS ، نمط الإشعاع

RESUME

L'antenne est un élément important dans le domaine de la communication sans fil pour envoyer et recevoir des informations sous la forme d'ondes électromagnétiques, et il existe différents types d'antennes.

Dans notre thèse, nous réaliserons une étude sur l'antenne patch en utilisant le logiciel COMSOL MULTIPHSICS, afin d'obtenir une antenne tridimensionnelle et d'étudier sa radioactivité, nous avons utilisé des équations MAXWELL et assigné la méthode d'élément finis pour déterminer la valeur de chaque point sur le diagramme de rayonnement.

Les mots clés :

antenne patch, les équations de MAXWELL, Méthode des Élément Finis, logiciel COMSOL MULTI-PHYSICS, diagramme de rayonnement

ABSTRACT

The antenna is an important element in the field of wireless communication for sending and receiving information in the form of electromagnetic waves, and there are different types of antennas.

In our thesis, we will carry out a study on the patch antenna using COMSOL MULTIPHSICS software, in order to obtain a three-dimensional antenna and to study its radioactivity, we used MAXWELL equations and assigned the finite element method to determine the value of each point on the radiation pattern.

The keywords :

Patch antenna, MAXWELL equations, Finit Element Method, COMSOL MULTIPHYSICS, radiation pattern

Table des matières

REMERCIMENTS i

DÉDICACE ii

RESUME iv

LISTE DES ABBREVIATIONS xiv

LISTE DES SYOMBLES xv

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

I GENERALITE SUR LES ANTENNES 4

I-1 INTRODUCTION 5

I-2 DÉFINITION D'UNE ANTENNE 5

I-3 SYSTÈME DE COMMUNICATION RADIO 5

I-4 COMMENT RAYONNE UNE ANTENNE 7

I-5 CARACTÉRISTIQUES DES ANTENNES 7

I-5 .1 Représentation en quadripôles 7

I-5 .2 Coefficient de réflexion 8

I-5 .3 Impédance d'entrée 9

I-5 .4 Résistance de rayonnement 10

I-5 .5 La bande passante d'une antenne et sa fréquence de résonance . . . 10

I-5 .6 Facteur de qualité 12
I-5 .7 Zone de rayonnement d'une antenne 12
I-5 .8 Diagramme de rayonnement 14
I-5 .9 Angle d'ouverture 15
I-5 .10 Bilan de liaison 16
I-5 .11 Densité de puissance 16
I-5 .12 Puissance isotrope rayonnée équivalente 17
I-5 .13 Directivité 17
I-5 .14 Gain 18
I-5 .15 Rendement 18
I-5 .16 Polarisation 19
I-6 LES TYPES DES ANTENNES 19
I-6 .1 Les antennes filaires 20
I-6 .2 Les antennes à réflecteur 20
I-6 .3 Les antennes imprimées 21
I-7 TECHNIQUES D'ALIMENTATION 23
I-7 .1 Alimentation directe (avec contact) 23
I-7 .2 Alimentation par couplage (sans contact) 24
I-7 .3 Principe de fonctionnement 25
I-7 .4 Les Avantages et les inconvénients des antennes patchs 27
I-8 CONCLUSION 27

II LES ÉQUATIONS D'ANTENNE 29

II-1 INTRODUCTION 30
II-2 PRINCIPE DE PROPAGATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUE 31
II-2 .1 Propagation des ondes électromagnétiques 31
II-2 .2 Quelques rappels d'électromagnétisme 31

II-3 LES ÉQUATIONS DE MAXWELL 32
II-3 .1 Les équation de propagation des champs 34
II-3 .2 Modelisation de la source elementatire 37
II-4 MÉTHODES D'ANALYSES DES ANTENNES MICRORUBANS 39
II-4 .1 Méthode des éléments finis FEM 39
II-4 .2 Méthodes des différences finies FDTD 40
II-4 .3 Méthode des Moments MOM 41
II-5 CONCLUSION 41

III LOGICIEL COMSOL ET SIMULATION 42

III-1 INTRODUCTION 43
III-2 DÉFINITION DU COMSOL 43
III-3 PRINCIPE D'UTILISATION 44
III-3 .1 Les différentes étapes du processus de modélisation 44
III-4 AVANTAGES DE COMSOL-MULTIPHYSIQUES 45
III-5 CHOIX D'UTILISATION MODÈLE COMSOL 45
III-6 L'INTERFACE UTILISATEUR DE COMSOL 5.1 47
III-6 .1 La barre d'outils 47
III-6 .2 Ruban 48
III-6 .3 Model Builder 50
III-6 .4 Setting Geometry 51
III-6 .5 Graphics 52
III-6 .6 Messages et résultats physiques 52
III-7 SIMULATION 53
III-8 RÉSULTATS 58
III-8 .1 Paramètre S 58
III-8 .2 Diagramme de rayonnement 59

III-8 .3 Répartition du champ électrique E 60

III-8 .4 Effet des Caractéristiques géométriques 61

III-9 CONCLUSION 64

CONCLUSION GÉNÉRALE **66**

ANNEXE **68**

RÉFÉRENCES **72**

Table des figures

I.1 Schéma de principe d'un système de communication radio 6

I.2 Rayonnement d'une antenne 7

I.3 Représentation en quadripôle 7

I.4 Représentation de l'impédance de l'antenne 9

I.5 Illustration de la bande passante à $-10dB$ d'une antenne 11

I.6 Lignes de champs produits par une antenne demi-onde 13

I.7 La densité de puissance rayonnée par l'antenne 13

I.8 Diagramme de rayonnement d'une antenne directive 15

I.9 Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture 16

I.10 plan de diagramme rayonner et l'angle d'ouverture. 17

I.11 Exemples de diagramme de rayonnement d'antenne. 19

I.12 Dipôle diélectrique 20

I.13 Projecteur d'onde 21

I.14 Structure d'une antenne patch 22

I.15 Alimentation par ligne micro-ruban 23

I.16 Alimentation Par ligne coaxiale 24

I.17 Alimentation par couplage par fente 25

I.18 Alimentation couplée par proximité 25

I.19 Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire 26

II.1 La charge électrique 31
II.2 La charge magnétique 31
II.3 Onde électromagnétique et longueur d'onde 32
II.4 Interface entre deux milieux différents 37
II.5 Antenne élémentaire carrée 37
II.6 Quelques types d'éléments en dimension différent 39
III.1 Logo de logiciel comsol 43
III.2 Diagramme des étapes de conception avec COMSOL 44
III.3 Fenêtre principale de COMSOL-Multiphysique et la fenêtre "Select Space Dimension" en cascade 46
III.4 Fenêtre "Select Physique" et "Slect Study" de Comsol-multphysics en cascade 46
III.5 L'interface d'utilisateur sur le COMSOL MULTIPHYSIQSIC 47
III.6 La barre de Home 48
III.7 La barre de Définitions 49
III.8 La barre Geometry 49
III.9 La barre Physics 49
III.10 La barre Mesh 50
III.11 Model Builder 51
III.12 Setting Geometry 51
III.13 Modèle de geométrie dans la fenetre de "Graphics" 52
III.14 Messages et résultats physiques 52
III.15 Menu de dessin de la géométrie 53
III.16 Tableau des paramètres 54
III.17 fenêtre des paramètres de substrat 54
III.18 La géométrie de l'antenne Patch en 3D 55
III.19 Fenêtre de dessin et La géométrie de l'antenne Patch en 3D avec fente 55
III.20 la liste des matériaux et déclaration de ses paramètres 56
III.21 Illustration la liste des domaines des équations 56
III.22 Présente le Maillage de l'antenne patch rectangulaire 57
III.23 Evolution du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence 58
III.24 Diagramme de rayonnement 3D 59
III.25 Diagramme de rayonnement (2D) suivant le plan "yz", "zx" et "xy" 59

III.26 Répartition du champ électrique E 60
III.27 Influence de la longueur de substrat sur le diagramme de rayonnement et la répartition de champ électrique 60
III.28 Influence de la larguer de substrat sur le diagramme de rayonnement et la répartition de champ électrique 61
III.29 Influence de l'épaisseur de substrat sur le diagramme de rayonnement et la répartition de champ électrique 61
III.30 Influence de la permittivité de substrat sur le diagramme de rayonnement et la répartition de champ électrique 62
III.31 Influence de la longueur et la larguer de la fente sur le diagramme de rayonnement et la répartition de champ électrique 62

Liste des tableaux

III.1 Spectre microonde et les applications des antenne 64

2 Spectre microonde et les applications des antenne 69

3 Avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentations avec contact 70

4 Avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentations Sans contact 71

LISTE DES ABBREVIATIONS

EAD	*Equations algébro-différentiels*
EDO	*Les équations aux dérivées ordinaires*
FDTD	*Méthodes des différences finies*
FEM	*Méthode des éléments finis*
G.U.I	*Opérateur dans logiciel COMSOL*
MMIC	*MicrowaveMonolithicIntegrated Circuit*
MOM	*Method Of Moment*
PDE	*Les équations aux dérivées partielles*
PIRE	*La puissance isotrope rayonnée équivalente*
RF	*Radiofréquence*
RLC	*Un circuit résonant (résistance, bobine et condensateur)*
R.O.S	*Rapport d'onde Stationnaire*
TOS	*Taux d'onde Stationnaire*
VHF	*Verry Hight Frequency*
WiFi	*contraction de Wireless Fidelity [dB]*
2D et 3D	*Deux et trois dimensions*

LISTE DES SYOMBLES

$\vec{A}$	Le potentiel vecteur
BW	La bande passante (dB)
$\vec{B}$	Induction magnétique
c	La vitesse de la lumière
D	Le diamètre de la surfacve équivalente de l'antenne
$D(\theta, \phi)$	La directivité dans une direction
$\vec{D}$	Induction électrique [C /m2]
d	déctance entre l'antene d'émission et de réception
$\vec{E}$	La champ électrique [V/m]
f_1	la fréquence minimale
f_2	la fréquence maximale
f_{res}	la fréquence de résonance
G_e	Le gain d'émission
G_r	Le gain de l'antenne à la réception
$G(\theta, \phi)$	Le gain d'une antenne dans une direction
H	épaisseur du substrat
$\vec{H}$	Le champ magnétique[A/m]
I_{crte}	Le courant crête[A]
I_{eff}	Le courant efficace[A]
I_s	Courant superficiel[A]
$\vec{J}$	Densité de courant[A/m^2]
L	Longueur du patch
L_{ant}	La bobine (partie réelle)
L_{ef}	La langueur effective du patch
$\vec{n}$	Vecteur normal à la surface

P_A	La puissance d'alimentation d'une antenne.
P_e	La puissance émis
P_r	La puissance reçue (La puissance totale rayonné)
P_{ray}	La puissance rayonnée
P_t	La puissance totale
$P(\theta, \phi)$	La puissance rayonné par unité d'angle solide (θ, ϕ)
Q	Facteur de qualité « Puissance réactive » [var]
Q	La charge électrique
Q_s	La charge superficielle
r	La distance entre le point de référence et la frontière
R_{ant}	Résistance(partie réelle)[ohm]
R_{die}	Résistance diélectrique[ohm]
R_{ohm}	Résistance ohmiques[ohm]
R_{ray}	Résistance dediélectrique[ohm]
R_{sol}	Résistance conductivité du sol[ohm]
S	Surface d'une antenne
S_{11}	Le coefficient représente la réflexion en entrée des quadripôles
S_{12}	Le coefficient représente la transmission de la puissance
S_{21}	Le coefficient représente le gain du quadripôle
S_{22}	Le coefficient représente la réflexion en sortie
t	Temps[s]
V	Le potentiel scalaire
v	la vitesse de propagation d'onde[m/s]
W	la larguer du patch [m]
X_A	Réactance (partie imaginaire)
Z_{ant}	Impédance complexe (à l'entrée) [Ω]
Z_c	Impédance caractéristique[Ω]
Γ	Coefficient de réflexion[Ω]
λ	La longueur d'onde
λ_0	La longueur d'onde dans l'air
θ	Angle d'élévation
ϕ	Angle d'élévation
η	Rendement

ε Permittivité électrique[F/m]

ε_0 Permittivité diélectrique dans le vide[F/m]

ε_r Permittivité relative du milieu considéré.[F/m]

ε_{ef} Permittivité effective[F/m]

ε_{die} Permittivité diélectrique du substrat[F/m]

ρ Densité volumique de charges [C/m^3]

σ Conductivité électrique du milieu[S/m]

μ Perméabilité magnétique[T.m/A]

μ_0 Perméabilité du vide[T.m/A]

μ_r Perméabilité relative du milieu considéré[T.m/A]

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les recherches sur les moyens de communication et la correspondance, N'ont pas cessé depuis la naissance de l'être humain. Pendant des siècles successifs, l'homme a fourni des efforts intellectuels énormes dans le but de concevoir des techniques adaptées.

En 1870, lors des études sur les ondes électromagnétiques, « J.Maxwell » démontre que celles-ci voyagent aussi bien dans le vide que dans la matière. Cela a permis de réaliser les premières expériences de la radio (transmission sans fil) en 1895 par le physicien « Marconi ».[5]

Dès lors, On voit apparaître de nouveaux réseaux sans fil pour la communication à distance et plusieurs types de réseaux « réseaux de téléphonie, de diffusions à hauts débits,... etc. ». Le développement de ces standards sans fil consiste à l'évolution des technologies telles que la miniaturisation des composants, logiciels informatiques, des techniques de codages ou encore des antennes.

L'antenne est un élément essentiel dans les applications aéronautiques, aérospatiales et militaires... etc. l'antenne font l'objet de nombreux travaux de recherche et de développement. Elles sont fabriquées sur des substrats diélectriques. Elles allient à la fois des avantage comme suite :

- faibles poids, volume, épaisseur et coût.
- simplicité et facilité de fabrication.
- ossibilité de mise en réseau.

Pour répondre à ces exigences, un nouveau type d'antenne a été proposé, c'est l'antenne imprimée.

En outre, grâce à leur conformabilité aisée aux surfaces. Elles sont également capables d'assurer un rayonnement omnidirectionnel et permettent de profiter pleinement des avantages de la commande électronique des faisceaux pour augmenter la couverture angulaire.

La technique de modélisation des réseaux d'antennes est effectuée à l'aide d'outils de COMSOL basés sur la résolution numérique des équations de « Maxwell ». Pour cette modélisation rigoureuse, les méthodes les plus utilisées sont les éléments finis, la résolution d'équations intégrales par la méthode des moments, la technique des différences finies dans le domaine temporel.

L'objectif de notre travail est d'étudier, modéliser et de concevoir une antenne impri-

mée « patch » de forme rectangulaire alimenté par couplage (sans contact) sous forme une ouverture « fente » en utilisant un logiciel électromagnétique 3D « COMSOl MULTIPHYSICS 5.1 » Ce travail se compose de trois chapitres :

Chapitre I :

Dans le premier chapitre, nous allons donner une généralité sur les antennes et leur système de communication et comment rayonner, puis leur caractéristique et les différents types des antennes, un rappel théorique sur l'antenne imprimée ainsi les différentes méthodes d'alimentation et le principe de fonctionnement de l'antenne patch à la fin nous allons citer Les Avantages et les inconvénients des antennes patchs.

Chapitre II :

Ce chapitre contient les Méthodes d'analyses de l'antenne. Ces méthodes sont fondées sur la base de formalismes mathématiques complexes. Nous allons citer quelque rappelle sur les principes de propagation des ondes électromagnétique, puis une démonstration sur les équations de « MAXWELL » en régime temporelle et harmonique ensuite une partie théorique sur les équations de rayonnement d'une antenne patch, à la fin nous présenterons Les méthodes d'analyses des antennes micro rubans les plus reconnues comme : la méthode aux différences finies, la méthode des éléments finies et la méthode des moments.

Chapitre III :

Dans lhbe dernier chapitre on a eu l'occasion d'utiliser un logiciel de modélisation numérique de géométrie 3D basé sur la méthode des éléments finis c'est (COMSOL MULTIPHYSICS 5.1). Ce chapitre est diviser sur deux partie.

La première partie est une introduction sur le logiciel et description de l'environnement de l'outil de simulation, et la deuxième concerne les résultats de simulations réalisées sur les antennes patch rectangulaire, afin de montrer leurs performances (le coefficient de réflexion, la bande passante et le diagramme de rayonnement ...) Enfin une conclusion générale sur le travail réalisé

Chapitre I

GENERALITE SUR LES ANTENNES

I-1 INTRODUCTION

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique durant les dernières années grâce à la forte demande de l'industrie et des utilisateurs [1].

Aujourd'hui, les télécommunications sont en plein essor car l'antenne est un élément essentiel de la chaîne de transmission. La plupart des appareils (téléphones portables, satellite, modem ...) sont connectés à un ou plusieurs types des réseaux sans fil tels que WiFi , Bluetooth ou infrarouge. Il est donc très facile de créer un réseau "sans fil" en quelques minutes permettant à tous ces appareils de communiquer entre eux.

Les antennes sont des dispositifs utilisés pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou pour le capter. Comme nous le verrons dans ce chapitre qu'il existe des nombreux types d'antennes.

Ce chapitre a pour objectif de donner quelques informations générales sur les réseaux de télécommunication sans fil, on présenter une généralité sur les antennes avec les différents types des antennes qui s'appliquent dans le domaine des télécommunications. Puis, un concept d'une antenne imprimée.Nous allons revenir sur les caractéristiques fondamentaux de l'antenne telles que «le coefficient de réflexion, diagramme de rayonnement, l'angle de couverture, le gain et ainsi que les différents types d'alimentation».

I-2 DÉFINITION D'UNE ANTENNE

L'antenne est une composante très importante dans les systèmes de communication sans fil. Par définition, une antenne est un dispositif utilisé pour transformer un signal " RF" voyager sur un conducteur ou sous forme une onde électromagnétique dans l'espace.

Une antenne est une outille qui assure la transmission de l'énergie sou forme d'une onde se propage dans l'espace entre un émetteur et une appareil de réception.[2]

I-3 SYSTÈME DE COMMUNICATION RADIO

Si nous considérons un système de communication sans fil le plus simple qui soit, celui-ci serait composé d'un bloc d'émission et d'un bloc de réception. Ces deux blocs seraient

séparés par un canal de propagation dans lequel le signal émis transite avant d'être reçu comme le montre (la figure I.1).

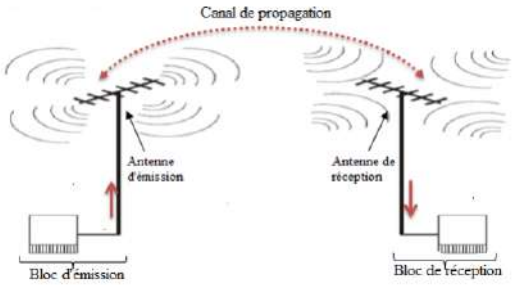


FIGURE I.1 – Schéma de principe d'un système de communication radio

Bloc d'émission :

Au niveau du bloc d'émission, le circuit d'émission fournit à sa sortie un courant de haute fréquence, généralement modulé, qui va être transformer en ondes électromagnétiques capables de se propager dans le canal, c'est l'antenne d'émission qui assure ce rôle.

Bloc de réception :

A l'inverse au niveau du bloc de réception, lorsque les ondes atteignent le récepteur c'est l'antenne de réception qu'incombe le rôle de les transformer en courant susceptible d'être traité par le circuit de réception.

Ainsi une antenne peut se définir par sa fonction : c'est un transducteur passif qui convertit les grandeurs électriques d'un conducteur ou d'une ligne de transmission (tension et courant) en grandeurs électromagnétiques dans l'espace (champ électrique et champ magnétique) et inversement. de plus comme le montre le théorème de réciprocité de "Lorentz ", l'ensemble des caractéristiques d'une antenne sont identiques que l'antenne soit utilisée comme antenne d'émission ou de réception.[3]

D'une façon général l'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants :

- Permettre une adaptation correcte entre l'équipement radioélectrique et le milieu de propagation.
- Assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées
- Transmettre le plus fidèlement possible une information.[4]

I-4 COMMENT RAYONNE UNE ANTENNE

Le rayonnement d'une antenne peut être expliqué comme montré (la Figure I.2) qui présente une source de tension connecté à une ligne de transmission à deux conducteurs.

L'application d'une tension sinusoïdale est appliquée à travers la ligne de transmission crée un champ électrique sinusoïdal dans la nature ce crée une lignes de force électrique, qui est tangentielle du champ électrique. L'amplitude du champ électrique est indiquée par la concentration des lignes des forces électriques.

Les électrons libres sur les conducteurs sont déplacées par les lignes électriques de force et le mouvement de ces charges provoque la circulation du courant qui à son tour conduit à la création d'un champ magnétique.[5]

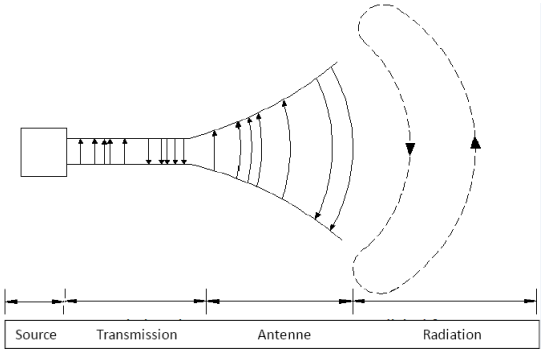


FIGURE I.2 – Rayonnement d'une antenne

I-5 CARACTÉRISTIQUES DES ANTENNES

I-5 .1 Représentation en quadripôles

Une antenne peut être représentée comme un quadripôle (Figure I.3), défini par les paramètres "S" :

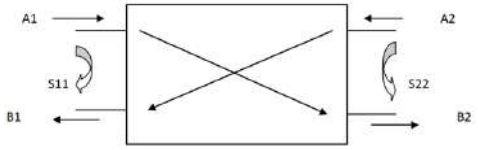


FIGURE I.3 – Représentation en quadripôle

A_1, A_2, B_1 et B_2 sont des ondes de puissance.

On a les relations suivantes :

$$B_1 = S_{11} \times A_1 + S_{12} \times A_2 \tag{I.1}$$

$$B_2 = S_{21} \times A_1 + S_{22} \times A_2 \tag{I.2}$$

- Le coefficient S_{11} correspond la réflexion en entrée des quadripôles lorsque $A_2 = 0$.
- Le coefficient S_{12} représente la transmission de la puissance entrant en sortie vers l'entrée lorsque $A_1 = 0$.
- Le coefficient S_{21} est le gain du quadripôle lorsque $A_2 = 0$.
- Le coefficient S_{22} est la réflexion en sortie du quadripôle lorsque $A_1 = 0$.[6]

I-5 .2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion d'une antenne représente le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchies. le coefficient de réflexion peut être défini comme suite :

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_{ant} - Z_c}{Z_{ant} + Z_c} \tag{I.3}$$

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

$$|S_{11}|_{dB} = 20log(S_{11}) \tag{I.4}$$

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

Dans la pratique, l'adaptation est caractérisée par le module du coefficient de réflexion ou, le plus souvent, par le "Rapport d'onde Stationnaire "(R.O.S). Lorsque l'adaptation n'est pas parfaite, la partie de l'onde réfléchie se superpose à l'onde incidente pour ne former qu'une seule onde, appelée onde stationnaire. Il se définit comme le rapport des valeurs maximales et minimales de l'amplitude de l'onde stationnaire. Le "ROS" peut également s'exprimer à partir du coefficient de réflexion que nous venons de définir à

travers l'expression.

$$ROS = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \tag{I.5}$$

Le terme de " TOS " (Taux d'ondes Stationnaires) peut être utilisé à la place de " ROS ".[3]

I-5 .3 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne est définie comme le rapport entre la tension et le courant aux terminaux de l'antenne ou comme le rapport entre les composantes appropriées des champs électriques et magnétiques. L'expression de l'impédance d'entrée d'une antenne Z_{ant} se décompose en une partie réelle R_A (résistance) et une partie imaginaire X_A (réactance) et s'écrit comme suit :

$$Z_{ant} = R_A + jX_A \tag{I.6}$$

- Z_{ant} : Impédance d'entrée de l'antenne et caractéristique de la ligne d'alimentation.
- Z_c : Impédance caractéristique de la ligne.

$$\text{avec } Z_c = 50 \text{ Ohm}$$

La partie réelle de l'impédance R_{ant} regroupe une partie due aux pertes ohmiques et diélectriques des matériaux et la résistance de rayonnement (R_{ray}) de l'antenne et elle s'écrit comme suit :

$$R_{ant} = R_{pertes} + R_{ray} \tag{I.7}$$

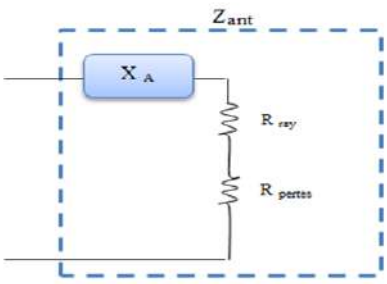


FIGURE I.4 – Représentation de l'impédance de l'antenne

Pour s'assurer que la puissance a été transférée de l'alimentation vers l'antenne, il est nécessaire d'avoir une adaptation d'impédance.

Le transfert maximal de puissance est obtenu lorsque l'impédance de la ligne d'alimentation Z_c est égale à l'impédance conjuguée de l'antenne et comme le coefficient de réflexion S_{11}(est en fonction de la fréquence) alors Z_{ant} varie aussi avec la fréquence. Cette impédance d'entrée en fonction de S_{11} est donnée par la formule :[7]

$$Z_{ant} = Z_c \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \tag{I.8}$$

I-5 .4 Résistance de rayonnement

Pour les antennes, la puissance totale émise P_t est reliée au courant crête (En utilisant le courant efficace I_{eff} :

$$I_{eff} = \frac{I_{crte}}{\sqrt{2}} \tag{I.9}$$

on obtient :

$$P_t = R_{ray} I_{eff}^2 \tag{I.10}$$

I_{eff} : mesuré à l'entrée de l'antenne via la résistance de rayonnement vue à l'entrée R_{ray} qui n'est pas une résistance dissipative physique :

$$P_t = \frac{1}{2} R_{ray} I_{eff}^2 \tag{I.11}$$

Cette résistance s'ajoute à celle des pertes joules (ou pertes en général) pour former la partie réelle de l'impédance de l'antenne :

$$R_{ant} = R_{ray} + R_{prtes} \tag{I.12}$$

R_{pertes} est provoque par :

- Les pertes ohmiques ou thermiques R_{ohm}.
- Les pertes dans le diélectrique R_{die}.
- Les pertes de retour (conductivité du sol) pour les monopoles R_{sol}.[8]

I-5 .5 La bande passante d'une antenne et sa fréquence de résonance

La largeur de bande, appelée aussi bande passante, d'une antenne définit le domaine de fréquence dans lequel le rayonnement de l'antenne présente les caractéristiques requises.

Il s'agit aussi de la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximale . La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion, à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande.

Pour connaître la largeur de bande d'une antenne relativement au rayonnement, on trace le paramètre S_{11} de réflexion en fonction de la fréquence. On admet généralement que si ce paramètre est inférieur à $-10dB$ ou $-15dB$, la puissance de rayonnement est suffisante. Il suffit alors de repérer sur la courbe les valeurs de la fréquence correspondant à cette valeur comme sur (la figure I.5). [1, 3]

(La bande passante relevée pour les antennes en télécommunication est celle d'une antenne avec un ROS ou TOS $\leq 2 \leftrightarrow 9.5dB$, T0S$= 1.4 \leftrightarrow S_{11} = 15dB$)

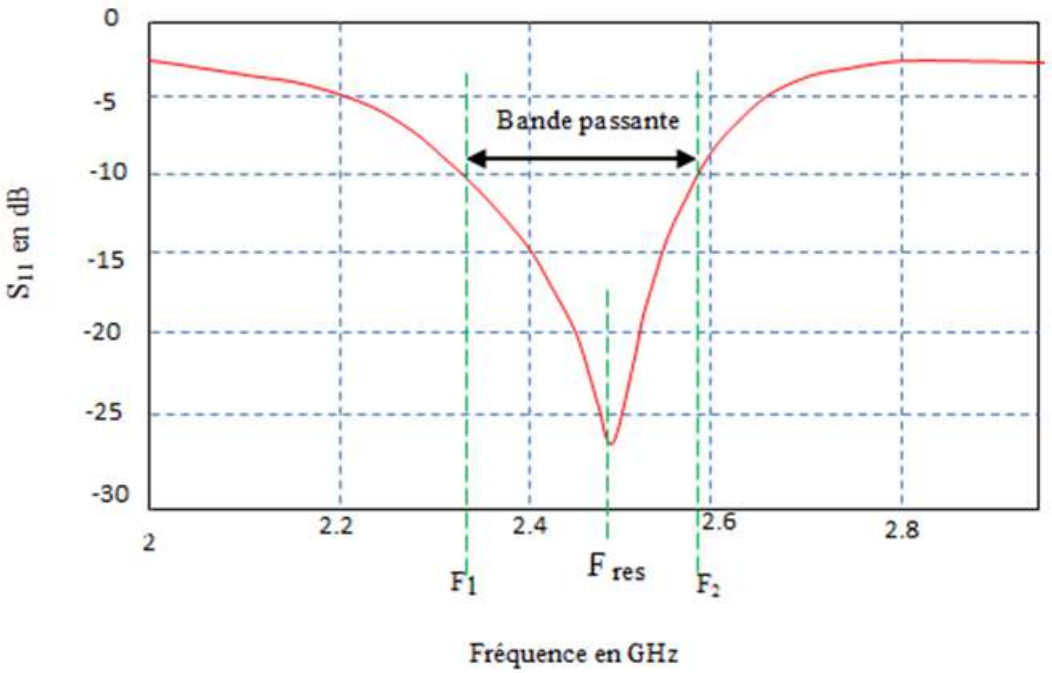


FIGURE I.5 – Illustration de la bande passante à $-10dB$ d'une antenne

La fréquence de résonance, correspond à la fréquence pour laquelle l'antenne est la mieux adaptée, c'est-à-dire pour laquelle le coefficient de réflexion est le plus faible. Sur une bande passante donnée, il est possible d'observer plusieurs minimas donc plusieurs fréquences de résonance.[1]

$$B = \frac{f_2 - f_1}{f_{res}} \tag{I.13}$$

Avec f_1 et f_2 la fréquence maximale et la fréquence minimale entre lesquelles le coefficient de réflexion est inférieur à $-10dB$ (voire $-6dB$) et f_{res} la fréquence centrale.

Afin de comparer des structures des antennes, on exprime souvent la bande passante BP d'une antenne en pourcentage par rapport à la fréquence de résonance [3].

$$BP(\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_{res}} \times 100 \tag{I.14}$$

I-5 .6 Facteur de qualité

D'un point de vue électrique, nous avons vu que l'antenne pouvait être vue comme un circuit résonant RLC .La bande passante BW (bande passante à $3dB$ de la valeur du champ) est liée au facteur de qualité Q du circuit RLC .

A la fréquence de résonance f_{res}, Le facteur de qualité représente la quantité de résistance présente lors de la résonance (pour un circuit résonant série équation $\cdots$).

$$Q = \frac{f_{res}}{BW} \tag{I.15}$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{R_{ant}}{2\pi f_{res} L_{ant}} \tag{I.16}$$

Une antenne avec un fort facteur de qualité rayonne très efficacement à la fréquence de rayonnement sur une bande de fréquence étroite, ce qui peut limiter les interférences hors bande. Cependant, si la bande passante est trop étroite, tout signal émis ou reçu près des bornes de la bande de fréquence de fonctionnement sera atténué. Une antenne avec un faible facteur de qualité est considérée comme large bande si la fréquence supérieur f_2 est au moins àédale à environ deux fois la fréquence inférieur f_1.[3]

I-5 .7 Zone de rayonnement d'une antenne

Les champs dans la proximité de l'antenne sont extrêmement complexes à analyser.(la Figure I.6) montre un exemple des lignes de champ produites par une antenne demi-onde.

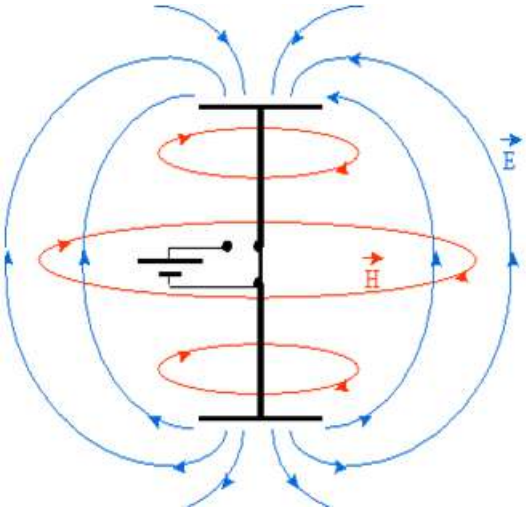


FIGURE I.6 – Lignes de champs produits par une antenne demi-onde

Les physiciens ont défini plusieurs zones autour de l'antenne(en mètres)(voir Figure I.7).

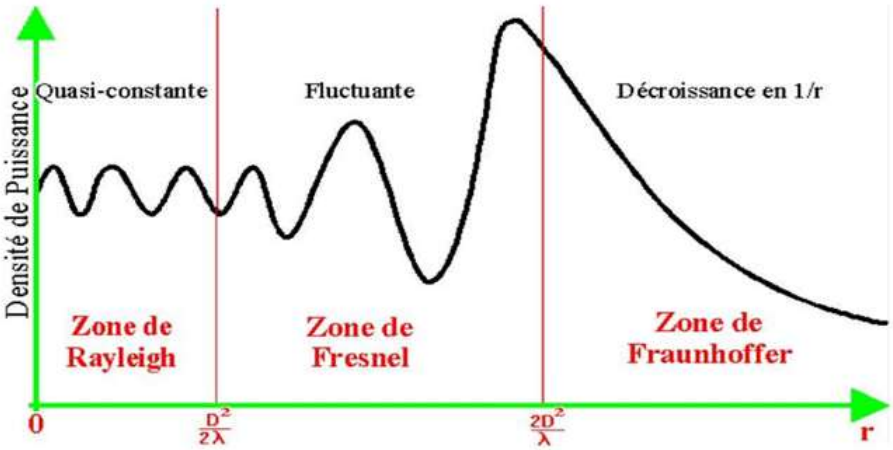


FIGURE I.7 – La densité de puissance rayonnée par l'antenne

- D : Est le diamètre de la surface équivalente de l'antenne.
- r : La distance entre le point de référence et la frontière entre les champs proche et lointain.
- λ : Corresponde à la longueur d'onde.

Zone de Rayleigh

Dans cette zone de champ proche (ou zone de Rayleigh), il y a échange d'énergie réactive entre l'antenne et le milieu extérieur. A courte distance (par rapport à la longueur

d'onde) pour :

$$r < \frac{D^2}{2\lambda} \tag{I.17}$$

- La densité de puissance est quasi constante (tube d'énergie).
- Les champs varient peu en fonction de la distance mais ils sont très complexes à analyser.[7]

Zone de Fresnel

Elle se situe entre les deux extrêmes. Ici les champs varient avec de fortes oscillations. Dans cette zone

$$\frac{D^2}{2\lambda} < r < \frac{2D^2}{2\lambda} \tag{I.18}$$

La densité de puissance est fluctuante.

Zone de Fraunhofer

Dans la zone du champ lointain (ou de Fraunhofer), à grande distance par rapport à la longueur d'onde, les champs sont rayonnés sous la forme d'une onde quasiment plane. Dans cette zone :

$$r < \frac{2D^2}{2\lambda} \tag{I.19}$$

La densité de puissance décroit en $\frac{1}{r}$.

Quel que soit le type d'antenne, on obtient invariablement des champs dont les expressions mathématiques indiquent des variations en $\frac{1}{r}$, $\frac{1}{r^2}$ et $\frac{1}{r^3}$, On interprète ces variations des champs selon la distance comme :

- les termes en $\frac{1}{r}$ correspondent au rayonnement.
- les termes en $\frac{1}{r^2}$ de $\vec{E}$ sont reliés à l'induction.
- les termes en $\frac{1}{r^3}$ de $\vec{E}$ et en $\frac{1}{r^2}$ de $\vec{H}$ proviennent de l'électrostatique.[5]

I-5 .8 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement fournit des informations sur la répartition dans l'espace de l'énergie rayonnée ou reçue par l'antenne considérée. Ainsi, à partir du diagramme de rayonnement, il est possible de définir plusieurs paramètres du rayonnement d'une antenne dont l'ouverture, le niveau de puissance et la direction des lobes secondaires.

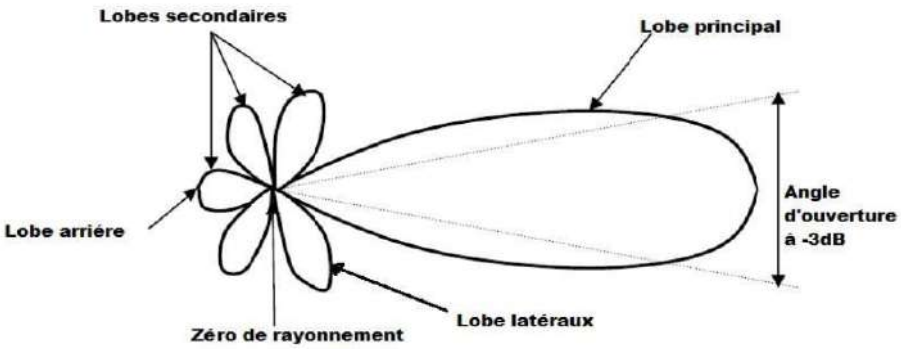


FIGURE I.8 – Diagramme de rayonnement d'une antenne directive

Tel que le montre (la Figure I.8), le diagramme de rayonnement est constitué [6] :

D'un lobe principal

C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.

Des lobes secondaires

Tous les autres lobes sont appelés lobes secondaires. Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables. Le niveau d'un lobe secondaire est en général exprimé sous forme de rapport entre la densité de puissance dans le lobe en question et celle du lobe principal. Ce rapport est appelé le niveau des lobes secondaires et il est exprimé en dB.[9]

I-5 .9 Angle d'ouverture

L'angle d'ouverture caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à $3dB$ $2\theta_3$ représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée.

Il s'agit de l'angle entre les 2 directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal.[3]

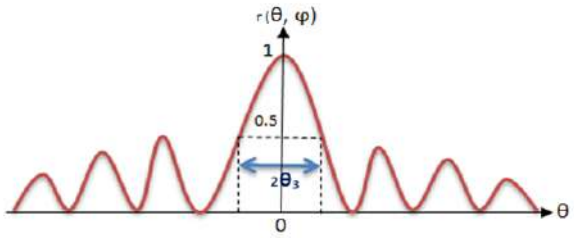


FIGURE I.9 – Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture

I-5 .10 Bilan de liaison

Le bilan de liaison est un outil courant en télécommunication permettant d'estimer les puissances reçues dans une liaison entre un émetteur et un récepteur et la qualité du signal. Il permet de dimensionner l'émetteur, le récepteur et de déterminer les limites en terme de performance (couverture radio, puissance minimale, amplification nécessaire$\cdots$).

Un bilan entre 2 antennes permet notamment de [10] :

- Déterminer la puissance reçue connaissant la puissance émise, les caractéristiques des antennes et la perte liée à la propagation de l'onde électromagnétique, et en déduire la qualité du signal reçu.
- Déterminer la perte de propagation maximale connaissant la puissance émise, les caractéristiques des antennes, le seuil de réception et le modèle de propagation, et en déduire la couverture d'une antenne.

I-5 .11 Densité de puissance

La densité de puissance est l'expression de l'énergie disponible en réception en un point de l'espace. la puissance rayonnée P_{ray} Dépend de la puissanceP_e et du gain $G_e$de qui sont fournie à l'antenne d'émission et de la distance entre l'émetteur et le point considéré, l'expression de P_{ray} est :

$$P_{ray} = \frac{P_e G_e}{(4\pi d)^2} \tag{I.20}$$

La puissance reçue P_r par une antenne de gain G_r est donnée par la formule suivante appelée "formule de Fris".[7, 10]

$$P_r = P_{ray} S = \frac{P_e G_e G_r}{(4\pi \frac{r}{\lambda})^2} = \frac{PIRE \cdot G_r}{(4\pi \frac{d}{\lambda})} \tag{I.21}$$

- d distence entre l'antenne d'éméssion et l'antenne de réception .
- S surface d'une antenne.

I-5 .12 Puissance isotrope rayonnée équivalente

La puissance isotrope rayonnée équivalente d'une antenne (PIRE ou $EIRP$ en anglais) est un terme souvent utilisé en télécommunications (principalement dans les bilans de liaison) qui définit, dans la direction de rayonnement maximal, la puissance électrique qu'il faudrait apporter à une antenne isotrope pour obtenir la même puissance rayonnée dans cette direction. Elle se calcule selon l'équation.[10]

$$PIRE = G * P_A \tag{I.22}$$

I-5 .13 Directivité

La directivité (θ, φ) d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée (θ, φ) et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope.[11]

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_r}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \tag{I.23}$$

- $P(\theta, \varphi)$:La puissance rayonné par unité d'angle solide (θ, φ).
- P_r : La puissance totale rayonné.

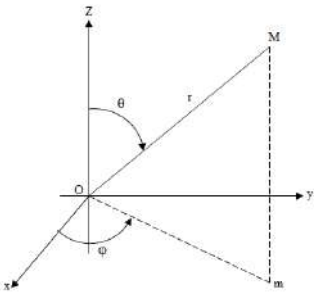


FIGURE I.10 – plan de diagramme rayonner et l'angle d'ouverture.

- θ : angle d'élévation par rapport à l'horizontale $0° \leqslant \theta \leqslant 90°$).
- φ :azimut par rapport à l'axe des x $(0° \leqslant \varphi \leqslant 360°)$.
- r : distance entre l'origine et le point d'observation.

I-5 .14 Gain

La puissance rayonnée par une antenne varie généralement selon la direction considérée. Le gain d'une antenne dans une direction (θ, φ) est le rapport de la puissance rayonnée dans cette direction P (θ, φ) à la puissance que rayonnerait la source isotrope de référence par unité d'angle solide avec la même puissance d'alimentation et il est exprimé par :

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \tag{I.24}$$

P_A : La puissance d'alimentation d'une antenne.

La relation entre le gain et la directivité d'une antenne est donnée par l'équation suivante :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \tag{I.25}$$

Ou «D »La directivité Caractérise la concentration du rayonnement dans une direction donnée, Et «η»c'est le rendement.[3]

I-5 .15 Rendement

Soit P_A la puissance d'alimentation d'une antenne. Cette puissance est transformée en une puissance rayonnée P_R. Dans le sens de l'émission, la puissance rayonnée est inférieure à la puissance d'alimentation. L'antenne est un transformateur imparfait. Il y a des pertes lors de la transformation d'énergie, comme dans tout système.l'efficacité de l'antenne est définie par :

$$\eta = \frac{P_r}{P_A} = \frac{R_r}{R_r + R_p} \tag{I.26}$$

- R_r Résistance liée à son rayonnement.
- R_p Résistance liée aux pertes de l'antenne.

Le rendement de l'antenne est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance fournie à l'antenne. Ce rapport caractérise la perte à l'intérieur de l'antenne.

Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants. En comparant les équations précédentes (I.23, I.24), on voit que le rendement relie le gain et la directivité.[11]

$$P_R = \eta \cdot P_A \Rightarrow G = \eta \cdot D \tag{I.27}$$

I-5 .16 Polarisation

La polarisation est définie comme étant l'orientation du champ électrique d'une onde électromagnétique. La polarisation est en général décrite par une ellipse. La polarisation linéaire et la polarisation circulaire sont deux cas spéciaux de polarisation elliptique.

La polarisation initiale d'une onde radio est déterminée par l'antenne. Avec la polarisation linéaire, le vecteur de champ électrique reste tout le temps dans le même plan.

Le champ électrique peut laisser l'antenne dans une orientation verticale, une orientation horizontale ou dans un angle entre les deux. Le rayonnement verticalement polarisé est légèrement moins affecté par des réflexions dans le chemin de transmission et l'angle de rayonnement plus bas.[3, 10]

Les antennes omnidirectionnelles ont toujours une polarisation verticale. Avec la polarisation horizontale, de telles réflexions causent des variations dans la force du signal reçu. Les antennes horizontales sont moins sensibles aux interférences causées par les humains, car celles-ci sont généralement polarisées verticalement.

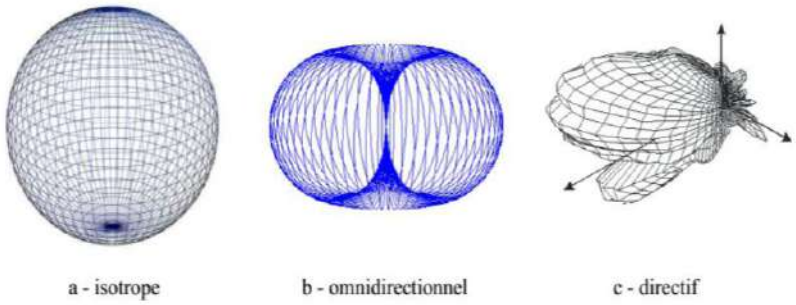


FIGURE I.11 – Exemples de diagramme de rayonnement d'antenne.

I-6 LES TYPES DES ANTENNES

Les antennes sont réparties en plusieurs catégories selon la géométrie, le gain, la forme du faisceau, et la bande passante. Ainsi, On va voir les grandes familles des antennes à l'origine de l'ensemble et on peut les classer selon la forme géométrique comme suit :[1]

- Les antennes filaires : (dipôle, monopole, Yagi) .
- Les antennes à ouvertures : (antenne à réflecteur «parabolique », cornet).
- Les antennes à fentes :(demi ou quart d'onde).

- Les antennes imprimées : (patch, dipôle imprimé, spirale).

I-6 .1 Les antennes filaires

Elles sont constituées par un fil ou des groupements des fils, le plus souvent il s'agit des lignes résonnantes demi-onde formées par des tubes compte tenu de la longueur d'onde λ.

(La figure I.12) suivante montre une antenne demi-onde, connu sous le nom de dipôle, alimentée par une coaxiale. La courbe en pointillé est la variation du courant sur l'antenne.

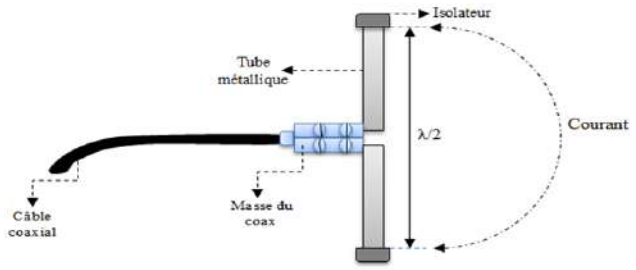


FIGURE I.12 – Dipôle diélectrique

La partie rayonnante est une tube métallique, la langueur du tube est de $\frac{\lambda}{2}$, λ étant la longueur d'onde sur la ligne qui est un peu plus faible que la longueur d'onde dans l'air λ_0, on utilise ces antennes comme éléments rayonnants dans des alignements ou des groupements de sources rayonnants·.[12]

I-6 .2 Les antennes à réflecteur

Dans la réalisation la plus courante est le réflecteur parabolique éclairé par un dipôle ou par un courant électromagnétique qui un guide d'onde qui agit comme un filtre passe haut pour ne laisse passer qu'un de propagation, cette source d'éclairement dit source primaire rayonne une onde sphérique qui se réfléchit sur le paraboloïde suivant un faisceau de rayons parallèles dans l'approximation de l'optique géométrique. [12]

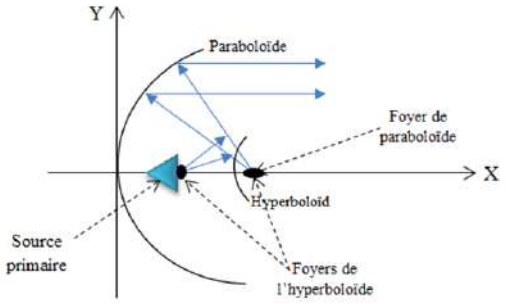


FIGURE I.13 – Projecteur d'onde

I-6 .3 Les antennes imprimées

Le concept d'antennes patch est apparu dans les années 50, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années 70.

Les antennes imprimées ou micro ruban, ou «patch »en anglais sont des éléments rayonnants planaires. Elle présente l'avantage du faible poids sur certaines antennes décrites précédemment.

Ce sont des antennes plaquées et réalisée par gravure d'un circuit imprimé diélectrique, elles présentent des architectures variées selon leur application . Leur surface contient un élément rayonnant de géométrie quelconque (rectangulaire, circulaire, à fente, ou formes plus élaborées). Il existe plusieurs mécanismes d'excitations qui permettent d'avoir des diagrammes de rayonnement en polarisations linéaire ou circulaire.

De par leur technologie de fabrication, ceux-ci peuvent être intégrés au plus près des circuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types de surface. Leur principal avantage réside dans leur faible coût de fabrication. Les antennes patch sont utilisées dans des nombreuses applications à partir des bandes VHF.[1, 12]

En général dans sa structure de base, une antenne imprimée est constituée d'un fin conducteur métallique de forme arbitraire, appelé élément rayonnant, déposé sur un substrat diélectrique dont la face inférieure est entièrement métallisée pour constituer un plan de masse.

(La figure I.14) montre la structure d'une antenne imprimée. Dans la pratique, les formes des éléments rayonnants les plus souvent utilisées sont le carré, le rectangle, le disque et l'anneau. Mais d'autres géométries plus complexes peuvent êtres rencontrées.

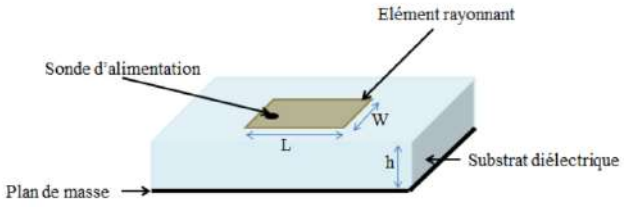


FIGURE I.14 – Structure d'une antenne patch

avec

- W : larguer (width).
- L : longueur (length).
- H : épaisseur du substrat (height).

largeur W un path est donnée par la formule suivante :

$$W = \frac{c}{2f_{res}\sqrt{\frac{\varepsilon_{die}+1}{2}}} \tag{I.28}$$

la longueur L pour un patch rectangulaire est donner par la formule suivante :

$$L = L_{ef} - 2* \triangle L \tag{I.29}$$

- L : langueur du patch.
- L_{ef} :La langueur effective du patch.

avec

$$L_{ef} = \frac{c}{2f_{res}\sqrt{\varepsilon}_{ef}} \tag{I.30}$$

$$\varepsilon_{ef} = (\frac{\varepsilon_{die}+1}{2}) + (\frac{\varepsilon_{die}-1}{2})(1+\frac{12h}{W})^{\frac{1}{2}} \tag{I.31}$$

$$\triangle L = 0.412h\frac{(\varepsilon_{die}+0.3)(\frac{W}{h}+0.264)}{(\varepsilon_{die}-0.258)(\frac{W}{h}+0.8)} \tag{I.32}$$

- f_{res} :fréquence de résonance.
- ε_{die} :permittivité diélectrique du substrat.
- h :épaisseur du substrat.
- ε_{ef} : Permittivité effective.

I-7 TECHNIQUES D'ALIMENTATION

Il existe plusieurs techniques pour l'alimentation des antennes micro-rubans, ces techniques peuvent être soit par contact direct soit par couplage, les plus communément utilisées sont l'alimentation par ligne micro-ruban, par sonde coaxiale, par couplage de proximité ou par ouverture.

I-7 .1 Alimentation directe (avec contact)

Dans cette technique d'alimentation avec contact, On peut distinguer deux types.

Alimentation par ligne micro-ruban

Dans le premier cas, une ligne micro-ruban est directement connectée à l'élément rayonnant comme le montre (la figure I.15), le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé pour permettre une meilleure adaptation d'impédance.

Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à modéliser, mais peut engendrer un rayonnement parasite qui peut devenir considérable et une bande passante typiquement entre 2 et 5%.[13]

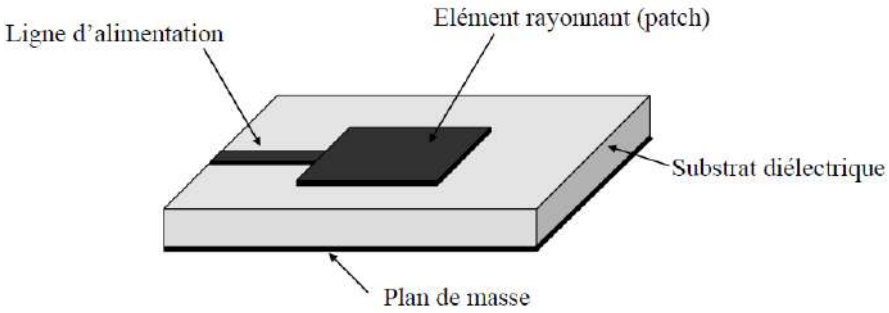


FIGURE I.15 – Alimentation par ligne micro-ruban

Alimentation par sonde coaxiale

L'alimentation par sonde coaxiale est réalisée par un contact direct de l'élément rayonnant au conducteur central d'une ligne coaxiale, tandis que son conducteur externe est relié au plan de masse (Figure I.16). L'adaptation d'impédance est réalisable en déplaçant le point d'alimentation sur le patch. L'inconvénient de ce type d'alimentation réside

dans la bande passante étroite et la difficulté de modélisation surtout pour des substrats électriquement épais.[13]

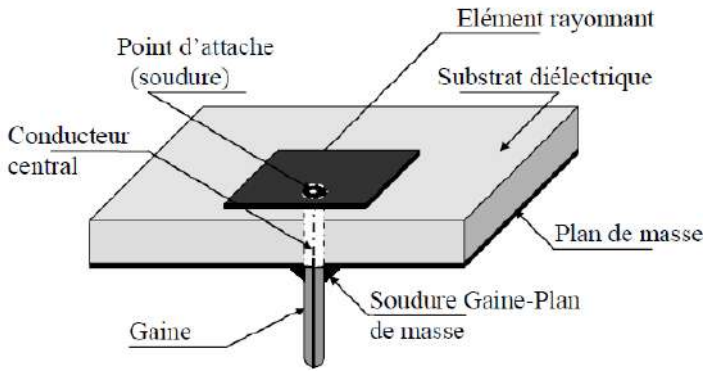


FIGURE I.16 – Alimentation Par ligne coaxiale

I-7 .2 Alimentation par couplage (sans contact)

Alimentation par ouverture (fente)

Dans ce type d'alimentation, le patch de rayonnement et la ligne d'alimentation du micro ruban sont séparés en plan de masse comme indique (la figure I.17) La conjonction entre le patch et la ligne d'alimentation est faite par une ouverture ou une fente dans le plan de masse. Le plan de masse isole la ligne d'alimentation de l'élément rayonnant et limite l'interférence de l'élément parasite sur le diagramme de rayonnement et offre une plus grande pureté de polarisation.

Généralement, les matériaux à permittivité élevée sont employés pour le substrat inférieur par contre les matériaux à faible constante diélectrique sont utilisés pour le substrat supérieur dans le but d'optimiser le rayonnement du patch.

Ce type d'alimentation est difficile à concevoir à cause des couches multiples, qui augmentent l'épaisseur d'antenne. Cependant elle offre l'élargissement de bande passante.[13]

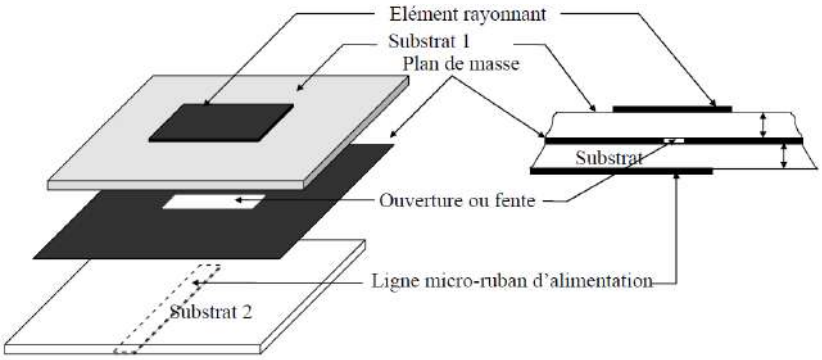


FIGURE I.17 – Alimentation par couplage par fente

Alimentation Par Proximité

Ce type d'alimentation est représenté sur (la figure I.18), 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 .

La meilleure bande passante pouvant atteindre 13% est réalisable en utilisant l'alimentation par couplage de proximité illustrée. L'avantage de cette technique d'alimentation réside dans l'affaiblissement du rayonnement parasite et la facilité du couplage, ce dernier peut être optimisé par l'ajustement des dimensions de la ligne. Cependant elle est très difficile à mettre en œuvre.[13, 14]

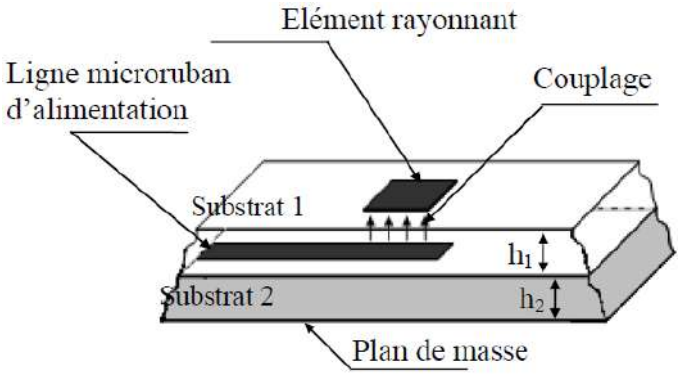


FIGURE I.18 – Alimentation couplée par proximité

I-7 .3 Principe de fonctionnement

L'antenne patch fonctionne comme une antenne demi-onde. On trouvera donc des dimensions du patch (longueur par convention) de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Le choix de la longueur du patch est donc guidé par la fréquence de résonance à donner à

l'antenne. Le plan de masse ne pouvant pas être infini, il doit être égal à 3 ou quatre fois la longueur d'onde pour «ressembler »à un plan de masse infini. Un plan de masse plus petit conduira à une modification des propriétés de l'antenne, avec notamment la présence d'un rayonnement en face arrière.

Cependant, ce la représente parfois un encombrement trop important pour une intégration pratique et faible coût d'une antenne, d'où une optimisation de sa taille. Les caractéristiques du substrat influent sur celles de l'antenne. En général, sa permittivité doit être faible, il doit être d'épaisseur négligeable devant la longueur d'onde et présenter de faible pertes.

Différentes méthodes existent pour polariser une antenne patch sur (la figure I.19) :

- L'antenne est alimentée par une connexion coaxiale.
- Le connecteur étant placée à l'intérieur de l'élément rayonnant.
- L'alimentation peut être apportée par une ligne micro ruban connectée sur un coté de l'antenne.
- La position du point de l'alimentation aura un impact non négligeable sur l'impédance d'entrée de l'antenne et donc sur son adaptation.
- En outre, on peut trouver d'autres éléments gravés autour de l'élément rayonnant tels que des lignes d'alimentation, des structures d'adaptation, de contrôle de la phase· · · .[15]

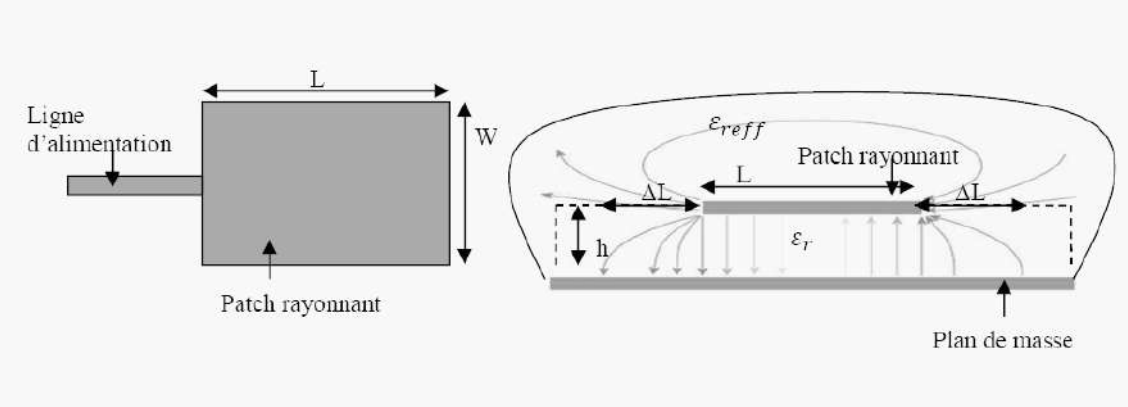


FIGURE I.19 – Rayonnement d'une antenne patch rectangulaire

L'avantage de la méthode des éléments finis est lié au fait que la forme tétraédrique et la variation des dimensions des cellules élémentaires caractérisant le volume discrétisé, donne au maillage une très grande souplesse.

I-7 .4 Les Avantages et les inconvénients des antennes patchs

Les antennes patchs présentent de nombreux avantages et leurs utilisations couvrent un large domaine de fréquences allant de $100MHz$ à $100GHz$, Parmi ces avantages :

- Un faible coût de fabrication.
- Les légères et peu encombrantes.
- La possibilité de mise en réseaux pour améliorer la directivité et pour des applications de balayage électronique de l'espace.
- Compatibilité avec les circuits hybrides et MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit).
- Les réseaux d'alimentation et d'adaptation sont fabriqués simultanément avec l'antenne.
- La polarisation de l'onde électromagnétique linéaire ou circulaire en ajustant la géométrie et l'excitation de l'élément rayonnant.

Malgré les avantages précédemment cités, ces antennes ont des inconvénients de limitation d'utilisation tels que :

- Une bande passante limitée (de 1 à $5dB$).
- Un faible gain (de l'ordre de $5dB$).
- rayonnement limité à un demi-plan d'espace.
- Supportent uniquement les faibles puissances.
- Les pertes de rayonnement par des ondes de surface.
- Une pureté de polarisation difficile à obtenir.[1]

I-8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté une généralité sur les antennes et nous avons montré le rôle et comment rayonne une antenne, ensuite nous avons également présenté leurs principaux paramètres caractéristiques tels que l'impédance d'entrée, résistance de rayonnement, la fréquence de résonance et la bande passante ainsi que la directivité, le gain, le rendement et le facteur de qualité.

Nous avons montré également quelques types d'antenne et on a choisisse l'antenne imprimé pour notre étude et leur différentes techniques d'alimentation, ainsi que les mé-

thodes d'analyses les plus utilisées à des structures micro-bandes de forme quelconque. ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Chapitre II

LES ÉQUATIONS D'ANTENNE

II-1 INTRODUCTION

Toute charge et tout mouvement de charge sont capables de créer des champs électriques et magnétiques autour d'eux et devraient être capables de produire un rayonnement électromagnétique (création d'une onde électromagnétique qui se propage librement dans l'espace). Cependant, dans la nature, quasiment tous les objets ne rayonnent pas. En effet, la plupart des objets contiennent des charges positives et négatives en équilibre, si bien que les champs électriques que chacune de ces charges génèrent s'annulent. Lorsqu'un courant circule le long d'une interconnexion, les charges véhiculées ne s'accumulent pas au bout de l'interconnexion, mais reviennent par un autre chemin, formant ainsi une boucle. Ainsi, le champ magnétique créé par chaque élément de cette boucle s'additionne avec la contribution des autres et annulent quasiment le champ magnétique total à grande distance.

« Tout l'électromagnétisme est contenu dans les équations de Maxwell » [Feynman]. La présentation des équations de Maxwell permet de donner un cadre un peu plus mathématique à la discussion précédente. Pour plus de détails sur l'art de résoudre ces équations, reportez-vous à un ouvrage d'électromagnétisme.

La répartition des champs électriques et magnétiques dans l'espace produite par une distribution donnée de charges et de courants peut être déterminée en résolvant les équations de Maxwell. En outre, celles-ci permettent de déterminer comment l'onde électromagnétique se propage dans l'espace. Pour un milieu homogène et isotrope (cas général de la propagation en espace libre ou guidée).

Dans ce chapitre, nous allons détailler les outils mathématiques nécessaires à fin de bien.

Comprendre les équations de Maxwell lorsque on veut résoudre des problèmes numériques en électromagnétisme.[10, 15, 16]

II-2 PRINCIPE DE PROPAGATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUE

II-2 .1 Propagation des ondes électromagnétiques

En télécommunication, le support de transmission sans fil le plus utilisé est l'onde électromagnétique. Une onde est une propagation d'une perturbation avec transport d'énergie sans transport de matières.[3]

II-2 .2 Quelques rappels d'électromagnétisme

Les charges électriques au repos peuvent exercer des forces électriques entre elles, cette action à distance se fait par l'intermédiaire d'un champ électrique. Toute charge électrique Q immobile créé un champ électrique E dans l'espace environnant, qui décroit inversement avec le carré de la distance.

$$\vec{E}(r) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r^3}\vec{r} \tag{II.1}$$

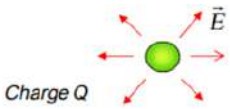


FIGURE II.1 – La charge électrique

De la même manière, toute circulation de courant (c'est-à-dire des charges en mouvement) à travers une interconnexion élémentaire est à l'origine d'un champ magnétique tournant autour de la ligne. Cette ligne exercera une force à distance sur toute autre interconnexion parcourue par un courant.

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_{dv}\frac{\vec{J}\wedge\vec{r}}{r^3}dv \tag{II.2}$$

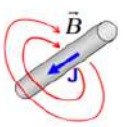


FIGURE II.2 – La charge magnétique

Les charges électriques et les courants constituent donc les sources élémentaires des champs électromagnétiques.

Les deux cas précédents correspondent au cas où les charges sont immobiles (électrostatique) et les courants continus (magnétostatique)On conclut que l'onde électromagnétique c'est la propagation de champ électrique et de champ magnétique. Autrement dit, c'est la perturbation associé à un champ électrique et un champ magnétique qui varient dans le temps et dans l'espace.[10]

La répartition des champs $\vec{E}$ et $\vec{H}$ sont sinusoïdales et la distance entre deux maxima est appelée la longueur d'onde.

La longueur d'onde est liée à la fréquence f de la porteuse par :

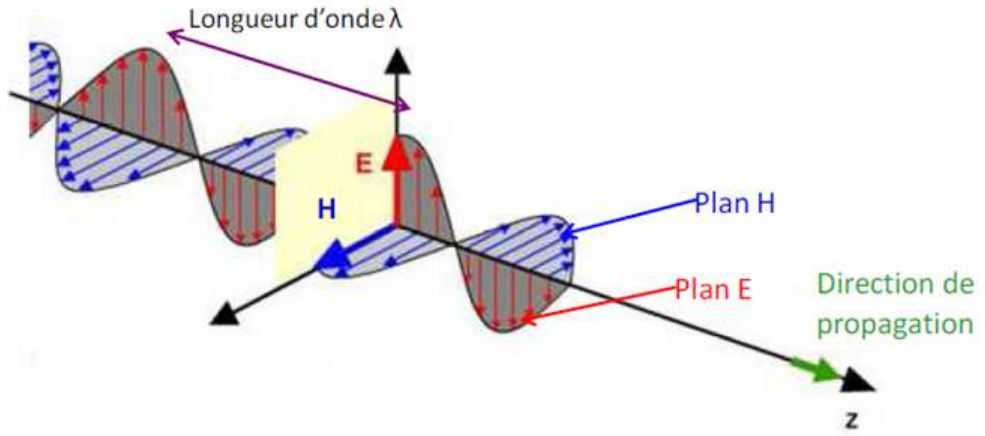


FIGURE II.3 – Onde électromagnétique et longueur d'onde

II-3 LES ÉQUATIONS DE MAXWELL

La propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu caractérisé par ses paramètres électriques ε et magnétiques μ est gérée par les équations de MAXWELL. Il s'agit bien d'un système d'équations reliant le champ électrique $\vec{E}$, le champ magnétique $\vec{B}$ et les caractéristiques du milieu de propagation. Ce système d'équation peut être formulé

comme suit :[10]

$$\begin{cases} \vec{\nabla}\vec{E} = \dfrac{\vec{\rho}}{\varepsilon} & \text{L'équation de Maxwell Gauss (II.3.1).} \\ \vec{\nabla}\vec{B} = 0 & \text{L'équation de Maxwell Thompson (II.3.2).} \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} = \dfrac{-\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{L'équation de Maxwell Faraday (II.3.3).} \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu\vec{J} + \mu\varepsilon\dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t} & \text{L'équation de Maxwell Ampère (II.3.4).} \end{cases} \tag{II.3}$$

Équation de continuité

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \tag{II.4}$$

Équations du milieu

Au système d'équations de MAXWELL, on associe les relations du milieu, elles mettent en évidence l'interaction entre les grandeurs électromagnétiques ($\vec{E}$,$\vec{H}$ et $\vec{J}$) et les propriétés intrinsèques du milieu. Ces équations sont données par [5].

$$\begin{cases} \vec{B} = \mu\vec{H} \\ \vec{D} = \varepsilon\vec{E} \\ \vec{J} = \sigma\vec{E} \end{cases} \tag{II.5}$$

avec

- $\vec{E}$: champ électrique $[\frac{v}{m}]$.
- $\vec{H}$: champ magnétique $[\frac{A}{m}]$.
- $\vec{B}$: induction magnétique$[T]$.
- $\vec{D}$: induction électrique $[\frac{c}{m^2}]$.
- ρ : Densité volumique de charges$[\frac{c}{m^3}]$.
- $\vec{J}$: densité de courant $[\frac{A}{m^2}]$.
- t : temps $[s]$.
- σ : Conductivité électrique du milieu $\left[\frac{S}{m}\right]$.
- ε : Permittivité électrique $\left[\frac{F}{m}\right]$.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \tag{II.6}$$

  - ε_0 :permittivité diélectrique dans le vide.

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot c^2}} = \frac{10^{-9}}{36\pi}\left[\frac{F}{m}\right] \simeq 8.8541718782 \times 10^{-12}[A^2 \cdot^4 \cdot Kg^{-1} \cdot m^{-3}] \tag{II.7}$$

- ε_r : Permittivité relative du milieu considéré.

- μ : Perméabilité magnétique $\left[\frac{H}{M}\right]$.

$$\mu = \mu_0 \times \mu_r \tag{II.8}$$

- μ_0 : Perméabilité du vide.

$$\mu_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot c^2}} = 4\pi 10^{-7}\left[\frac{H}{m}\right] \tag{II.9}$$

- μ_r : Perméabilité relative du milieu considéré.

- v la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu est donnée par.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\left[\frac{m}{s}\right] \tag{II.10}$$

- c Dans le cas du vide, la vitesse de propagation devient égale à la célérité de la lumière c.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = 3 \cdot 10^8\left[\frac{m}{s}\right] \tag{II.11}$$

II-3 .1 Les équation de propagation des champs

L'équation vérifiée par $\vec{E}$ est obtenue à partir des équations de Maxwell en éliminant$\vec{B}$. Pour ce faire, on prend le relationnel de l'équation de Maxwell-Faraday afin de faire apparaître $\vec{\nabla} \times \vec{E}$ qui peut être éliminé à l'aide de l'équation de Maxwell-Ampère.[17]

on utilise

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla}\vec{\nabla}\vec{E} - \triangle\ \vec{E} \tag{II.12}$$

En régime Temporel

Pour avoir le champ électrique, on a l'équation suivante :

$$r\vec{o}t(r\vec{o}t\vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t}(r\vec{o}t\vec{B}) \tag{II.13}$$

on remplacée les équations (II.11), (II.12) et (II.3.4) dans l'équation précédente (II.13) :

$$\begin{aligned} \triangle\ \vec{E} - \varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} &= \vec{\nabla}(\frac{\rho}{\varepsilon_0}) + \mu_0\frac{\partial\vec{J}}{\partial t} \\ \triangle\ \vec{E} - \tfrac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} &= \vec{\nabla}(\frac{\rho}{\varepsilon_0}) + \mu_0\frac{\partial\vec{J}}{\partial t} \end{aligned} \tag{II.14}$$

donc on obtient l'équation de propagation de champs électrique $\vec{E}$ on utilise l'opération "d'Alembertien", noté $\Box$ et égale à :

$\Box = \triangle - \varepsilon_0\mu_0\dfrac{\partial^2}{\partial t^2}$ ce qui permet de simplifier l'écriture sous la forme suivante :

$$\Box\vec{E} = \vec{\nabla}(\frac{\rho}{\varepsilon_0}) + \mu_0\frac{\partial\vec{J}}{\partial t} \tag{II.15}$$

Et pour avoir le champ magnétique on a l'équation suivante :

$$r\vec{o}t(r\vec{o}t\vec{B}) = r\vec{o}t(\mu_0\vec{J} + \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}) \tag{II.16}$$

De même façon on remplace les équations (II.3.2), (II.11) et (II.12) dans l'équation précédente (II.16) :

$$\begin{aligned} \triangle\ \vec{B} - \varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2} &= -\mu_0(\vec{\nabla}\times\vec{J}) \\ \triangle\ \vec{B} - \tfrac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2} &= -\mu_0(\vec{\nabla}\times\vec{J}) \end{aligned} \tag{II.17}$$

à la fin on conclu l'équation de propagation de champs magnétique $\vec{B}$ qui varier en fonction de la densité de courantet on utilise l'opération "d'Alembertien", noté $\Box$ et égale à :

$\Box = \triangle - \varepsilon_0\mu_0\dfrac{\partial^2}{\partial t^2}$ ce qui permet de simplifier l'écriture sous la forme suivante :

$$\Box\vec{B} = -\mu_0(\vec{\nabla}\times\vec{J}) \tag{II.18}$$

En régime Harmonique

Lorsque le terme source $\vec{J}$ varie de façon sinusoïdale en temps, nous pouvons établir le modèle réduit des équations de Maxwell en régime harmonique. Pour cela, soit $\omega > 0$ la pulsation des vibrations et supposons que

$$\vec{J}(x,t) = Re[J\exp(-j\omega t)] \tag{II.19}$$

Le champ électromagnétique est dit harmonique en temps si l'on peut écrire

$$\vec{B}(x,t) = Re[B(x)\exp(-j\omega t)] \tag{II.20}$$

$$\vec{E}(x,t) = Re[E(x)\exp(-j\omega t)] \tag{II.21}$$

Ici, les champs $\vec{J}$, $\vec{E}$ et $\vec{H}$ ne dépendent que de la position x et sont des fonctions à valeurs dans $\mathbb{C}^3$. Nous obtenons les équations de Maxwell harmoniques en temps.[18]

$$\frac{\partial e^{-j\omega t}}{\partial t} = -j\omega \tag{II.22}$$

On utilise l'équation (II.22) dans les équations (II.15) et (II.18), Il donne :

- Le champ électrique dans régime Harmonique.

$$\triangle\, E(x) + \frac{\omega^2}{c^2}E(x) = \vec{\nabla}\frac{\rho}{\varepsilon_0} - j\omega J(x) \tag{II.23}$$

- Le champ magnétique dans régime Harmonique.

$$\triangle\, B(x) + \frac{\omega^2}{c^2}B(x) = -\mu_0\vec{\nabla} \times \vec{J} \tag{II.24}$$

Conditions aux frontières entre deux milieux

Considérons deux milieux adjacents caractérisés par $(\varepsilon_1, \mu_1, \sigma_1)$ et $(\varepsilon_2, \mu_2, \sigma_2)$. En absence de source de charges sur l'interface, les conditions aux frontières se résument à :

▷ la continuité des composantes tangentielles du champ $(\vec{E})$.

▷ la continuité des composantes normales de l'induction $(\vec{B})$.

Pour le cas particulier d'un conducteur parfait caractérisé par une conductivité infinie $(\sigma = \infty)$, les champs $\vec{E}$ et$\vec{B}$ sont nuls à l'intérieur de ce conducteur. Sur l'interface des deux milieux, il y aura apparition des courants et des charges superficiels $\vec{I}_S[\frac{A}{m^2}]$ et $Q_s[\frac{C}{m^2}]$ respectivement.

Les relations de continuité à l'interface deviennent sous forme des équations :

- la composante tangentielle du champ $\vec{E}$ est nulle.
- la composante normale du champ $\vec{B}$ est nulle.

Donc ces conditions s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \vec{n} \wedge \vec{E}_1 = 0 \\ \vec{n} \wedge \vec{H}_1 = \vec{I}_s \\ \vec{n} \cdot \vec{D}_1 = Q_s \\ \vec{n} \cdot \vec{B}_1 = 0 \end{cases} \tag{II.25}$$

Où $\vec{n}$: Vecteur normal à la surface, orienté du milieu "2" vers le milieu "1" (Figure II.4).

De manière générale, le modèle limite des distributions surfaciques des charges et des courants entraîne des discontinuités des champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ à la traversée de telles distributions.

Les équations de MAXWELL permettent de déterminer ces discontinuités qui se résument à :

$$\begin{cases} \vec{E}_2 - \vec{E}_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\vec{n}_{12} \\ \vec{B}_2 - \vec{B}_1 = \mu_0 \vec{s} \times \vec{n}_{12} \end{cases} \quad \text{(II.26)}$$

.

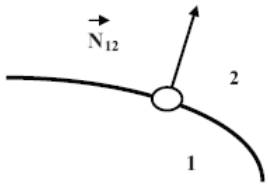


FIGURE II.4 – Interface entre deux milieux différents

Ces relations font apparaître la possibilité d'une discontinuité de la composante normale de $\vec{E}$ et la continuité de sa composante tangentielle. Elles font également apparaître la possibilité d'une discontinuité des composantes tangentielles de $\vec{B}$ et la continuité de sa composante normale.[19]

II-3 .2 Modelisation de la source elementatire

L'antenne imprimée de forme rectangulaire appelée aussi patch repérée par le système de coordonnées sphériques est représentée par (la figure II.5).[20]

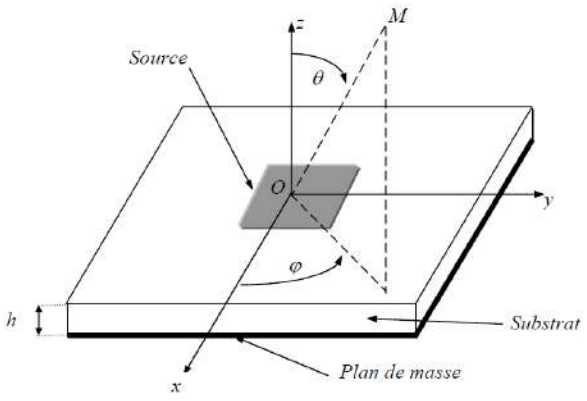


FIGURE II.5 – Antenne élémentaire carrée

A grande distance, au point M de l'espace, le champ induit par la source est situé dans le plan (U_θ, U_ϕ) , il s'exprime par :

$$\vec{E}(M) = E_\theta(\theta,\phi)\vec{U_\theta} + E_\phi(\theta,\phi)\vec{U_\phi} \tag{II.27}$$

$$E_\theta(\theta,\phi) = F(\theta)\cdot[\cos\phi\cdot J_x(\theta,\phi) + \sin\phi\cdot J_y(\theta,\phi)] \tag{II.28}$$

$$E_\phi(\theta,\phi) = G(\theta)\cdot[-\sin\phi\cdot J_x(\theta,\phi) + \cos\phi\cdot J_y(\theta,\phi)] \tag{II.29}$$

avec :

$$F(\theta) = \frac{-j\omega\mu_0\cdot\cos\theta}{T - j\varepsilon_r\cos\theta\cdot\cot g(k_0 Th)} \tag{II.30}$$

$$G(\theta) = \frac{-j\omega\mu_0\cdot\cos\theta}{\cos\theta - jT\cos\theta\cdot\cot g(k_0 Th)} \tag{II.31}$$

avec

$$T = \sqrt{\varepsilon_r\cdot(1 - j\tan\sigma) - \sin^2\theta} \tag{II.32}$$

- J_x et J_y : courants de surface de l'antenne imprimée.
- k_0 : nombre d'onde.
- L_y : longueur de l'antenne.
- L_x : largeur de l'antenne.
- $\tan\sigma$: tangente des pertes dans le substrat.
- $G(\theta)$:est une fonction quelconque de θ, a et ϕ étant des constantes.
- $F(\theta)$: fonction de rayonnement en champ de l'antenne.
- U_θ : est un vecteur unitaire dans la direction de propagation θ.
- U_ϕ : est un vecteur unitaire dans la direction de propagation ϕ .

II-4 MÉTHODES D'ANALYSES DES ANTENNES MICRORUBANS

II-4 .1 Méthode des éléments finis FEM

Définition

Méthode des éléments finis FEM (Finite Element Method), c'est une méthode numérique pour solutionner des problèmes dont la structure est suffisamment complexe. Son principe consiste à diviser l'espace d'étude (structure) en une grande nombre des petites régions (tétraèdres) appelé «éléments »(La Figure II.6), puis à calculer localement le champ électromagnétique dans chacun de ces éléments.

Cette approche réduit considérablement la complexité de la structure. Elle permet ainsi de transformer le système des équations de MAXWELL en un système des équations matricielles dont la solution est évidente par les méthodes numériques traditionnelles.

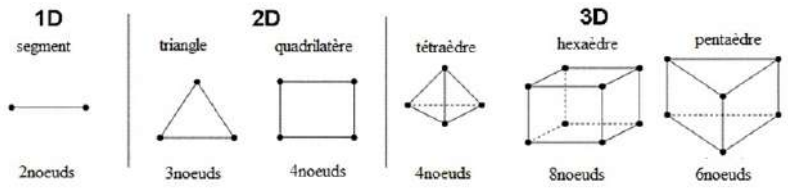


FIGURE II.6 – Quelques types d'éléments en dimension différent

L'avantage de la méthode des éléments finis est lié au fait que la forme tétraédrique et la variation des dimensions des cellules élémentaires caractérisant le volume discrétisé, donne au maillage d'une très grande souplesse.[21]

Algorithme de résolution FEM

De manière générale, applicable à toutes sortes des problèmes des équations différentielles, la résolution par la méthode des éléments finis suit les étapes clés suivantes :

* Étape 1 : Formulation variationnelle Application de l'équation d'onde dans le domaine d'étude

$$\vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu_r} \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) - k_0^2 \varepsilon_r \vec{E}(\vec{r}) = 0 \qquad \text{(II.33)}$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = -\frac{1}{j\omega\mu_r}\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) \tag{II.34}$$

* Étape 2 : Découpage et formulation éléments finis Dans chaque élément du domaine considéré, les valeurs des champs contins $\vec{E}$ et $\vec{H}$ sont approchées par des valeurs discrètes dont les inconnues nodales sont notés E_i et H_i. Le résultat de cette étape sera donc un système des équations linéaires correspondant aux vecteurs champs électrique et magnétique $\vec{E}$ et $\vec{H}$.
* Étape 3 : résolution Après avoir construit un système des équations linéaires (matriciel), l'étape suivante consiste à résoudre ce système d'équations. A cet effet, diverses méthodes de résolution des systèmes linaires sont susceptibles d'être appliquées, les contraintes des choix sont souvent :
  - le temps de calcul nécessaire.
  - le degré de précision des résultats obtenus.
  - convergence et stabilité du calcul numérique.[21]

II-4 .2 Méthodes des différences finies FDTD

C'est une méthode numérique de modélisation électromagnétique utilise une discrétisation temporelle des équations de Maxwell «transformation des dérivées partielles en différences finies ». Cette méthode agit sur le domaine temporel et permet une visualisation directe des champs électriques et magnétiques. La $FDTD$ est indépendant de la géométrie du système à modéliser et permet de couvrir un large spectre de fréquence avec une seule simulation.

La $FDTD$ a été appliquée à de nombreux domaines d'application :

- Simulation d'antenne (antenne à micro-ruban, réseau d'antenne $\cdots$).
- Étude de composante électroniques actif et passif.
- Propagation optique.
- Fonctionnement des satellites artificiels $\cdots$.[22]

II-4 .3 Méthode des Moments MOM

La technique de résolution la plus efficace dans l'analyse des antennes microbandes est l'application de la méthode des moments. Cette méthode opère dans le domaine spectral. La procédure de résolution consiste à trouver le zéro du déterminent de la matrice impédance. La caractéristique de cette méthode est son indépendance de la source d'excitation. Malgré les avantages de cette méthode, elle souffre de quelques inconvénients tels que :

- La précision exigée pour déterminer les éléments de la matrice d'impédance.
- Le temps de calcul qui est important.
- L'existence des solutions parasites.[29]

II-5 CONCLUSION

Dans ce chapitre on a cité quelques rappelles sur le champ électromagnétique avec un' analyse des équations de "MAXWELL", on a utilisé ses équations de propagation pour étudier le champ électrique et le champ magnétique En régime « Temporale et Harmonique. Les phénomènes de naissance du courant de surface qui représente une des caractéristiques à prendre en considération dans la conception de l'antenne patch. ensuit montré les équations de maxwell pour vérifier les équations de propagations dans les deux régimes, ainsi nous avons discuté les conditions aux frontières entre deux milieux et on a étudé comment rayonner une antenne dans une zone lointain (zone fraunhoofer) et vérifié les conditions de source le courent et la densité.

On a vu que la source d'une antenne (le courant « J_s » et la densité «ρ») est provoquée de l'apparence les deux phénomènes, le champ " électrique et le champ électromagnétique".

À la fin de ce chapitre, on a défini les deux les méthodes de l'analyse des antennes les plus utilisées, on la méthode d'élément finie et la méthode de différences finies.

Pour la modélisation numérique des lignes de champ autour des particules dans un dispositif électromagnétique nécessitent impérativement l'utilisation d'un outil numérique de calcul comme le logiciel (COMSOL Multiphysics) qui donnera les grandeurs du champ magnétique dans chaque point du domaine d'étude. Dans le chapitre suivant nous allons exploiter cette structure de modélisation pour simuler notre dispositif électromagnétique.

Chapitre III

LOGICIEL COMSOL ET SIMULATION

III-1 INTRODUCTION

Comsol-Multiphysics, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout est un outil de résolution des équations aux dérivées partielles «PDE »par la méthode des éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données des équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, comme l'électrostatique, magnéto-statique, électrodynamique l'écoulement de fluides ou encore la déformation des matériaux ainsi que multiple phénomènes physiques modélisées en PDE.

La première version du logiciel COMSOL Multiphysics a été publié en 1998 par le groupe COMSOL et il était nommé Toolbox. À l'heure de début, ce logiciel est uniquement appliquée dans le domaine de la mécanique des structures. L'environnement de simulation multiphysique COMSOL facilite toutes les étapes du processus de modélisation définir votre géométrie, spécifiant votre physique, maillage, la résolution et ensuite afficher des résultats en post-traitement.

Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes multi-physiques, particulièrement adapté à la micro-électronique. Il est ainsi possible d'obtenir la déformation d'une membrane due à la pression dans un liquide par exemple. Ou encore l'élévation de température dans un conducteur due au passage d'un courant électrique.[24, 25]

III-2 DÉFINITION DU COMSOL

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multiphysiques.[26]



FIGURE III.1 – Logo de logiciele comsol

III-3 PRINCIPE D'UTILISATION

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les étapes du processus de modélisation sont intégrées dans une seule interface. Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non-linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab. Ce logiciel est multiplateforme (Windows, Mac, Linux). En plus des physiques précitées, COMSOL Multiphysics autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algébro-différentiels (EAD) sont également possibles.[24]

III-3 .1 Les différentes étapes du processus de modélisation

La modélisation du processus avec COMSOL Multiphysics se résume en 6 étapes.

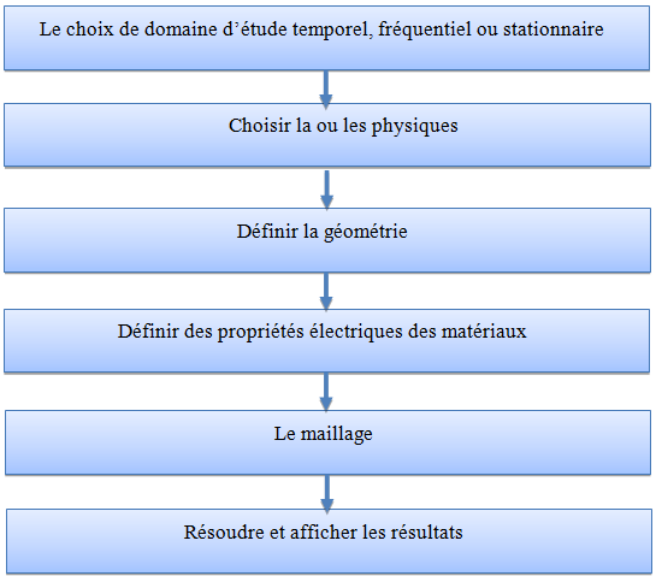


FIGURE III.2 – Diagramme des étapes de conception avec COMSOL

III-4 AVANTAGES DE COMSOL-MULTIPHYSIQUES

Le principal but de la création de COMSOL Multiphysics est d'avoir un logiciel où les scientifiques et les ingénieurs peuvent formuler à l'aide de l' interface utilisateur n'importe quel système d'EDP sur la base des lois de la physique et surtout de se baser sur les zones les plus communes dans la physique et en génie.

Cette interface est basée sur un interpréteur d' équation qui formule une discrétisation par éléments finis, par le système entièrement couplé. Des interfaces de modélisation prédéfinis pour les différents domaines de la physique appliquée.

Grâce à la technologie sous-jacente, les propriétés, les sources, les puits et les conditions aux limites peuvent être des fonctions des variables modélisées et leurs dérivées partielles. Les équations complètes sont également disponibles dans l'interface utilisateur pour une manipulation.

On résume les principaux raisons comme suivant :

- il est spécialisé dans la résolution de problèmes électromagnétiques.
- il permet de prendre en compte la présence de plusieurs diélectriques.
- il permet de modéliser une surface conductrice de faible épaisseur (couche de pollution).
- il permet de travailler en régime statique ou quasi-statique (50 Hz).[27]

III-5 CHOIX D'UTILISATION MODÈLE COMSOL

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui qui permettra de créer une nouvelle page de simulation, vérifier les physiques et bien entendu d'obtenir de l'aide. On choisir "Model Wizard" dans la section model de la fenêtre "New", COMSOL nous demande par la suite choisir la dimension de l'espace dans laquelle nous voulant travailler, c'est la fenêtre "Select Space Dimension".

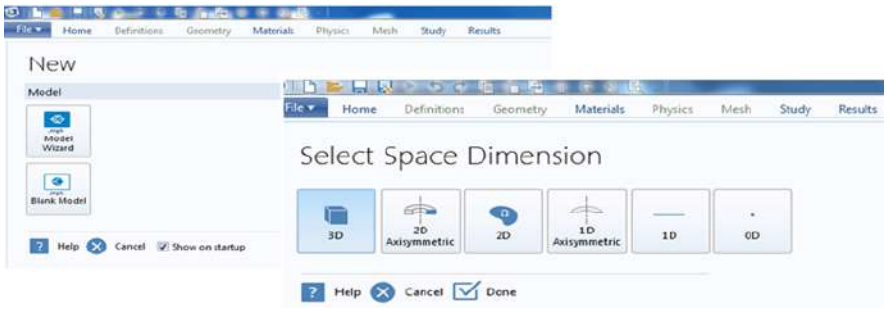


FIGURE III.3 – Fenêtre principale de COMSOL-Multiphysique et la fenetre "Select Space Dimension" en cascade

Il nous reste de spécifier le ou les physiques qui seront utilisés. COMSOL spécifie le modèle mathématique approprié a chaque physique. L'avantage ici c'est de pouvoir choisir plusieurs physiques, le logiciel se charge de faire le couplage entre eux, Nous pouvons proposer des variables pour chaque modèle, il est possible de choisir les propriétés du mode d'application et même la forme de l'équation, si non COMSOL le fait par défaut.[25]

Il nous reste de spécifier le ou les physiques qui seront utilisés. COMSOL spécifie le modèle mathématique approprié a chaque physique. L'avantage ici c'est de pouvoir choisir plusieurs physiques, le logiciel se charge de faire le couplage entre eux, Nous pouvons proposer des variables pour chaque modèle, il est possible de choisir les propriétés du mode d'application et même la forme de l'équation, si non COMSOL le fait par défaut.[25]

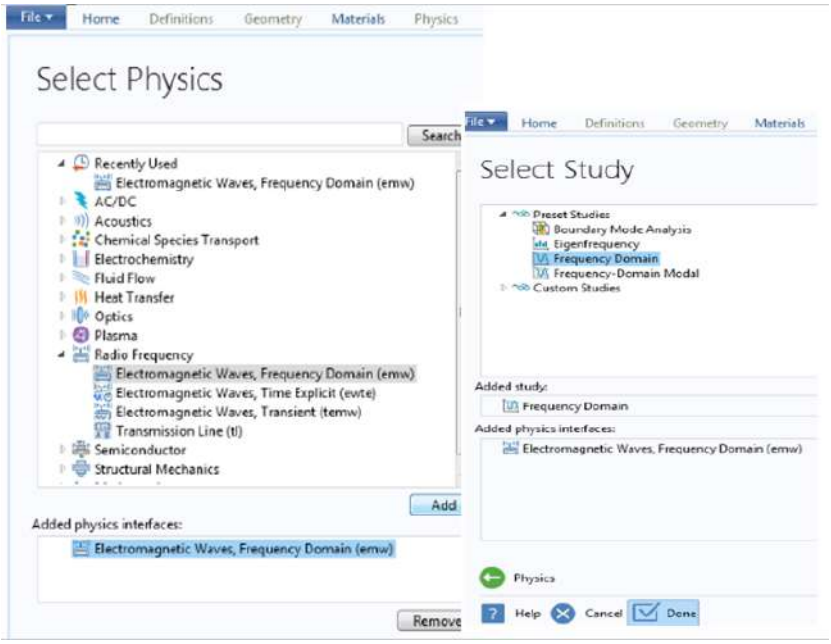


FIGURE III.4 – Fenêtre "Select Physique" et "Slect Study" de Comsol-multphysics en cascade

III-6 L'INTERFACE UTILISATEUR DE COMSOL 5.1

Lorsque le ou les modèles ont été choisis, l'écran général apparaît.Nous allons donc d'abord construire la géométrie du problème. La G.U.I permet de créer le domaine sur lequel on cherche à résoudre l'E.D.P a l'aide de commandes classiques de logiciels de dessin (rectangles, lignes brisées, ellipses). On peut donc dessiner un large éventail de domaines différents, L'interface de COMSOL est divisée en cinque parties. [25]

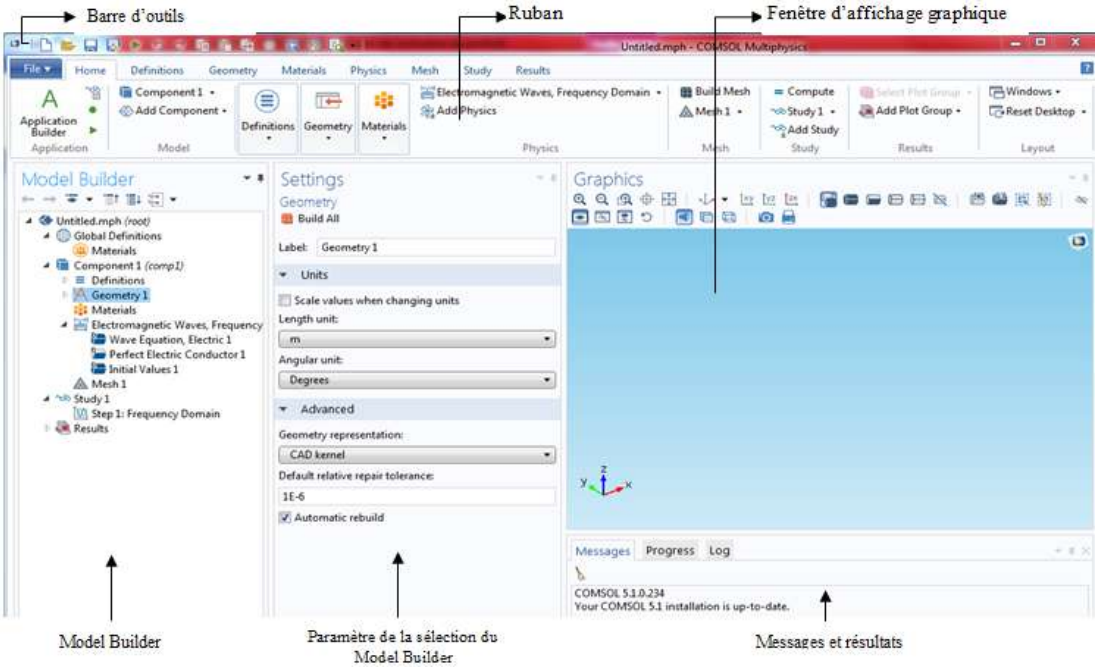


FIGURE III.5 – L'interface d'utilisateur sur le COMSOL MULTIPHYSIQSIC

III-6 .1 La barre d'outils

La barre d'outils Accès rapide l'utilisation de ces boutons pour donner l'accès à des fonctionnalités telles qu'ouvrir, Enregistrer, Annuler, Rétablir, Copier, Coller et Supprimer. Vous pouvez personnaliser son contenu à partir de la liste Personnaliser la barre d'outils (la flzche dirigi=ée vers le bas à droite de la barre d'outils).[28]

III-6 .2 Ruban

Le ruban situé en haut du bureau donne accès aux commandes utilisées pour effectuer la plupart des tâches de modélisation. Le ruban n'est disponible que dans la version "Windows®" de l'environnement de bureau COMSOL et est remplacé par des menus et des barres d'outils dans les versions "OS X" et "Linux®". Cliquez sur le bouton (Application Builder) pour passer de (Model Builder) à (Application Builder) et commencer à créer une application basée sur votre modèle.[28]

Home

L'onglet Home contient toute fonction basic pour une simulation.

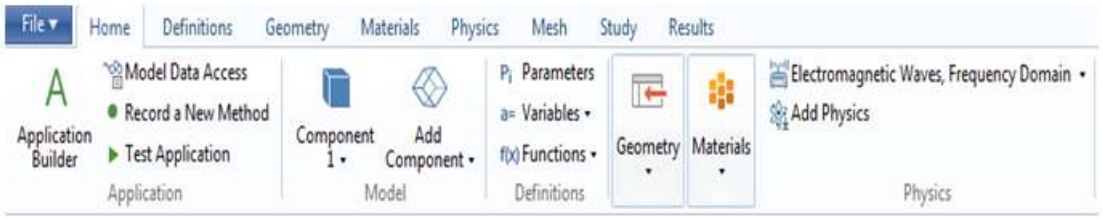


FIGURE III.6 – La barre de Home

C'est la fenêtre des paramètres principale pour entrer toutes les spécifications du modèle, y compris les dimensions de la géométrie, les propriétés des matériaux, les conditions aux limites et les conditions initiales, et toute autre information dont le solveur aura besoin pour effectuer la simulation.[28]

Définitions

Beaucoup des modes d'application suggèrent un ensemble des types d'analyse comme propriété de mode d'application. Les types d'analyse possibles varient avec le domaine d'application. Types que vous pouvez compter voir inclure stationnaire, fréquentielle, coupure, dépendant du temps, et analyses paramétriques.

Nous pouvons faire des arrangements d'équation qui sont incompatible avec le solutionneur que nous choisissant.[25]



FIGURE III.7 – La barre de Défintions

Geometry

Dessiner la géométrie,C'est l'étape suivante dans notre étude selon le mode de dessin 1D, 2D, 3D par défaut COMSOL fournit une barre d'outils très varier et complète pour la création de différente géométries.

le but ici est de défini les paramètres physique qui définissent le domaine : (constante diélectrique, charge volumique etc...) les paramètres sont liés au modèle physique étudie, il est également possible d'écarter un des domaines des modèle étudie).[25]

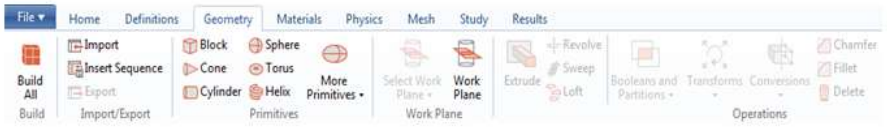


FIGURE III.8 – La barre Geometry

Physics

On définir ensuite le comportement des domaines en leur associant leurs propriétés. Ensuite, on impose des conditions sur certaines frontières, et éventuellement sur certains points. Cette opération est à refaire pour chaque modèle utilisé. Une fois la physique du problème posée.[25]

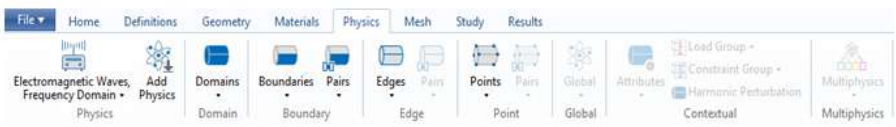


FIGURE III.9 – La barre Physics

Mesh

Le maillage est un partition du modèle de la géométrie en petites unités des formes simples. Nous pouvons créer un maillage libre dans Comso-lMultiphysics en cliquant sur le bouton "Build Mesh" sur la barre d'outils principale. Il peut être utilisé sur tous types de géométrie. Il crée des maillages non structurés qui n'ont pas de restrictions en termes de distribution des éléments.



FIGURE III.10 – La barre Mesh

Pour une géométrie 3D le générateur de maille divise les sous-domaines en éléments pyramidales de maille. Si la frontière est courbée, ces éléments représentent seulement une approximation de la géométrie originale.[25]

III-6 .3 Model Builder

Dans cette fenêtre on retrouve le constructeur du modèle où il est possible de définir des variables et des autres paramètres du problème (Parameters), le modèle (Model) où se retrouvent la géométrie (Geometry), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles de physique s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (Mesh).

Le constructeur du modèle comporte aussi le type des problèmes et les paramètres de solveur (Study) et les options d'affichage et de post traitement des données (Results). La colonne directement à droite comporte les options relatives à ce qui est sélectionné dans le constructeur du modèle, par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans la géométrie. C'est aussi à cet endroit que les paramètres initiaux de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis.

La fenêtre Model Builder avec son arbre de modèle et les boutons de la barre d'outils associés vous donne un aperçu du modèle et de toutes les fonctionnalités et opérations nécessaires pour construire et résoudre un modèle ainsi que pour traiter les résultats.[26]

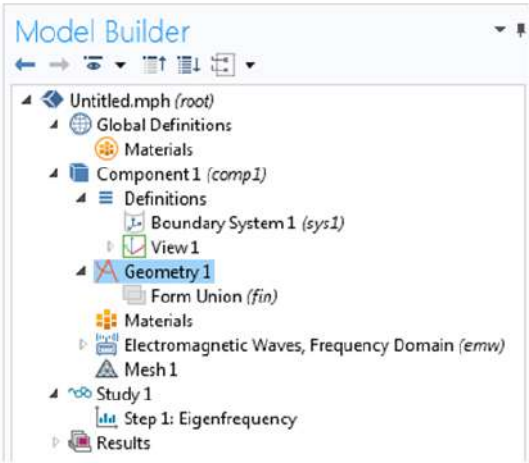


FIGURE III.11 – Model Builder

III-6 .4 Setting Geometry

Au milieu du logiciel on trouve la déclaration des paramètres électriques, physiques et même mécaniques de chaque domaine tels que la conductivité, l'excitation du courant et la tension l'induction etc· · · .

C'est une fenêtre des réglages le clique sur n'importe quel nœud dans l'arbre du modèle pour voir sa fenêtre paramètres associée affichée à côté du model builder, par exemple le paramètre 'Geometry' donne la fenetre suivante :[28]



FIGURE III.12 – Setting Geometry

III-6 .5 Graphics

En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (Graphics) permet de représenter et visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer la taille de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel etc···, Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi.[25]

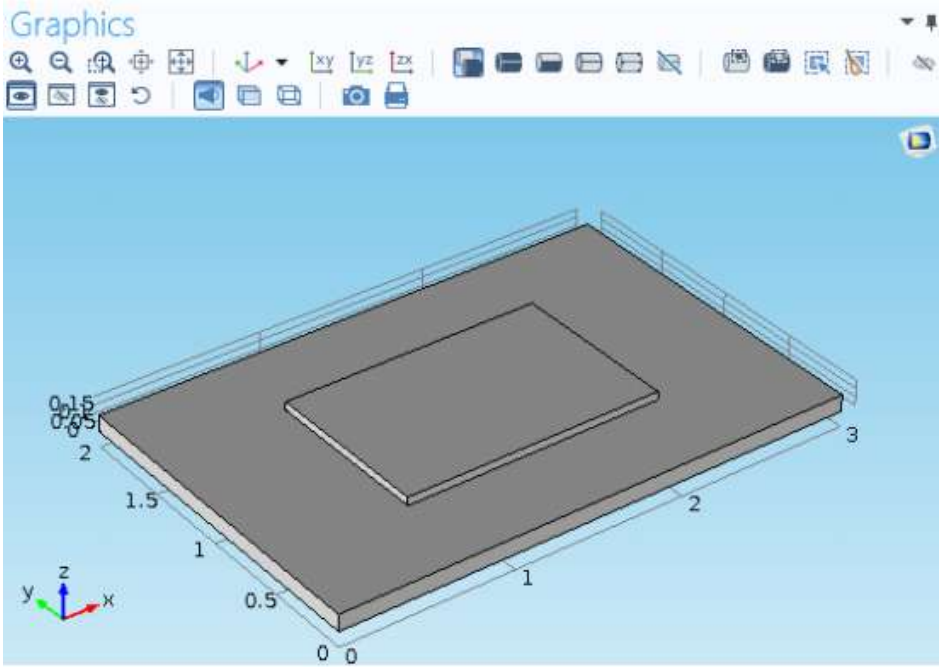


FIGURE III.13 – Modèle de geométrie dans la fenetre de "Graphics"

III-6 .6 Messages et résultats physiques

Finalement, directement au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permet de visualiser les messages des erreurs, le progrès des simulations. la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée.[24]



FIGURE III.14 – Messages et résultats physiques

III-7 SIMULATION

Dans cette section on va montrer les étapes à suivre dans le COMSOL afin de modéliser la structure de l'antenne patch. Pour la conception on doit choisir le matériel du plan de masse à partir du menu déroulant "Material" offrant une librairie des plusieurs matériaux par exemple aluminium, "si on ne trouve pas le matériau répondant à nos besoins, on peut créer un". Ensuite en fait d'une plaque rayonnante d'un substrat diélectrique. Ce substrat à son tour est placé sur un plan parfaitement conducteur alimenté par une sonde coaxiale.

La première étape dans la création d'un modèle COMSOL Multiphysics est de consiste à crée un modèle de géométrie 3D, et pour cette dimension de l'espace on doit respecter les étepes suivant :

1) Dans le navigateur de modèle, cliquez sur le Model "Wizard", puis sélectionnez "3D" dans la liste "Espace Dimension". Ensuite pour sélectionner la physique on ouvre l'onglet "Radio Frequency" et on choisit "Electromagnetic Wave, Frequency Domain " et on ajoute, Puis pour sélectionner "Study" on choisi "Fréquence Domaine" et on clique sur "Done".

2) Pour la construction de la géométrie, dans la fenetre de Model Builder on Utilise le menu de dessin pour créer la géométrie 3D.

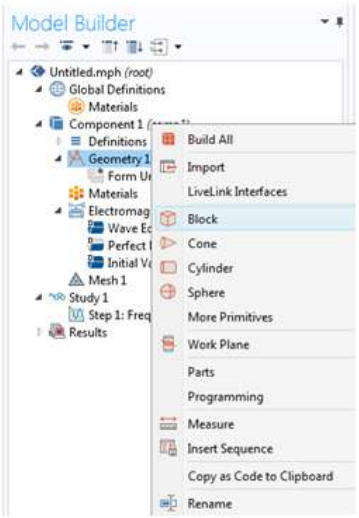


FIGURE III.15 – Menu de dessin de la géométrie

cliquez-droit sur "Geometry 1" et choisissez "Block" pour dessiner un rectangle, Dans notre simulation on a selectionné 5 Block pour la création de l'antenne patch « la masse, le conducteur, le substrat, patch et la fente ».

3) à partir de tableau suivant, on a remplis les paramètres et les valeurs de chaque Block dans la fenêtre "Settings", ça veut dire localisez la section « X, Y et Z » et la taille de « la largeur, la longueur et l'épaisseur ».

Settings

Parameters

Parameters

Name	Expression	Value	Description
L_masse	4[mm]	0.004 m	Longueur de masse (x)
l_masse	4[mm]	0.004 m	Largeur de masse (y)
thickness_f	0.1[mm]	1E-4 m	épaisseur de la masse (z)
l_ext_feed	2[mm]	0.002 m	Longueur d'alimentation...
w_feed	0.1[mm]	1E-4 m	Lageur d'alimentation (x)
E_aliment...	0.1[mm]	1E-4 m	épaisseur d'alimentation...
L_substrat	4[mm]	0.004 m	Longueur de substrat (x)
l_substrat	4[mm]	0.004 m	Largeur de substrat (y)
E_substrat	0.1[mm]	1E-4 m	épaisseur de substrat (z)
L_patch	1.7[mm]	0.0017 m	Longueur de patch (x)
l_patch	1.63[mm]	0.00163 m	Largeur de patch (y)
E_patch	0.05[mm]	5E-5 m	épaisseur de patch (z)
L_slot	0.605[mm]	6.05E-4 m	Longueur de slot (x)
l_slot	0.1[mm]	1E-4 m	Largeur de slot (y)
E_slot	0.1[mm]	1E-4 m	épaisseur de slot (z)
Lamda0	c_const/f0	0.084927 m	Longueur d'onde
f0	3.53[GHz]	3.53E9 Hz	Fréquence
p_sub_eps	7.8	7.8	patch substrat permittivité
f_sub_eps	7.8	7.8	feed substrat pemittivité

FIGURE III.16 – Tableau des paramètres

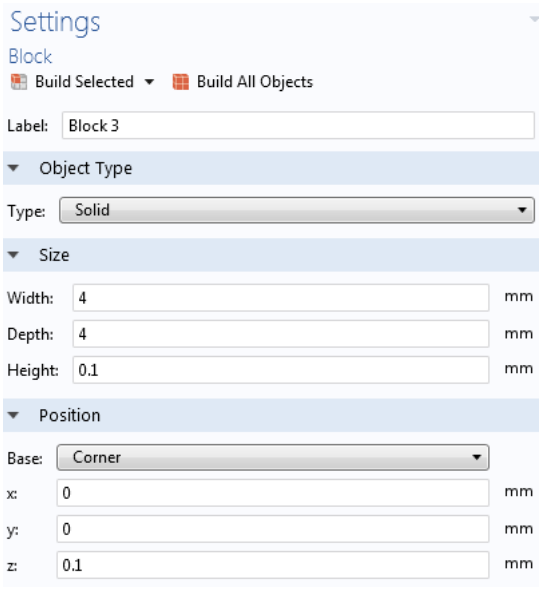


FIGURE III.17 – fenêtre des paramètres de substrat

4) Pour avoir et illustrer la forme du structure, cliquez sur le bouton construire tout (Build all) puis vous pouvez voir la géométrie comme la montré dans (La figure III.18) ci-dessous.

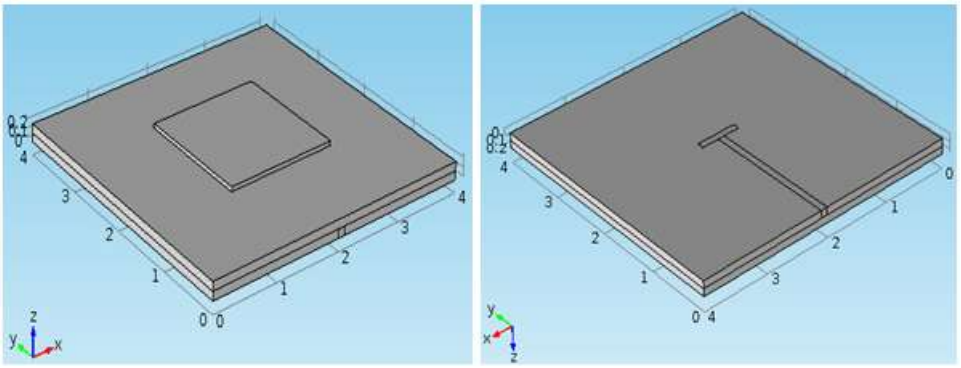


FIGURE III.18 – La géométrie de l'antenne Patch en 3D

5) Pour fait une fente "ouverture" sur l'antenne cliquez-droit sur "Geometry 1" puis sur "Booleans and Partitions" et choisissez "Difference" Pour élever le "Block" qui l'on veut.

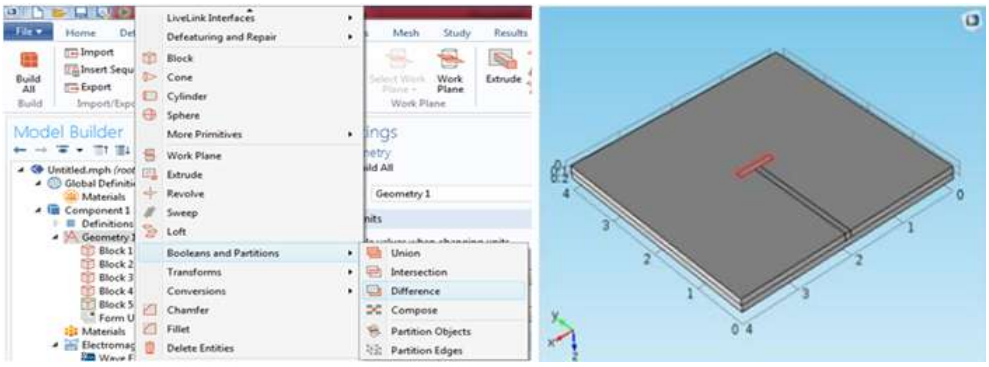


FIGURE III.19 – Fenêtre de dessin et La géométrie de l'antenne Patch en 3D avec fente

6) Pour la définition du matériau, on doit défini pour chaque volume le matériau utilisé. On utilise une bibliothèque permettant de définir simplement toutes les constantes physiques du matériau, par exemple pour le plan de patch et alimentation, on doit choisir " le cuivre " et pour le substrat les matériaux utilisées sont : céramiques, semi-conducteurs, ferromagnétiques et synthétiques, etc.

Le substrat diélectrique affecte le comportement et les performances électromagnétiques de l'antenne. On préfère souvent utiliser des substrats à faibles pertes diélectriques qui favorisent le rendement de l'antenne et ceux à permittivité relative faible qui améliorent le rayonnement tout en diminuant les pertes par ondes de surface pour une hauteur donnée. Voici les étapes que nous avons suivi pour définir les matériaux, dans la barre de "Materials" , cliquez sur "Add Material" il illustre à droit une liste qui consiste tous les matériaux

disponibles. Avec l'ouvrage de l'ongle "Material Library", nous pouvons choisir ce qu'on veut. Par exemple dans notre étude le matériau de la masse, c'est "l'Aluminium ".

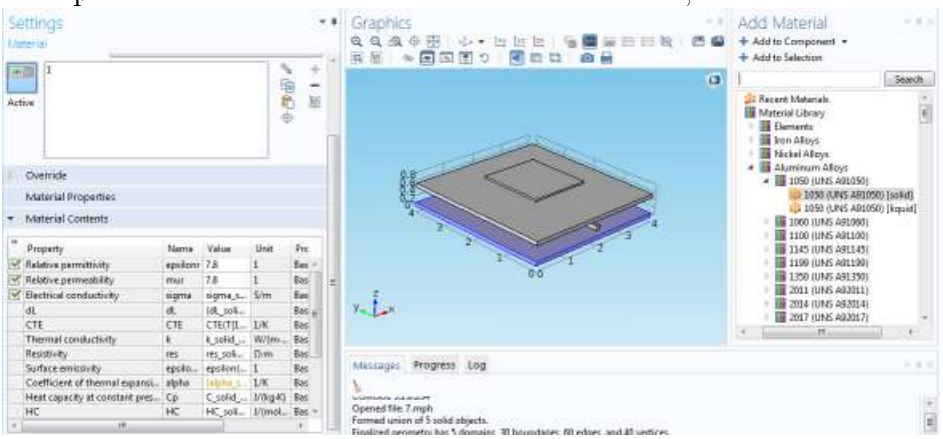


FIGURE III.20 – la liste des matériaux et déclaration de ses paramètres

7) L'étape suivante, c'est le choix des équations de chaque surface, sur le « Ruban » ouvrer l'ongle de « Physics », on trouve des différents domaine des équations, il existe les conditions aux limites Concernant le milieu à étudier, par exemple cliquer sur « Domains » et dans la liste choisir « initials values »... etc.

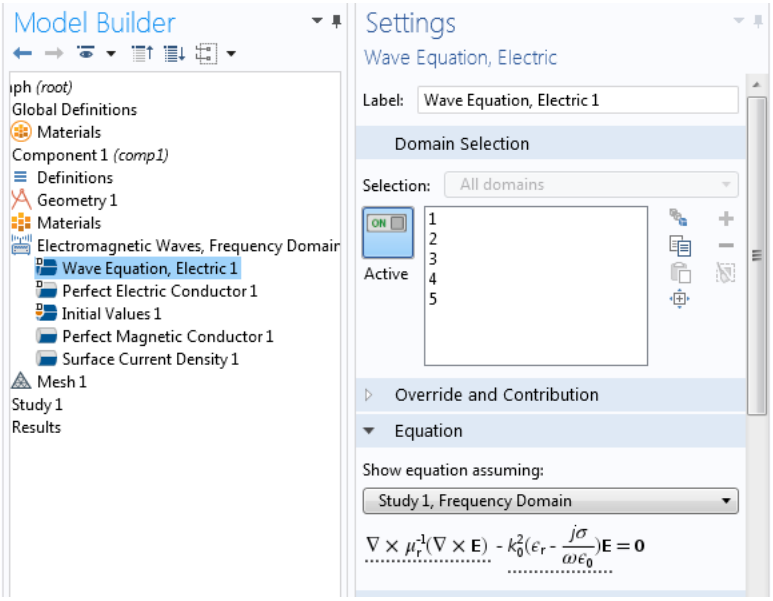


FIGURE III.21 – Illustration la liste des domaines des équations

8) L'étape suivante de la structure c'est le Maillage, Pour le faire cliquez sur "Mesh" et choisissez comme taille de maillage. Cliquez sur "Build All" , il est maintenant possible de voir le maillage triangulaire.(La figure III.22) suivante est une vue d'ensemble du maillage par des mailles de forme tétraèdre d'une antenne imprimée rectangulaire alimentée par une ligne micro-ruban, ce maillage est réalisé par le logiciel COMSOL basés sur la méthode des éléments finis.

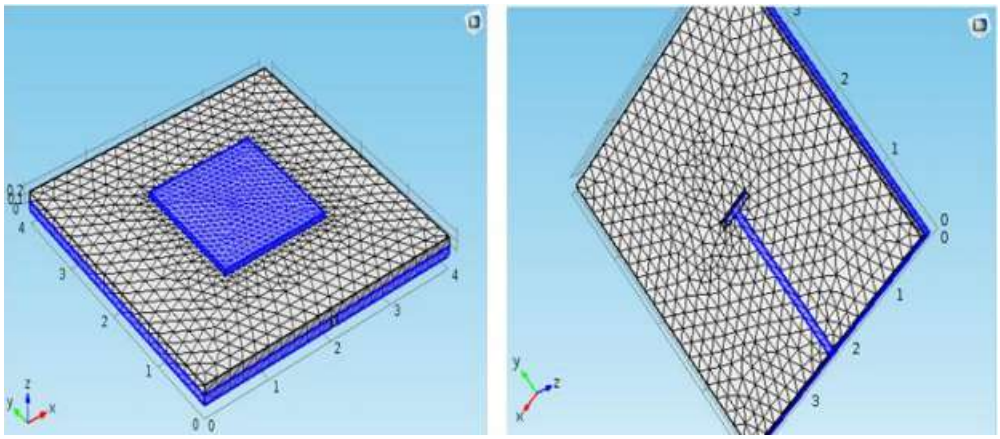


FIGURE III.22 – Présente le Maillage de l'antenne patch rectangulaire

III-8 RÉSULTATS

III-8 .1 Paramètre S

Le paramètre S est le coefficient qui préoccupe les concepteurs des antennes imprimées car il représente le coefficient de réflexion qui joue le rôle de perturbation sur la transmission des données.

On rappelle que ce paramètre S_{11} est le rapport entre la puissance utile et la puissance fournie. La bande passante peut être calculée comme on a cité déjà dans (le chapitre I) on la mesure avec ces données « les fréquences de coupure inférieures et supérieures ».

(La Figure III.23) montre les paramètres S_{11} et S_{21} en fonction de la fréquence et met en évidence la bande passante à $-10dB$. Dans cet exemple la bande passante qui s'exprime en (GHz) est de $100Mhz$.

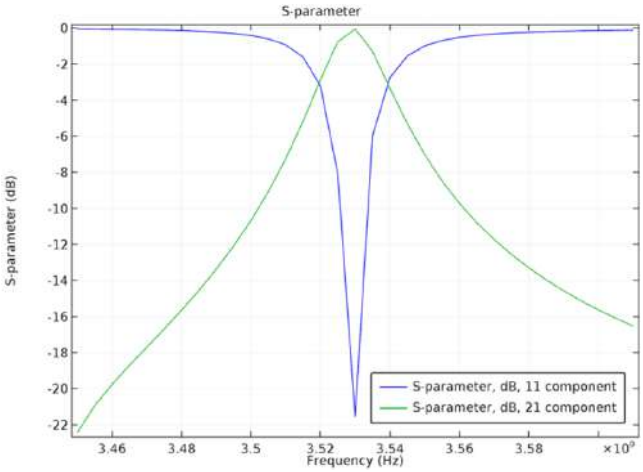


FIGURE III.23 – Evolution du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence

A partir de graphe précédent, on remarque que la fréquence de résonnance est « $f_{res} = 3,53GHz$», correspond à la fréquence pour laquelle l'antenne est la meilleur adaptée, produisant un coefficient "S_{11}" de l'ordre de « -22 dB » , Et la bande passante entre $[3.525 : 3.535]GHz$, « $BW = 100MHz$ ».

C'est-à-dire pour laquelle le coefficient de réflexion est le plus faible. Sur une bande passante donnée, il est possible d'observer plusieurs minimas donc plusieurs fréquences de résonance.

III-8 .2 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est une représentation géométrique de la façon dont une antenne collecte ou rayonne l'énergie électromagnétique dans l'espace. Cette représentation peut se faire soit en trois dimensions soit en deux dimensions sur des diagrammes polaires présentant différents plans. Le diagramme de rayonnement (La figure ci-dessous) permet de localiser les zones de l'espace entourant l'antenne et les directions où le rayonnement est intense ou faible.

(Les figures III.24 et III.25) présentent, respectivement, les diagrammes de rayonnement3D et 2D dans les plans E.

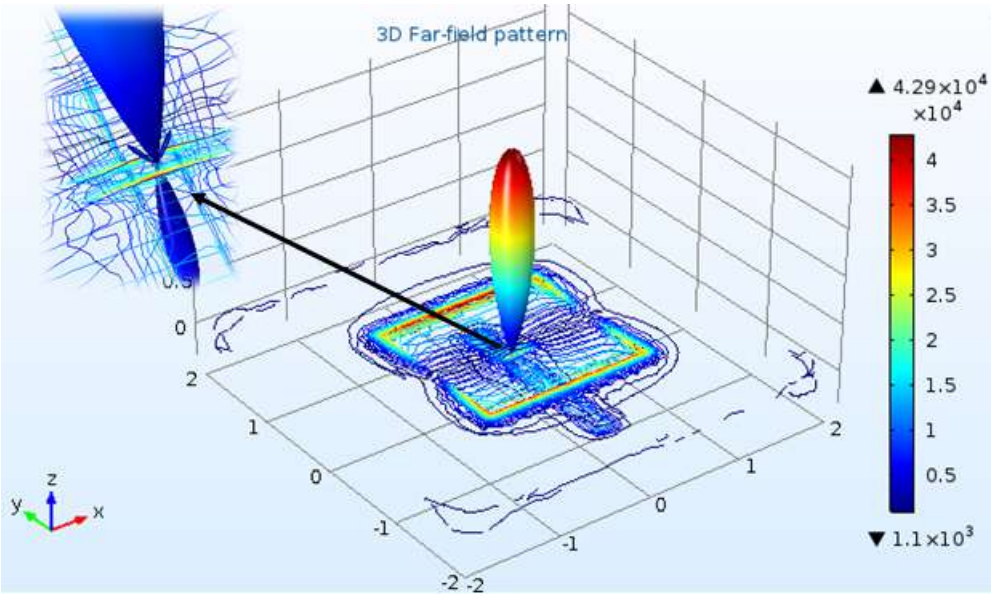


FIGURE III.24 – Diagramme de rayonnement 3D

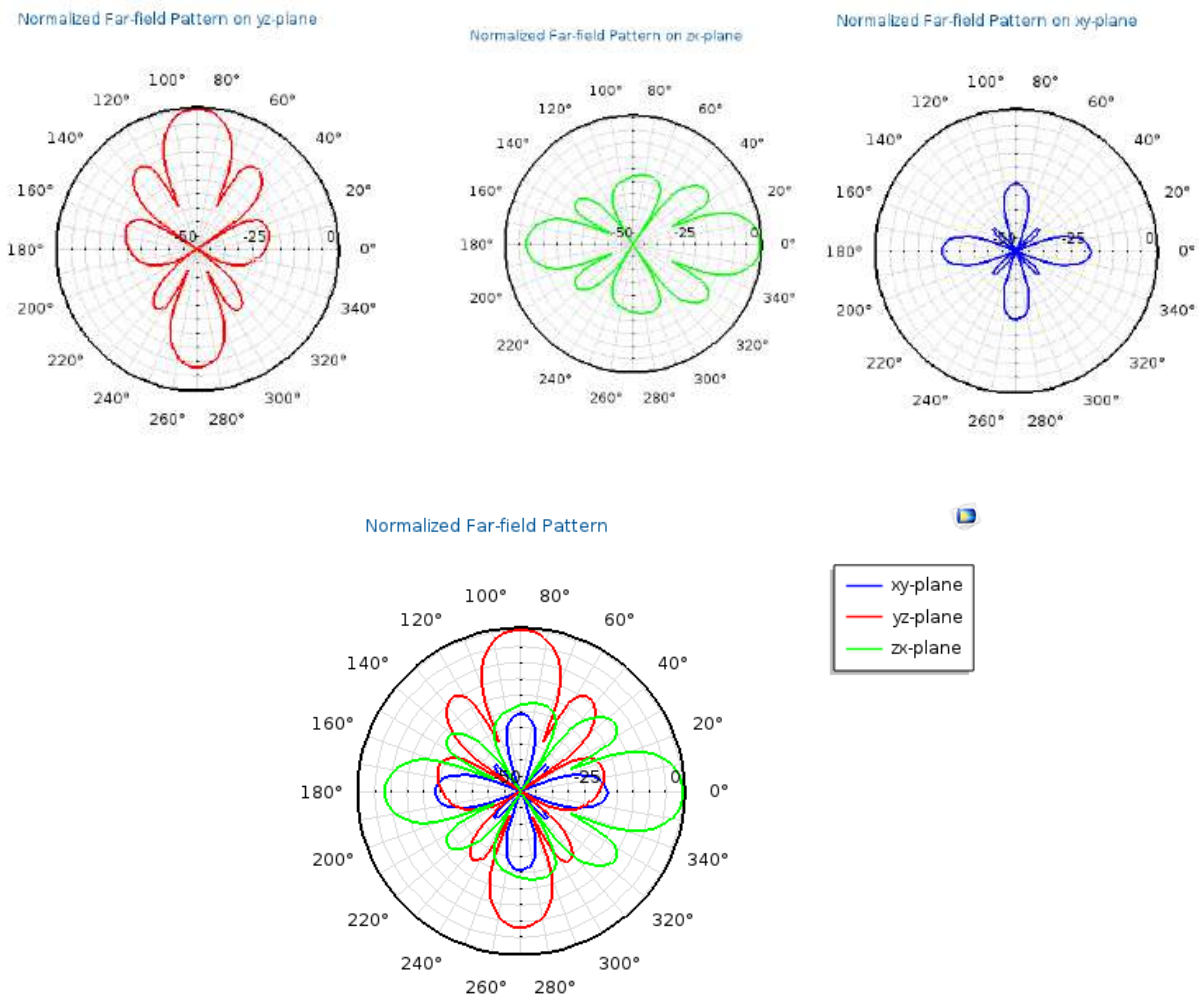


FIGURE III.25 – Diagramme de rayonnement (2D) suivant le plan "yz", "zx" et "xy"

III-8 .3 Répartition du champ électrique E

(La figure III.26) présente, la répartition du champ électrique de la structure simulée. Il est notable que le maximum de champ « E » se trouve concentré aux extrémités du patch, ce qui explique le fait que le rayonnement de ce type d'antenne s'effectue principalement par ses bords.

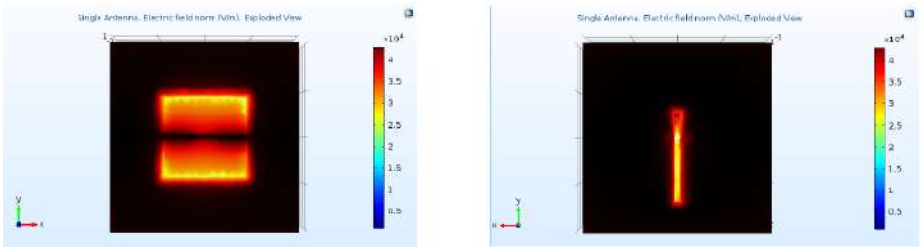


FIGURE III.26 – Répartition du champ électrique E

III-8 .4 Effet des Caractéristiques géométriques

Dans cette phase, nous allons extraire l'effet des paramètres géométriques (substrat, et l'ouverture (fente) sur les caractéristiques de l'antenne.

III-8.4.1 Influence de la longueur du substrat

Nos calculs ont été effectués pour un substrat diélectrique de longueur $L = 6mm$,Les résultats obtenus sont implantés dans (la figure III.27).

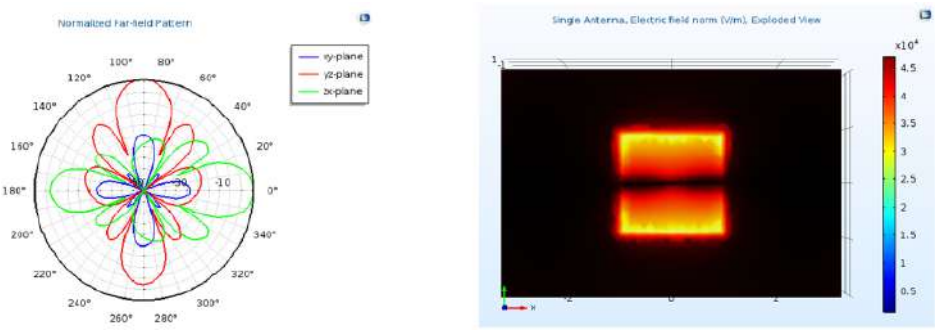


FIGURE III.27 – Influence de la longueur de substrat sur le diagramme de rayonnement et la répartition de champ électrique

III-8.4.2 Influence de la largeur du substrat

Dans le but d'extraire l'effet de la largeur du substrat ($l = 6mm$) sur les caractéristiques de l'antenne patch, nous avons calculé le coefficient de réflexion ; le diagramme de rayonnement et le champ $\vec{E}$ .Les résultats de simulation sont implantés dans (la figure III.28).

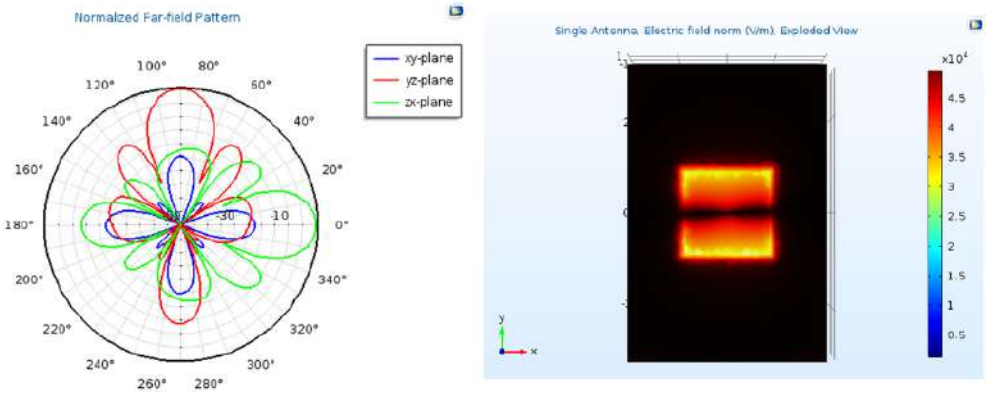


FIGURE III.28 – Influence de la larguer de substrat sur le diagramme de rayonnement et la répartition de champ électrique

III-8.4.3 Influence de l'épaisseur du substrat

Maintenant, nous faisons varier l'épaisseur du substrat : $e = 0.1mm$a $0.3mm$.Les résultats de simulation sont implantés dans (la figure III.29).

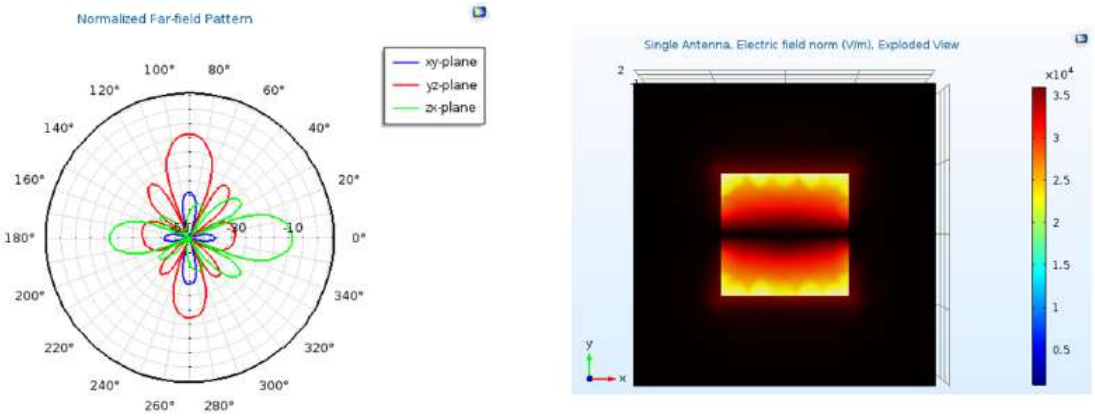


FIGURE III.29 – Influence de l'épaisseur de substrat sur le diagramme de rayonnement et la répartition de champ électrique

III-8.4.4 Influencede la permittivité du substrat

Les résultats de simulation sont implantés dans (la figure III.30) pour une permittivité du substrat est égale 12.

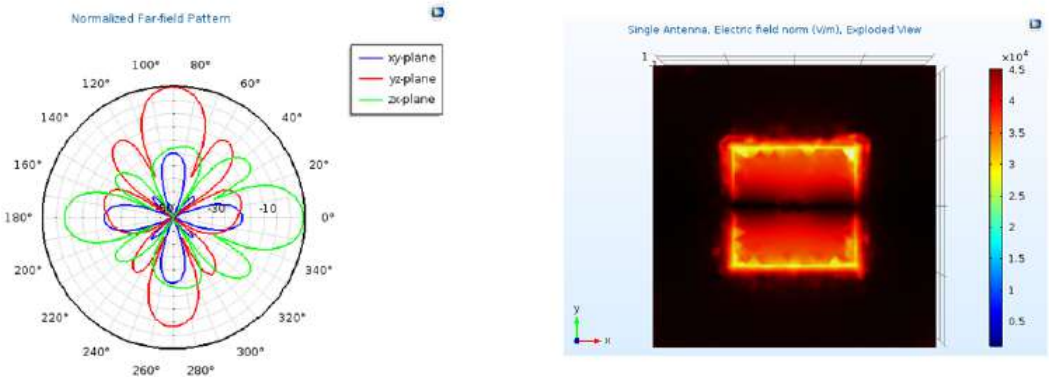


FIGURE III.30 – Influence de la permitivité de substrat sur le diagramme de rayonnement et la répartition de champ électrique

III-8.4.5 Influence des dimensions de l'ouverture (fente)

Nous exploitons la même antenneet, nous faisons varier les dimensions de l'ouverture (L =0.605mm et l=0.1mm à L =1.1.mm et l=0.4mm).voir (la figure III.31) au dessous .

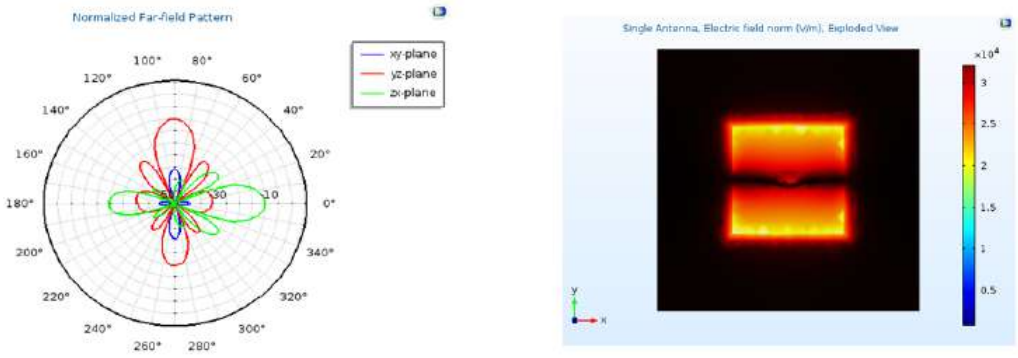


FIGURE III.31 – Influence de la longueur et la larguer de la fente sur le diagramme de rayonnement et la répartition de champ électrique

SUBSTRAT				FENTE		S_{11}	BP	Remarque
ε_r	Ls [mm]	ls [mm]	es [mm]	L [mm]	l [mm]	[dB]	[MHz]	
7.8	4	4	0.1	0.605	0.1	-22	100	L'antenne présente une bonne adaptation mais la bande passante de l'antenne reste limitée
7.8	4	4	(0.3)	0.605	0.1	-14.56	200	une mauvaise adaptation
(12)	4	4	0.1	0.605	0.1	-11.27	80	La permittivité relative influe considérablement sur le coefficient de réflexion
7.8	(6)	4	0.1	0.605	0.1	-14.05	100	une mauvaise adaptation +la propagation des ondes de surface
7.8	4	(6)	0.1	0.605	0.1	-16.47	120	la fréquence de résonance est inversement proportionnelle à la la largeur du patch.
7.8	4	4	0.1	(1.1)	(0.4)	-20.01	70	on est bien adapté mais on n'a pas une bande passante suffisante

TABLE III.1 – Spectre microonde et les applications des antenne

III-9 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a acquis des informations sur un nouveau logiciel (COMSOL MULTIPHYSICS 5.1), où on ne l'a pas utilisé dans les années précédentes avec cette étude. Grace à cette étude, on va connaître comment doit faire pour réduire les pertes, augmen-

ter le gain et changer la fréquence dans la technologie d'antenne micro-ruban (patch) et ça est à cause de changement dans les paramètres (la longueur "L", la largeur "W" et l'épaisseur "H" du substrat ou de la fente ainsi la valeur de permittivité). C'est-à-dire que la fréquence de résonnance est inversement proportionnelle à ces paramètres.

On peut conclure que les résultats de simulation obtenus par COMSOL MULTIPHYSICS sont en étroite conformité avec les attentes théoriques. Ainsi, les fréquences de résonance sont bien estimées, aussi la répartition des champs électromagnétiques valide les conclusions théoriques concernant le rayonnement des antennes patchs, il est primordial de signaler l'importance et l'efficacité de cet outil numérique permettant de caractériser des antennes patch fonctionnant à des bandes de fréquence élevées avec une précision très satisfaisante.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail exposé dans ce mémoire de master s'inscrit dans le domaine de la conception d'antennes pour imagerie micro-onde ainsi que leur caractérisation. Dans le premier chapitre, nous avons présenté une généralité sur les antennes imprimées, ensuite dans le deuxième chapitre, on a démontré leurs équations et à la fin, on avait un dernier chapitre qui consiste la simulation et les résultats obtenu.

L'antenne patch est une antenne directive surtout avec l'utilisation des techniques d'adaptation qui ne permettent pas de minimiser le coefficient de réflexion, mais pas de retrouver la fréquence de résonance souhaitée.

Nous avons évoqué l'influence de « la longueur L, la largeur W et l'épaisseur H » du patch sur la fréquence de résonance où ils ont un grand effet par rapport à la largeur sur la fréquence de résonance.

La conception d'une antenne patch a été très enrichissante. D'une part, il nous a permis d'appliquer les connaissances acquises sur le logiciel COMSOL et d'autre part, il nous a donné la possibilité d'approfondir nos connaissances sur les antennes.

Notre travail est complété par l'optimisation d'antenne patch à son point optimal conclu afin d'élargir sa bande passante et couvrir la gamme du travail. Les résultats obtenus ont abouti à plusieurs valeurs du coefficient de réflexion à la fréquence de résonance qui on a choisi la meilleure valeur qui représente le point optimal.

Ce projet nous a donné la possibilité de simulation d'une antenne micro ruban où nous avons remarqué sa performance dans la simulation et leurs avantages. Pour mettre à profit notre travail, nous espérons bien que ce dernier sera implémentera à la pratique notamment dans tous les systèmes cellulaires.

Finalement et comme perspectives, nous proposons de :

- Interpoler les résultats pour le cas d'un réseau d'antennes imprimées afin de tenir compte de l'effet de couplage entre les éléments rayonnants, en utilisant d'autres formes géométriques (circulaire, annulaire, triangulaire...), à l'aide d'autre logiciel électromagnétique 3D.
- reformuler des recommandations à l'intention des concepteurs d'antennes patchs pour le choix du diélectrique convenable selon l'application et la bande de fréquence utilisée.

ANNEXE

SPECTRE MICROONDE ET LES APPLICATIONS DES ANTENNES

Les micro-ondes ou hyperfréquences correspondent à une bande comprise entre 300 MHz et 300 GHz. Les longueurs d'ondes associées sont comprises entre 1 m et 1 mm. C'est pourquoi on parle d'ondes métriques, décamétriques, centimétriques et millimétriques. Pour des plus petites longueurs d'ondes, le domaine est appelé submillimétrique ou quasi-optique. Il correspond à des technologies intermédiaires entre les micro-ondes et l'optique. Le spectre microonde est partagé en différentes bandes de fréquence utilisées dans les différents domaines de télécommunications, comme le montre le tableau suivant :[1]

Bande	Fréquence	Application
L	1 à $2GHz$	Communication mobiles (marine,
S	2 à $4GHz$	aviation, véhicules terrestres...)
C	4 à $8GHz$	Service fixe
X	8 à $12.5GHz$	Applications militaires
Ku	12.5 à $18GHz$	Radionavigation
K	18 à $26GHz$	Exploration de la Terre par
Ka	26 à $40GHz$	sattllite
V	40 à $75GHz$	Radioastronomie
W	75 à $111GHz$	Recherche spatiale

TABLE 2 – Spectre microonde et les applications des antenne

ET INCOVENIENTS DE DIFFERENTES TECHNIQUES D'ALIMENTATIONS

Dans les tableaux, nous énumérons les avantages et les inconvénients des différentes techniques d'affichage sans contact et avec contact.

Méthodes		Avantages	Inconvénients
Alimentation avec contact	Sonde coaxiale	-pas de pertes par 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 faible hauteur -technique de perçage simple jusqu'à 10 GHz	-dans le cas de substrat épais, la réactance inductive supplémentaire apportée par la sonde affecte la bande passante -partie selfique ramenée par l'âme du connecteur à prendre en compte -technique de perçage et de soudure plus délicate en millimétrique -difficile à exciter chaque élément d'un réseau seul
	Ligne microbande	-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	-rayonnement parasite de la discontinuité ligne-aérien -rayonnement parasite possible du circuit de distribution en millimétrique -structure figée après gravure

TABLE 3 – Avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentations avec contact .

Alimentation Sans contact	Par couplage	-dessin du circuit d'alimentation modifiable par rapport aux aériens -bande passante plus large par augmentation de la hauteur	-deux couches de substrat requises -difficulté pour l'intégration de dispositifs actifs et pour la dissipation de chaleur
	Guide d'onde coplanaire	-procédé technologique simple -facilités pour intégrer des dispositifs actifs et dissiper la chaleur résultante -faible rayonnement arrière -transitions simples pour l'intégration de dispositifs actifs et circuits MMIC	-génération de modes de propagation parasites sur les guides d'onde coplanaires après une discontinuité (coude ou tés) nécessitant des ponts à air en millimétrique
	Couplage par fente	-réalisation du circuit de indépendantes -séparation électromagnétique des deux couches -possibilité d'élargir la bande passante en associant la résonance de l'élément rayonnant à celle de la fente	-technologie plus couteuse et complexe (positionnement des 2 couches, 4 faces de métallisation) -intégration sur un support mécanique nécessitant des précautions -rayonnement arrière parasite de la fente lorsque celle-ci résonne au voisinage de l'élément

TABLE 4 – Avantages et inconvénients de différentes techniques d'alimentations Sans contact .

RÉFÉRENCES

Bibliographie

[1] : « AHMED BENOMAR »,Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques. Application aux Réseaux de Télécommunications, Thèse de DOCTEUR, Université DE TLEMCEN Abou BekrBelkaid, 2015.

[2] :Antenne patch, coure universitaire,Ecole nationale de science applique de KHOURIBGA, 2014/2015.

[3] : « M. BELHEDRI ABDELKRIM »,Etude et simulation d'une antenne microbande dans la bande WiFi 5 GHz,Université KasdiMerbah Ouargla25/05/2017,page 28, 33, 38.

[4] : « Maurice Bellanger », Les antennes théorie, conception et application. ODILE PICON ET COIL.

[5] :« ZAOUI BACHIR»,Memoir,Modélisation d'une antenne micro-ruban compacte, soutenu 02/06/2015. page 5,6 ,7.

[6] : »Dr Youssef DAHER » , Memoir, Antenne –Cours universitaire, cour universitaire, Université Libanaise –Faculté de Génie – Branche 1.

[7] : « BELAININE FAYÇAL ABDERAHMEN », Etude de la miniaturisation des antennes par repliement – Application pour la conception d'une antenne 2.4 GHZ, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2013-2014.

[8] : « DOMINIC GRENIER », Antenne et propagation radio, Université Laval Québec, Canada G1V 0A6, Hiver 2017.

[9] :Memoir, Etude et conception de nouvelles topologies d'antennes à résonateur diélectrique dans les bandes UHF et SHF.

[10] : « ALEXANDRE BOYER »,Antennes support de cours enonce de travaux diriges,Institut national des sciences appliquées de Toulouse.

[11] : « RABIH A.SLIM »,Conception Antenne WIFI – Microruban HFSS_Methodologie - Faculté des Ingénieurs en Télécommunications, Informatique.

[12] :Etude et modélisation des antenne Patch, Université de Médéa Dr. Yahia Férès 2012.

[13] :« TOUATI MOHAMED », Conception et simulation d'une antenne micoruban circulaire, 2014.

[14] :http ://www.univbouira.dz/fr/images/uamob/fichiers/Cours/hadach/les%20reseaux%20sans%20fil. Pdf [modifier].

[15] : Antennes & outils et modèles pour la transmission, Institut national des sciences appliquées de Toulouse ,Octobre 2014.

[16] : « FRANCK ASSOUS & PATRICK CIARLET »,Modèles et méthodes pour les équations de Maxwell, 2003.

[17] : « FRANÇOIS MARQUIER », Electromagnétisme ,institut d'optique Graduate school , 2017-2018, page 10.

[18] :Contributions aux méthodes numériques en électromagnétisme, Université de Reims Champagne-Ardenne.

[19] : « TEBACHE SOUFIANE » Méthodes de caractérisation hyperfeéquence des antennes impirimées, Université Mohamed Khider ,le 25/06/2013, page 64.

[20] «BOUSAHLA MILOUD», Analyse et synthèse de réseaux plans ou conformés d'antenns imprimée par méta-heuristique floues, université ABOU-BEKR BELLKAID TLEMCEN, 2012

[21] : « M. BERMATI ABDELLATIF »,Effet des irrégularités dans le plan de masse sur les performances d'une antenne microbande,Université kasdiMerbah – Ouargla 25/05/2017.

[22] : « SOLTANE SAMIA », Etude et caractérisation d'antenne imprimées pour système ultra-large bande, Université Moh amed Khider – Biskra, 2015.

[23] :« MADOUI SOUAD », L'effet d'une cellule AMC sur la bande passante d'une antenne Patch, Université KasdiMerbah Ouargla, 23 mais 2017.

[24] :« ZEMALI HOCINE & SOUFI AISSA », Estimation de la température de coupe lors du perçage, université KasdiMerbah Ouargla, 2015.

[25] : « OUBICHE AYOUB BENKERANE OUALID »,Simulation d'un système de climatisation d'une automobile avec le logiciel COMSOL multiphysics ,Université KASDI Merbah Ouargla.

[26] : « HABI MERIEM KHENGAOUI BOUCHRA »,Simulation D'un Electroaimant, Université kasdiMerbah Ouargla, 2015, page 40.

[27] : « MARIEM BEN HAMOUDA », Etude, conception et modélisation de la diffusion de la chaleur dans les tissus biologiques,Université du Québec, mars 2015.

[28] : Introduction to comsol-multiphysics, Protected by U.S. Patents listed on www.comsol.com/patents .

[29] : « ADEL KARA »,Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollue, Université de Sétif 1.