

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

**Mémoire de Master**

Présenté par

**MAHSAS Maroua**

Filière : Télécommunication

Spécialité : Réseaux et télécommunications

---

**Etude des propriétés d'une antenne patch  
rectangulaire : simulation sous CST et HFSS**

---

**Soutenu le 04/07/2024 devant le jury :**

ACHELI	Dalila	prof	UMBB	Président
MERAIHI	Yassine	prof	UMBB	Examineur
MESSAOUDI	Noureddine	Prof	UMBB	Promoteur

Année Universitaire : 2023/2024

# **Remerciements**

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire.*

*Tout d'abord, je remercie **Allah, le Tout-Puissant**, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.*

*Je remercie chaleureusement mon directeur de recherche, **Monsieur Noureddine Messaoudi**, pour son encadrement précieux, ses conseils avisés, et sa patience tout au long de ce projet. Son expertise et son soutien ont été essentiels à la réalisation de ce travail.*

*Je remercie également **Monsieur le Président** et **tous les membres du jury** d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer mon travail, et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Ma reconnaissance va également à l'ensemble des enseignants du département **Ingénierie des Systèmes Électriques** pour leur enseignement et leurs encouragements tout au long de mon cursus. Leur passion pour leur domaine a été une source d'inspiration constante.*

*Un grand merci à mes collègues de promotion 2023/2024 pour les discussions enrichissantes, le soutien mutuel, et l'esprit de camaraderie qui ont rendu ces années inoubliables.*

*Enfin, je remercie profondément **mes parents, mon mari, mes frères et sœurs** pour leur soutien indéfectible, leur compréhension et leurs encouragements constants. Leur présence a été un pilier fondamental durant ces moments de défis.*

*À tous, je vous exprime ma plus sincère reconnaissance.*

*Merci.*

# **Dédicace**

*C'est avec une grande joie que je dédie ce travail à ceux qui ont été une source d'inspiration et de volonté.*

**À mes parents**, qui m'ont inculqué les valeurs du travail et de la persévérance, et qui ont toujours cru en moi. Leur amour et leur soutien inconditionnels m'ont guidé tout au long de mon parcours académique.

**À mon cher père**, pour son soutien inébranlable et ses encouragements constants, qui ont toujours été une source de force pour moi.

**À ma chère mère**, pour son amour, sa sagesse et ses précieux conseils, qui m'ont guidée à travers les moments difficiles.

**À mon mari**, pour sa patience, son soutien et son amour indéfectible, qui m'ont permis de rester concentrée et motivée.

**À mes frères Akram, Obaida, et mes sœurs Malak, Ritadj et Hadil**, pour leur soutien et leur affection qui m'ont apporté réconfort et inspiration tout au long de ce parcours.

**À mon fils à venir**, qui m'a donné la motivation nécessaire pour persévérer.

**À toute ma famille** et À tous ceux qui m'ont inspiré et soutenu,

*Ce mémoire est le fruit de votre soutien inestimable. Merci du fond du cœur.*

**MAHSAS Maroua**

## ملخص

الهوائي عنصر مهم في مجال الاتصالات لإرسال واستقبال المعلومات في شكل موجات كهرومغناطيسية. كما أنه يستخدم في عدة مجالات مثل أنظمة الكشف، والأقمار الصناعية، وطائرات المراقبة، وشبكات الاتصالات، ونظام تحديد المواقع العالمي للسيارات، والاتصالات عبر الأقمار الصناعية.

يركز العمل المقدم في هذه الأطروحة على دراسة خصائص هوائي الرقعة المستطيلة. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تصميم ومحاكاة هوائي رقعة مستطيلة لتطبيقات الواي فاي. يتم تحفيز هذا الهوائي بواسطة خط متناهي الصغر مع منفذ تغذية مطابق  $50 \Omega$ . تؤثر الشقوق المطابقة تأثيراً مباشراً وإيجابياً على تحسين خصائص الإشعاع لهذا النوع من الهوائيات من حيث معامل الانعكاس (S11)، ونسبة الموجة الدائمة (VSWR)، ومقاومة الإدخال، ونمط الإشعاع حول تردد رنين يبلغ 2.4 جيجاهرتز. سيتم إجراء عمليات المحاكاة باستخدام محاكي البنية عالية التردد (HFSS) ومحاكيات تقنية المحاكاة الحاسوبية (CST).

**الكلمات المفتاحية:** هوائي الرقعة، خط الشريط الدقيق، الواي فاي، معامل الانعكاس، مقاومة المدخلات، نمط الإشعاع، محاكيات HFSS وCST.

## Abstract

The antenna is an important element in the communications field, for transmitting and receiving information in the form of electromagnetic waves. It is also used in many fields such as detection systems, satellites, surveillance aircraft, communication networks, automotive GPS and satellite communications.

The work presented in this thesis focuses on the study of the properties of a rectangular patch antenna. The main objective of this work is the design and simulation of a rectangular patch antenna for Wi-Fi applications. This antenna is excited by a microstrip line with a  $50 \Omega$  matched feed port. The matching notches have a direct and positive impact on improving the radiation characteristics of this type of antenna in terms of reflection coefficient (S11), standing wave ratio (VSWR), input impedance, and radiation pattern around a resonant frequency of 2.4 GHz. Simulations will be carried out using the HFSS (High Frequency Structure Simulator) and CST (Computer Simulation Technology) simulators.

**Key word:** patch antenna, microstrip line, Wi-Fi, reflection coefficient, input impedance, radiation pattern, HFSS and CST simulators.

## Résumé

L'antenne est un élément important dans le domaine de la communication pour émettre et recevoir des informations sous forme d'ondes électromagnétiques. Elle est également utilisée dans plusieurs domaines, tels que les systèmes de détection, les satellites, les avions de surveillance, les réseaux de communication, le GPS automobile et les communications par satellite.

Le travail présenté dans ce mémoire est axé sur l'étude des propriétés d'une antenne patch rectangulaire. L'objectif principal de ce travail est la conception et la simulation d'une antenne patch de forme rectangulaire pour des applications Wi-Fi. Cette antenne est excitée par une ligne microruban ayant un port d'alimentation adapté à  $50 \Omega$ . Les encoches d'adaptation ont un impact direct et positif sur l'amélioration des caractéristiques de rayonnement de ce type d'antenne en termes de coefficient de réflexion (S11), de rapport d'onde stationnaire (VSWR), d'impédance d'entrée et de diagramme de rayonnement autour d'une fréquence de résonance de 2,4 GHz. Les simulations seront effectuées à l'aide des simulateurs HFSS (High Frequency Structure Simulator) et CST (Computer Simulation Technology).

**Mots clés :** antenne patch, ligne microruban, Wi-Fi, coefficient de réflexion, impédance d'entrée, diagramme de rayonnement, simulateurs HFSS et CST.

## Table des matières

## Table des matières

ملخص .....	i
Abstract.....	i
Résumé .....	ii
Table des matières .....	iii
Liste des abréviations .....	vii
Liste des symboles.....	viii
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux .....	xi
Introduction générale.....	1
Chapitre I Généralités sur les antennes .....	3
I.1 Introduction .....	4
I.2 Généralités sur les ondes électromagnétiques .....	4
I.2.1 Définition d'onde électromagnétique.....	4
I.2.2 Propriétés d'ondes électromagnétiques .....	5
I.2.3 Types d'ondes.....	7
I.3 Equations de maxwell.....	8
I.3.1 Équations de Maxwell sous forme locale (passage direct) .....	9
I.3.2 Équations de Maxwell sous forme intégrale (passage indirect).....	11
I.4 Les antennes .....	12
I.4.1 Définition .....	12
I.5 Les différentes zones de rayonnement.....	13
I.5.1 Zone de Rayleigh .....	14
I.5.2 Zone de Fraunhofer .....	14
I.5.3 Zone de Fresnel .....	14
I.6 Les paramètres caractéristiques des antennes.....	15
I.6.1 Diagramme de rayonnement .....	15
I.6.2 Gain d'une antenne.....	17
I.6.3 Angle d'ouverture d'une antenne .....	18

## Table des matières

I.6.4	La directivité et l'angle solide .....	19
I.6.5	La PIRE .....	19
I.6.6	Le rendement .....	20
I.6.7	Surface effective ou surface de captation .....	20
I.6.8	Impédance .....	21
I.6.9	Resistance de rayonnement .....	21
I.6.10	Efficacité de rayonnement .....	21
I.6.11	Intensité de rayonnement .....	21
I.6.12	Ouverture ou longueur effective .....	22
I.6.13	Température équivalente de bruit .....	22
I.6.14	Facteur de bruit d'une antenne .....	22
I.7	Les types d'antennes .....	23
I.7.1	Antennes filaires .....	23
I.7.2	Les antennes à lentilles .....	24
I.7.3	Réseau d'antennes (antenne matricielle) .....	24
I.7.4	Antennes à ouverture .....	25
I.7.5	Les antennes à réflecteur .....	25
I.7.6	Antennes micro-ruban ou antennes imprimées .....	26
I.8	Conclusion .....	27
Chapitre II Etude de l'antenne patch rectangulaire .....		28
II.1	Introduction .....	29
II.2	Antenne patch micro ruban .....	29
II.2.1	Description des antennes patch micro ruban .....	29
II.2.2	Choix de la technologie des antennes imprimées .....	30
II.2.3	Description des différents éléments de la structure .....	30
II.3	Les différentes formes de patch .....	32
II.4	Techniques d'alimentation des antennes patch .....	32
II.4.1	Alimentation par ligne micro ruban .....	32
II.4.2	Alimentation par sonde coaxiale .....	33
II.4.3	Alimentation par couplage par fente .....	34
II.4.4	Alimentation par couplage de proximité .....	34
II.5	Principe de Fonctionnements des antennes imprimées .....	35
II.6	Principales caractéristiques des antennes imprimées .....	36
II.6.1	Coefficient de réflexion S11 .....	36
II.6.2	Rapport d'onde stationnaire (ROS) : .....	36

## Table des matières

II.6.3	Diagramme de rayonnement .....	36
II.6.4	La Directivité.....	37
II.6.5	Le gain.....	37
II.6.6	La bande passante.....	37
II.7	Avantages et limitations des antennes imprimées .....	37
II.8	Domaines d'applications des antennes patches.....	38
II.9	Conception.....	39
II.10	Conclusion .....	40
Chapitre III Modélisation et simulation d'une antenne patch sous CST et HFSS .....		41
III.1	Introduction .....	42
III.2	Outils de simulation.....	42
III.2.1	Description du Logiciel de Simulation CST : .....	42
III.2.2	Description du Logiciel de Simulation HFSS .....	43
III.3	La Conception d'une antenne patch rectangulaire avec encoche .....	43
III.3.1	Structure de l'antenne.....	44
III.4	Les résultats de simulation par le logiciel CST .....	47
III.4.1	Coefficients de réflexion ou perte de retour ( <b>S11</b> ) .....	48
III.4.2	Rapport d'onde stationnaire (VSWR) .....	48
III.4.3	Diagrammes de rayonnement.....	49
III.4.4	Distribution de courant (courant de surface).....	50
III.5	Les résultats de simulation par le logiciel HFSS.....	52
III.5.1	Coefficients de réflexion ou perte de retour ( <b>S11</b> ) .....	52
III.5.2	Rapport d'onde stationnaire (VSWR) .....	52
III.5.3	Diagrammes de rayonnement.....	53
III.5.4	Distribution de courant (courant de surface).....	55
III.5.5	Gain .....	55
III.5.6	Directivité :.....	56
III.6	Comparaison et discussion .....	57
III.7	Conclusion.....	58
Conclusion générale .....		60
Annexe.....		61
A)	Les étapes à suivre pour la modélisation et la simulation sous CST MWS .....	61
B)	Les étapes à suivre pour la modélisation et la simulation sous HFSS.....	68

## **Table des matières**

Références .....	74
------------------	----

## Liste des abréviations

## Liste des abréviations

<b>OEM</b>	Onde électromagnétique
<b>RF</b>	Fréquence radio
<b>VHF</b>	Very High Frequency
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency
<b>PIRE</b>	Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente
<b>2D</b>	Deux dimensions
<b>3D</b>	Trois dimensions
<b>S11</b>	Coefficient de réflexion
<b>VSWR</b>	Voltage Standing Wave Ratio
<b>ROS</b>	Rapport d'Onde Stationnaire
<b>TOS</b>	Taux Onde Stationnaire
<b>BP</b>	Bandwidth (Largeur de bande)
<b>FR4</b>	Flame Retardant 4 (Matériau ignifuge 4)
<b>IEEE</b>	Institut of Electrical and Electronics Engineers.
<b>GPS</b>	Global Positioning System.
<b>WiFi</b>	Wireless Fidelity
<b>ULB</b>	Ultra large Bande
<b>FEM</b>	Méthode des Éléments Finis
<b>FIT</b>	Finite Integration Technique
<b>CST</b>	Computer Simulation Technologie
<b>HFSS</b>	High Frequency Structure Simulator

## Liste des symboles

## Liste des symboles

<b>E</b>	le champ électrique
<b>B</b>	le champ magnétique
$\lambda$	la longueur d'onde
<b>J</b>	la densité de courant
$\omega$	la fréquence angulaire
$\mu$	la perméabilité du milieu
$\varepsilon$	la permittivité du milieu
$\eta$	le rendement
$P(\theta, \varphi)$	la densité de puissance moyenne
$P_{max}$	La densité de puissance maximale
<b>D</b>	la directivité
<b>G</b>	le gain
<b>Se</b>	la surface effective
<b>Sc</b>	la surface équivalente
<b>Za</b>	L'impédance d'entrée.
<b>Ae</b>	l'ouverture effective d'antenne
<b>Ta</b>	la température ambiante
<b>F</b>	Le facteur de bruit
<b>fr</b>	fréquence de résonance
$\varepsilon_r$	permittivité du substrat
<b>h</b>	l'épaisseur du substrat
<b>W</b>	Largeur efficace de l'antenne
$\varepsilon_{eff}$	Constante diélectrique effective
$L_{eff}$	Longueur effective

### Liste des figures

Figure I.1 : structure de l'onde électromagnétique.....	4
Figure I.2 : Le spectre électromagnétique .....	5
Figure I.3: polarisation des ondes électromagnétiques.....	6
Figure I.4: les différentes sortes de polarisation.....	7
Figure I.5: Onde sphérique .....	7
Figure I.6: Onde plane .....	8
Figure I.7: passages mathématiques des sources aux champs rayonnés .....	8
Figure I.8: liaison radio .....	12
Figure I.9: Différence de parcours entre points sur un même axe.....	13
Figure I.10: limites des 3 zones de rayonnement .....	15
Figure I.11: diagramme de Rayonnement en coordonnées polaires [11].....	16
Figure I.12: diagramme de Rayonnement en coordonnées cartésiennes [11].....	16
Figure I.13 : le gain des antennes isotrope et l'antenne dipôle.....	18
Figure I.14: angle ouverture d'une antenne.....	18
Figure I.15: représentation d'angle solide .....	19
Figure I.16: La PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente).....	20
Figure I.17: différents types d'antennes .....	23
Figure I.18: Exemples d'antennes filaires .....	24
Figure I.19: Exemple d'une antenne à lentille.....	24
Figure I.20 : Réseau d'antennes microruban à 16 éléments (réseau phasé).....	25
Figure I.21: Exemples d'antennes à ouverture .....	25
Figure I.22 : différents types d'antennes réflecteurs [17].....	26
Figure I.23 : exemple d'une antenne patch.....	27
Figure II.1: antenne patch micro-ruban .....	29
Figure II.2 : structure des antennes patch .....	31
Figure II.3 : Différentes formes d'antennes patch [8] .....	32
Figure II.4: Alimentation par ligne micro ruban .....	33
Figure II.5: position de la ligne micro-ruban [9].....	33
Figure II.6: Alimentation par sonde coaxiale .....	34
Figure II.7 : Alimentation par couplage par fente .....	34

## Liste des figures

Figure II.8 : Alimentation par couplage de proximité .....	35
Figure II.9 : Rayonnement des antennes patch [11] .....	35
Figure II.10 : Diagramme de rayonnement de l'antenne patch .....	36
Figure II.11 : La bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion. ....	37
Figure III.1: Antenne Patch rectangulaire alimentée par une ligne micro ruban .....	43
Figure III.2: Encoches d'adaptation [7].....	44
Figure III.3: Géométrie de l'antenne patch de forme rectangulaire .....	45
Figure III.4: Le design de l'antenne par CST .....	47
Figure III.5: Le design de l'antenne par HFSS.....	47
Figure III.6: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence (CST).....	48
Figure III.7: VSWR en fonction de la fréquence (CST).....	48
Figure III.8: Diagramme de rayonnement en 3D (directivité) de l'antenne patch (CST) ...	49
Figure III.9: Diagramme de rayonnement en 3D (Gain réalisé) de l'antenne patch (CST)	49
Figure III.10 : Diagramme de rayonnement en 2D ( $\phi=0^\circ$ ) de l'antenne patch (CST).....	50
Figure III.11: Diagramme de rayonnement en 2D ( $\phi=90^\circ$ ) de l'antenne patch (CST).....	50
Figure III.12: Courant de surface de l'antenne patch (CST) .....	51
Figure III.13: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence (HFSS).....	52
Figure III.14: VSWR en fonction de la fréquence (HFSS) .....	53
Figure III.15: Diagramme de rayonnement en 3D (directivité) de l'antenne patch (HFSS)	53
Figure III.16: Diagramme de rayonnement en 3D (Gain réalisé) de l'antenne patch (HFSS)	54
.....	54
Figure III.17: Diagramme de rayonnement en 2D ( $\phi=0^\circ$ ) de l'antenne patch (HFSS) ....	54
Figure III.18: Diagramme de rayonnement en 2D ( $\phi=90^\circ$ ) de l'antenne patch (HFSS) ..	54
Figure III.19: Courant de surface de l'antenne patch (HFSS).....	55
Figure III.20: Le gain de l'antenne patch (HFSS).....	55
Figure III.21: La directivité de l'antenne patch (HFSS).....	56

## Liste des tableaux

Tableau III-1: Paramètres de l'antenne patch rectangulaire .....	45
Tableau III-2: Dimensions de l'antenne patch de forme rectangulaire .....	46
Tableau III-3: Résumé des résultats de la simulation de l'antenne patch sous logiciel CST .....	51
Tableau III-4: Résumé des résultats de la simulation de l'antenne patch sous logiciel HFSS .....	56
Tableau III-5: comparaison entre les résultats des deux simulations (CST et HFSS).....	57

# **Introduction**

## **générale**

# Introduction générale

Le concept d'antennes imprimées ou micro ruban est apparu dans les années 50, mais ce n'est que vingt ans plus tard que les premières réalisations apparaissent. Dans un premier temps essentiellement réservé à des applications militaires puis à l'industrie à partir des années 1990. Elles sont aujourd'hui implantées dans de nombreux dispositifs électroniques et constituent le type d'antenne privilégié pour les applications VHF (Very High Frequency) et notamment pour la Wi-Fi et la radio amateur.[1]

Une antenne patch est constituée d'un plan de masse et d'un substrat diélectrique, dont la surface porte un ou plusieurs éléments métallisés. Les patches se déclinent suivant différentes formes qui vont influencer sur la nature du rayonnement de l'antenne. On trouve en pratique des éléments rayonnants de la forme d'un rectangle ou d'un carré, d'un disque circulaire ou d'un anneau, d'un triangle ou d'un dipôle. L'élément le plus utilisé est celui de forme rectangulaire.

L'objectif de notre travail est d'étudier, de modéliser et de concevoir une antenne patch de forme rectangulaire pour des applications Wi-Fi en utilisant les simulateurs HFSS (High Frequency Structure Simulator) et CST (Computer Simulation Technology). Cette étude présente une analyse des résultats de simulation d'une antenne patch rectangulaire alimentée par une ligne micro-ruban avec des encoches d'adaptation, autour d'une fréquence de résonance de 2,4 GHz, et compare les résultats obtenus avec ces deux simulateurs.

La technique de modélisation des antennes est effectuée à l'aide d'outils HFSS et CST sont des logiciels de simulation électromagnétique basés sur la résolution numérique des équations de Maxwell, utilisés pour la modélisation et l'analyse des antennes et autres dispositifs RF.[18] HFSS, développé par Ansys, est réputé pour sa capacité à résoudre des problèmes complexes en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) pour des analyses en fréquence et en domaine temporel. CST Studio Suite, produit par Dassault Systèmes, offre une large gamme d'outils de simulation intégrés, spécialisés dans les simulations électromagnétiques complètes, utilisant des méthodes telles que la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).

## **Introduction générale**

Ce travail se compose de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les antennes radioélectriques, les paramètres caractéristiques des antennes, et les différents types d'antennes.

Le deuxième chapitre est consacré à une description générale des antennes imprimées, leurs propriétés et caractéristiques, un rappel théorique sur l'antenne imprimée, une présentation des méthodes d'analyse ainsi que des différentes méthodes d'alimentation.

Le troisième chapitre présente dans La première partie l'environnement des outils de simulation HFSS (High Frequency Structure Simulator) et CST (Computer Simulation Technology) utilisés dans ce travail. la deuxième partie de ce chapitre est dédiée à la modélisation et à la conception de l'antenne patch rectangulaire, ainsi qu'à la présentation des résultats de simulation. Enfin, une comparaison des résultats obtenus.

Nous terminerons par une conclusion générale.

**Chapitre I**

**Généralités sur les**

**antennes**

## Généralités sur les antennes

### I.1 Introduction

Une antenne est un dispositif qui assure la transition entre un guide d'onde et l'espace libre dans lequel ces ondes vont se propager, ou inversement.[1]

On sait qu'il existe une variété extrêmement large d'antennes, mais toutes peuvent être étudiées et comparées entre elles à travers les mêmes paramètres, on s'intéresse ici aux caractéristiques d'antenne, qui permet de déterminer ces propriétés que ce soit en émission ou en réception.

Avant de traiter des cas spécifiques d'antennes, il convient de commencer par le développement des équations électromagnétiques appliquées au rayonnement.

Bien sûr la base de ces équations demeure les équations de Maxwell d'où découlent tout l'électromagnétisme, ce qui inclue le rayonnement. D'ailleurs, Hertz avait remarqué la possibilité du rayonnement d'une onde électromagnétique à partir des équations de Maxwell.[2]

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à une vue générale sur les antennes radioélectriques, leurs caractéristiques, les différents types d'antennes, ainsi qu'un rappel sur les ondes électromagnétiques.

### I.2 Généralités sur les ondes électromagnétiques

#### I.2.1 Définition d'onde électromagnétique

L'onde électromagnétique (OEM) est constituée d'un champ électrique  $\vec{E}$ , et d'un champ magnétique  $\vec{B}$  qui varient au même rythme que le courant qui leur a donné naissance ; elle est définie comme étant une perturbation se propageant, et se déplaçant pour transporter des informations, sans emporter de la matière.

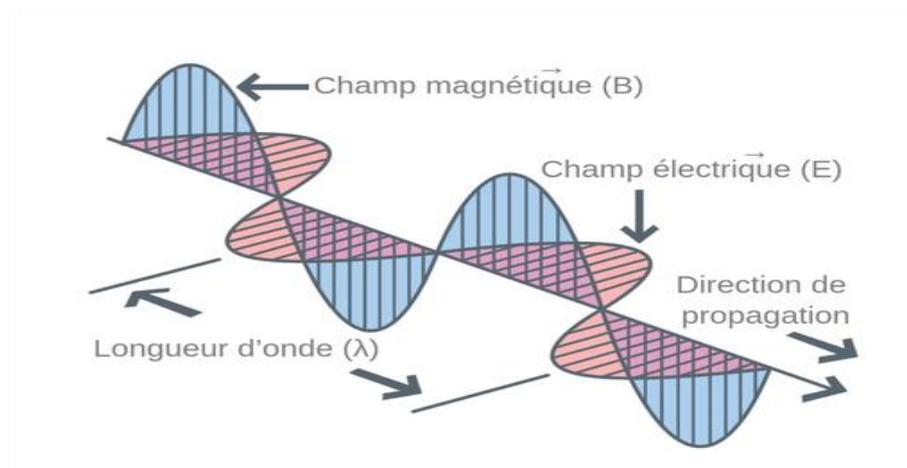


Figure I.1 : structure de l'onde électromagnétique

**I.2.2 Propriétés d’ondes électromagnétiques**

**I.2.2.1 Fréquence et période**

La période est la durée entre deux motifs élémentaires qui se répètent au fil du temps.

La fréquence est le nombre de motifs élémentaires identiques par seconde.

La fréquence (ou période) caractérise une onde électromagnétique.

Le domaine de la radiofréquence (RF) et de l’ingénierie des micro-ondes couvrent généralement le comportement des signaux de courant alternatif dont les fréquences sont comprises entre 100 MHz (1 MHz = 10<sup>6</sup> Hz) et 1000 GHz (1 GHz = 10<sup>9</sup> Hz). Les fréquences RF s’étendent de la très haute fréquence (VHF) (30-300 MHz) à l’ultra-haute fréquence (UHF) (300-3000 MHz). Le terme micro-ondes est généralement utilisé pour les fréquences comprises entre 3 et 300 GHz, avec une longueur d’onde électrique correspondante comprise entre  $\lambda = c / f = 10\text{cm}$  et  $\lambda = 1\text{mm}$

Respectivement. Les signaux dont la longueur d’onde est de l’ordre du millimètre sont souvent appelés ondes millimétriques.

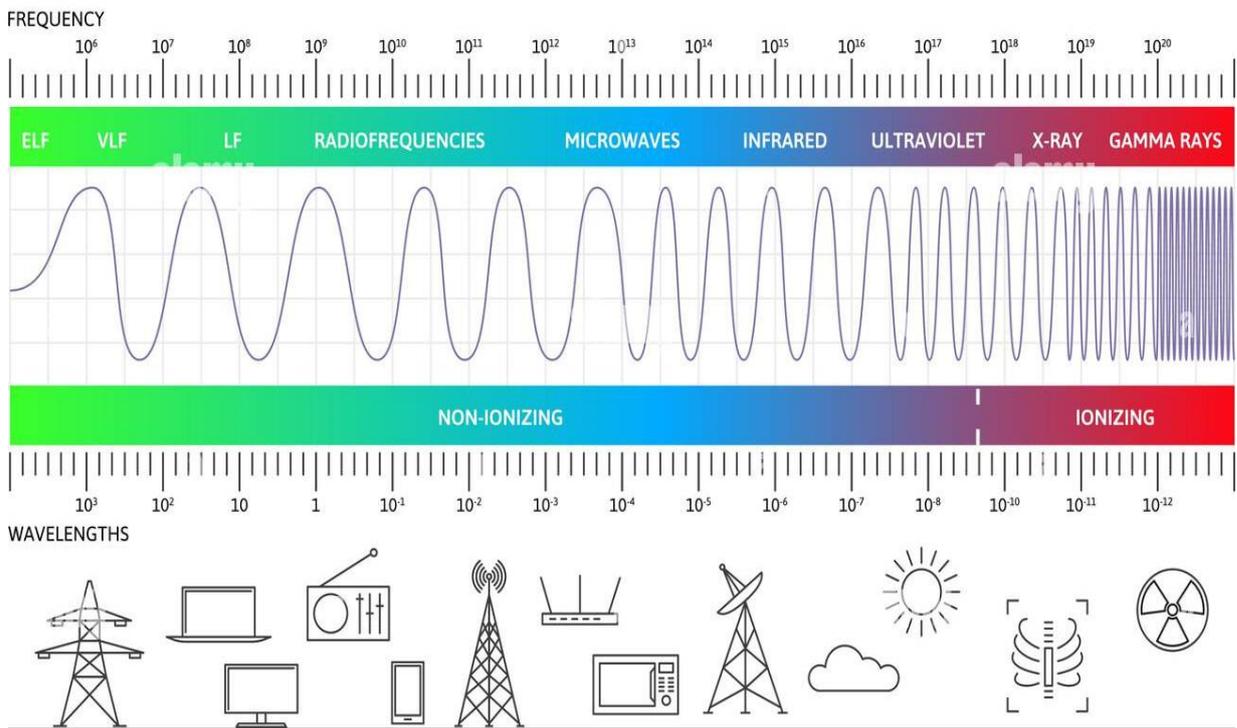


Figure I.2 : Le spectre électromagnétique

### I.2.2.2 Célérité

Dans le vide, les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s).

Cette vitesse est également valable dans l'air et les fibres optiques utilisées en téléphonie.

Dans certains milieux (comme les métaux), les ondes électromagnétiques ne se propagent pas (ces milieux sont dits opaques).[4]

### I.2.2.3 Longueur d'onde

La longueur d'onde ( $\lambda$ ) est la distance parcourue par l'onde pendant une période.

Elle dépend de la vitesse de propagation dans le milieu considéré.

Dans le vide, la longueur d'onde est liée à la fréquence par la formule :  $\lambda = c / f$ .

### I.2.2.4 Propagation

Les ondes électromagnétiques se propagent de l'antenne d'émission à l'antenne de réception de diverse manière :

Par une onde directe, partant d'émission sur le récepteur sans rencontrer un obstacle naturel ou artificiel.

Par une onde réfléchie, lorsque l'onde rencontre un obstacle est renvoyé dans sa totalité, ou une partie dans une direction différente.

### I.2.2.5 Polarisation

L'onde électromagnétique est rayonnée selon un plan de polarisation. Elle est composée de deux "vecteurs en quadrature" appelés "champ électrique" ou E et "champ magnétique" ou B. On dit qu'ils sont en quadrature lorsque qu'ils sont déphasés de  $90^\circ$  l'un par rapport à l'autre.[5]

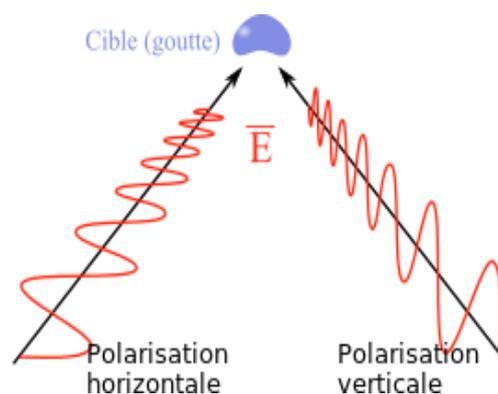


Figure I.3: polarisation des ondes électromagnétiques

Par convention, le plan de polarisation est défini selon l'orientation du champ électrique. Lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique verticalement, on dit que la

polarisation est verticale. À l'inverse, lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique horizontalement, on dit que la polarisation est horizontale. Dans certaines conditions, la polarisation peut être aussi "circulaire droite ou circulaire gauche". [6]

La polarisation correspond à la direction et à l'amplitude du champ électrique  $E$ . Pour une onde non polarisée, ou naturelle,  $E$  tourne autour de son axe de façon aléatoire et imprévisible au cours du temps. Polariser une onde correspond à donner une trajectoire définie au champ électrique. Il y a plusieurs sortes de polarisation :

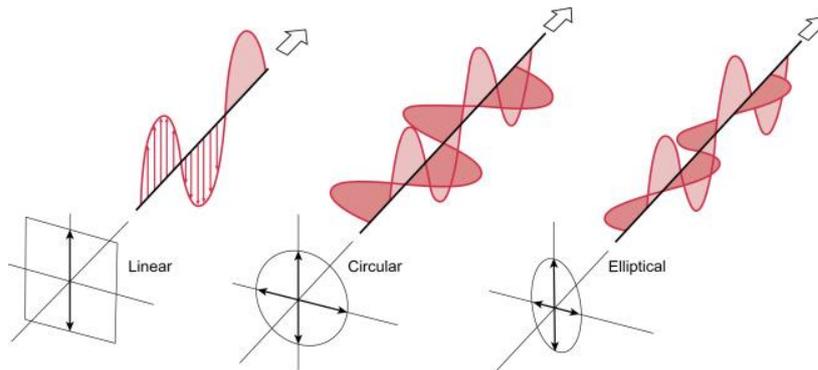


Figure I.4: les différentes sortes de polarisation

Une onde plane est dite à polarisation rectiligne si le champ électrique est constamment dirigé dans la même direction.

L'onde est dite à polarisation circulaire si l'extrémité du vecteur  $E$  décrit un cercle, ce cas de figure peut se présenter en considérant deux doublets orthogonaux alimentés en quadrature.

L'onde est dite à polarisation elliptique si l'extrémité du vecteur  $E$  décrit une ellipse.

### I.2.3 Types d'ondes

Il existe deux types d'onde :

#### a) Onde sphérique

Onde sphérique est une onde dont le front a la forme d'une sphère dont le rayon s'allonge à la vitesse de propagation de l'onde.

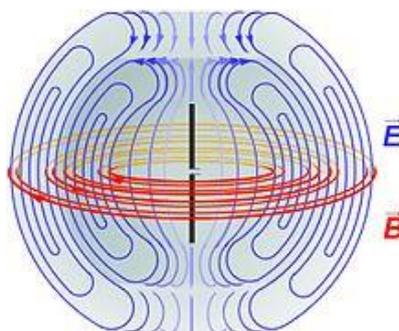


Figure I.5: Onde sphérique

a) Onde plane

Le rayon de cette l'onde sphérique est tellement grand qu'on peut considérer que, sur une surface limitée, le front de l'onde est localement plan. Dans ce cas le champ E et le champ H sont perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation. Cette approximation sans grandes conséquences facilite la compréhension de la propagation des ondes.[5]

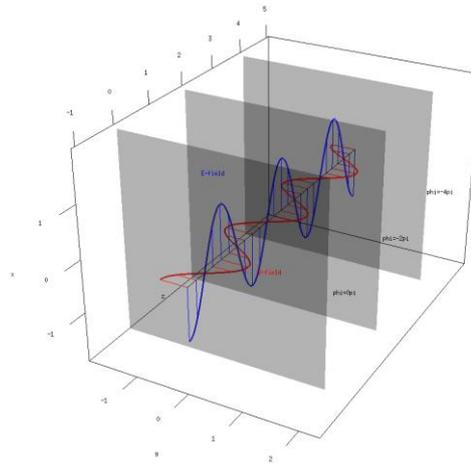


Figure I.6: Onde plane

I.3 Equations de maxwell

La théorie d'électromagnétisme repose principalement sur les équations de MAXWELL. Elles ont été établies par James Clark Maxwell dans les années 1860. [7]

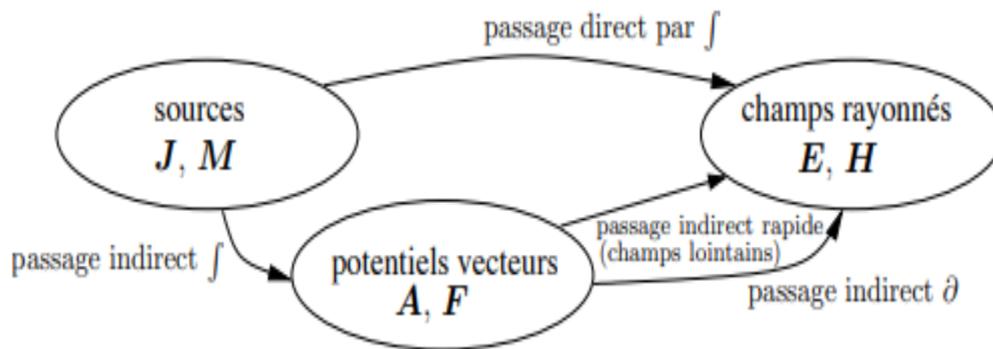


Figure I.7: passages mathématiques des sources aux champs rayonnés

Le passage de l'expression des sources électromagnétiques vers l'expression des champs électromagnétiques rayonnés est difficile. La figure 7 montre qu'il existe un passage direct utilisant uniquement des intégrales, et un passage indirect impliquant la création d'entités mathématiques (sans fondement physique) appelées les potentiels vecteurs. Le passage indirect

se réalise en deux étapes : un premier conduit aux potentiels vecteurs par les biais des intégrales, puis vers les champs électromagnétiques par des équations différentielles

### I.3.1 Équations de Maxwell sous forme locale (passage direct)

- **Équation de Maxwell-Gauss** (Électrostatique) :

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\epsilon_0 \rho}{\epsilon_0} \quad \text{I-1}$$

Cette équation indique que le champ électrique ( $\mathbf{E}$ ) est généré par une distribution de charge ( $\epsilon_0 \rho$ ), où ( $\rho$ ) est la permittivité du vide.

- **Équation de Maxwell-Thomson** (Magnétostatique) :

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{I-2}$$

Elle exprime l'absence de monopôles magnétiques ; autrement dit, les lignes de champ magnétique ( $\mathbf{B}$ ) sont toujours fermées.

- **Équation de Maxwell-Faraday** (Loi d'induction) :

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{I-3}$$

Cette équation décrit comment un champ magnétique variable dans le temps crée un champ électrique circulaire.

- **Équation de Maxwell-Ampère** (avec le courant de déplacement) :

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt} \quad \text{I-4}$$

Elle montre comment un champ magnétique est généré par un courant électrique ( $\mathbf{J}$ ) et par un champ électrique variable dans le temps.

Ces équations sont très importantes pour comprendre le fonctionnement des antennes, car elles régissent la propagation des ondes électromagnétiques. Les antennes utilisent ces principes pour transmettre et recevoir des signaux radio. Par exemple, une antenne dipôle simple peut être analysée en utilisant l'équation de Maxwell-Ampère pour comprendre comment le courant oscillant dans l'antenne crée un champ magnétique, qui à son tour induit un champ électrique rayonnant dans l'espace [8].

Si l'on considère que le milieu de propagation ne contient ni charges ni courants ( $J = 0, \rho = 0$ ), dans ces conditions, les équations de Maxwell s'écrivent :

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (I.1)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (I.2)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (I.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (I.4)$$

**But : Etablir 2 équations différentielles en E et en B**

$$\nabla \times (\nabla \times B) = \nabla \times \left( \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times E) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( -\frac{\partial B}{\partial t} \right) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} (B)$$

Or, la propriété du rotationnel permet d'écrire :

$$\nabla \times (\nabla \times B) = \nabla \cdot (\nabla \cdot B) - \nabla^2 \cdot B = -\nabla^2 \cdot B \quad I-5$$

$$\text{Donc : } \nabla^2 \cdot (B) - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} (B) = 0 \quad I-6$$

$$\text{Même pour E : } \nabla^2 \cdot (E) - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} (E) = 0 \quad I-7$$

On pose :  $\mu_0 \varepsilon_0 = \frac{1}{v^2}$  où v est la vitesse de propagation. (Dans le vide  $v=c=3.108 \text{ m/s}$ ).

$$\text{Donc : } \nabla^2 \cdot (B) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (B) = 0 \quad I-8$$

$$\nabla^2 \cdot (E) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (E) = 0 \quad I-9$$

**But : Vérifier que :  $H = H_0 \cos(\omega t - kz)$  est solution de cette équation différentielle.**

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} - v^2 \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad I-10$$

**On a :**

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\omega \sin(\omega t - kz) \quad I-11$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = -\omega^2 \cos(\omega t - kz) \quad I-12$$

$$\frac{\partial H}{\partial z} = -k \sin(\omega t - kz) \quad I-13$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = -k^2 \cos(\omega t - kz) \quad \text{I-14}$$

On remplace ces dérivées partielles dans l'équation différentielle :

$$-v^2 \left( \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad \text{I-15}$$

$$-v^2(-k^2 \cos(\omega t - kz)) - (-\omega^2 \cos(\omega t - kz)) = 0 \quad \text{I-16}$$

$$v^2 k^2 \cos(\omega t - kz) - \omega^2 \cos(\omega t - kz) = 0 \quad \text{I-17}$$

$$\cos(\omega t - kz)(v^2 k^2 - \omega^2) = 0 \quad \text{I-18}$$

Pour que cette équation soit satisfaite, le facteur devant le cosinus doit être nul :

$$v^2 k^2 - \omega^2 = 0 \quad \text{Alors :} \quad v = \frac{\omega}{k} \quad \text{I-19}$$

Donc l'expression  $H = H_0 \cos(\omega t - kz)$  est bien une solution de l'équation différentielle donnée, avec la constante de propagation  $v = \frac{\omega}{k}$

### I.3.2 Équations de Maxwell sous forme intégrale (passage indirect)

Une des lois de Maxwell montre que la divergence de B est toujours nulle. Ainsi, B peut être exprimé comme le rotationnel d'un vecteur car la divergence d'un rotationnel donne zéro :

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad \text{I-20}$$

Où A est appelé le potentiel vecteur magnétique. On peut aussi montrer que :

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega \mathbf{B} = -j\omega \nabla \times \mathbf{A} \quad \text{I-21}$$

D'où :

$$\nabla \cdot (\mathbf{E} + j\omega \mathbf{A}) = 0 \quad \text{I-22}$$

Le champ entre parenthèses est donc conservatif i.e. sa circulation sur un contour fermé L'est nul. Comme le rotationnel d'un gradient donne aussi zéro, il s'ensuit que ce champ peut être exprimé comme étant le gradient d'un potentiel scalaire  $\Phi$ . donc :

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi - j\omega \mathbf{A} \quad \text{I-23}$$

La connaissance des deux potentiels permettra de calculer les champs magnétique et électrique des équations (I.21) et (I.23) respectivement. Pour ce faire, il faut définir complètement le potentiel vecteur qui, selon la condition de Helmholtz, ne peut être obtenu que si l'on connaît son rotationnel (ce qui est fait) et sa divergence. Il existe plusieurs possibilités pour le choix de la divergence du potentiel vecteur. Le choix le plus près d'une interprétation physique est celui proposé par Lorenz soit

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = -j\omega \mu \epsilon \Phi \quad \text{I-24}$$

Ce qui donne : 
$$E = \frac{1}{j\omega\mu} \nabla(\nabla \cdot A) - j\omega A \tag{I-25}$$

“Cette jauge de Lorenz implique l’équation de continuité soit  $\nabla \cdot J + j\omega\rho = 0$  avec  $(\rho)$ , la densité de charge. De là, par une série de simplifications mathématiques, on obtient finalement :

$$\nabla^2 A + \omega^2 \mu \epsilon A = -\mu J \tag{I-26}$$

Et similairement : 
$$\nabla^2 \Phi + \omega^2 \mu \epsilon \Phi = -\rho/\epsilon \tag{I-27}$$

D’où :

- A est le potentiel vecteur,
- $\omega$  est la fréquence angulaire,
- $\mu$  est la perméabilité du milieu,
- $\epsilon$  est la permittivité du milieu,
- J est la densité de courant.

### I.4 Les antennes

L’antenne joue un rôle important dans le monde de la communication moderne. Elle est un dispositif qui convertit les ondes électriques en ondes radio et vice versa. Cette capacité permet la transmission et la réception de signaux à travers diverses formes de médias de communication [9].

#### I.4.1 Définition

Une antenne est un conducteur parcouru par un courant électrique rayonnant dans l’espace une onde électromagnétique.

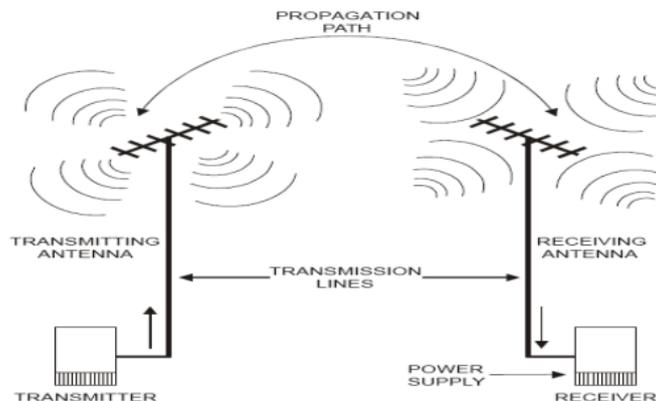


Figure I.8: liaison radio

**A l'émission** : afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer l'onde électromagnétique guidée issue d'un générateur en puissance rayonnée : c'est un transducteur.

**A la réception** : de façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception, dans ce sens l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance électromagnétique rayonnée en puissance électromagnétique guidée.[9]

## I.5 Les différentes zones de rayonnement

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

- Les termes en  $1/r$  correspondent au rayonnement.
- Les termes en  $1/r^2$  de E sont reliés à l'induction.
- Les termes en  $1/r^3$  de E et en  $1/r^2$  de H proviennent de l'électrostatique.

On reconnaît aussi 3 régions aux caractéristiques différentes pour l'expression des champs. Les limites de ces régions, bien qu'imprécises, dépendent de la longueur  $h$  (x, y, z) de l'antenne suivant l'axe considéré. Il existe en effet, un déphasage de plus en plus important entre tous les points sur la structure constituant l'antenne par rapport à un axe perpendiculaire à l'observation lorsque les dimensions de l'antenne croissent. **La figure 9** montre la différence de parcours qui engendre le déphasage.

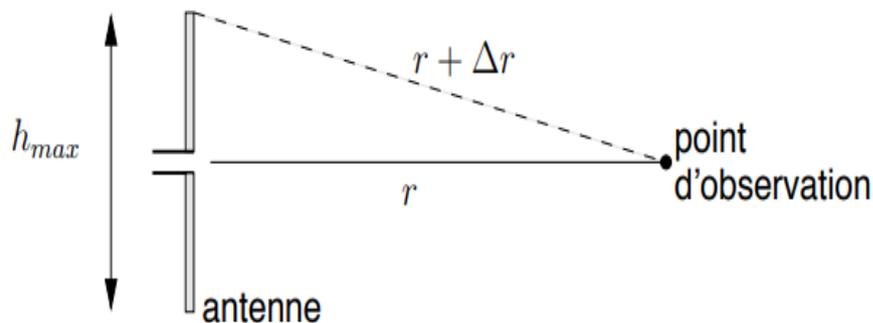


Figure I.9: Différence de parcours entre points sur un même axe

### I.5.1 Zone de Rayleigh

La zone de Rayleigh, également appelée **zone proche**, est la région située près d'une antenne ou d'un émetteur où les champs électromagnétiques ne se propagent pas encore comme des ondes planes.

Dans cette zone, les champs électriques et magnétiques sont complexes et varient significativement en fonction de la distance par rapport à l'antenne.

La distance à partir de l'antenne où la zone de Rayleigh commence dépend de la longueur d'onde de l'onde émise. Plus la longueur d'onde est courte, plus la zone de Rayleigh est proche de l'antenne.

Dans la zone de Rayleigh, les champs électromagnétiques sont dominés par des effets inductifs et électrostatiques, comme vous l'avez mentionné.

La zone de Rayleigh est une région proche de l'antenne où les champs électromagnétiques sont complexes et dominés par des effets inductifs et électrostatiques. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne, les ondes se propagent plus uniformément.

### I.5.2 Zone de Fraunhofer

- La zone de Fraunhofer est également appelée **zone de champ lointain**. Elle se situe à une distance suffisamment éloignée de l'antenne, où les ondes électromagnétiques ont déjà évolué et se comportent comme des ondes planes.
- Dans cette zone, les champs électriques et magnétiques sont orthogonaux entre eux et orthogonaux à la direction de propagation.
- Le rapport entre le champ électrique moyen ( $E$ ) et le champ magnétique moyen ( $H$ ) est constant et déterminé par l'impédance intrinsèque du vide ( $\eta_0$ ), qui est d'environ  $120\pi$ .
- Le front d'onde est plan, et la décroissance des champs en fonction de la distance suit une loi en  $1/r$  (où  $r$  est la distance par rapport à l'antenne).

### I.5.3 Zone de Fresnel

- La zone de Fresnel est une région intermédiaire entre la zone de Rayleigh (proche de l'antenne) et la zone de Fraunhofer (loin de l'antenne).

- Dans cette zone, les champs électromagnétiques varient avec des oscillations importantes.
- Les interférences entre les ondes directes et réfléchies sont encore présentes, mais moins prononcées que dans la zone de Fresnel proche.

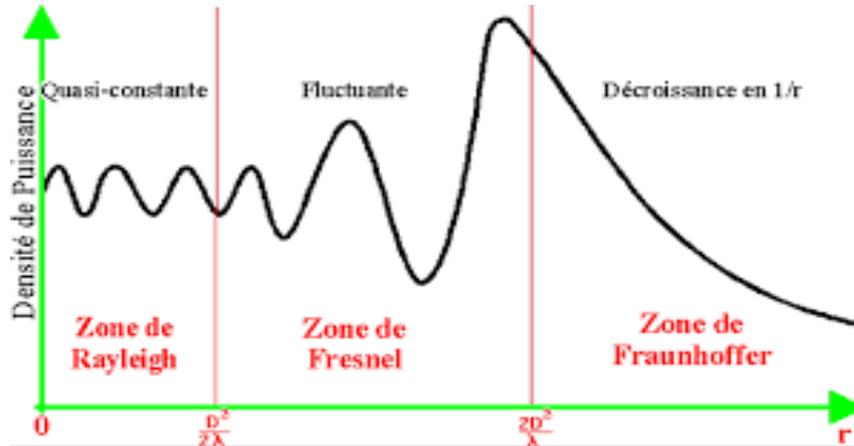


Figure I.10: limites des 3 zones de rayonnement

## I.6 Les paramètres caractéristiques des antennes

L'antenne est un élément fondamental dans un système radioélectrique, et ses caractéristiques telles que le rendement, le gain, et le diagramme de rayonnement influencent directement les performances en termes de qualité et de portée du système.[10]

Toute antenne peut être caractérisée par plusieurs paramètres fondamentaux, les principaux sont :

### I.6.1 Diagramme de rayonnement

#### Définition

La répartition dans l'espace de l'énergie rayonnée ou reçue est caractérisée par le diagramme de rayonnement de l'antenne. Le diagramme de rayonnement peut soit :

Représenter la répartition de la puissance par unité d'angle solide dans la direction d'angle solide  $P(\theta, \varphi)$  ( $W / m^2$ )

Le diagramme de rayonnement en puissance est défini par le rapport :

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_{max}} \quad \text{I-28}$$

Où :  $P_{max}$  est la densité de puissance maximale mesurée.

Soit être tracé en fonction du champ rayonné  $E(\theta, \varphi)$  (V/m)

Les propriétés des ondes planes permettent d'écrire :

$$P(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} \frac{|E|^2}{120\pi} \text{ (W / m}^2\text{)} \quad \text{I-29}$$

Donc, le diagramme de rayonnement en champ est déterminé à partir de la racine carrée de la densité de puissance :  $r_{champ} = \sqrt{r(\theta, \varphi)}$  I-30

Donc, il suffit de connaître l'un de ces deux diagrammes.

Ces diagrammes sont le plus souvent exprimés en dB :  $r_{dB} = 10 \log_{10}(r(\theta, \varphi))$

**Représentation graphique**

La connaissance de ces diagrammes est de grande importance. Il est plus facile de faire des coupes, l'une par un plan vertical et l'autre par un plan horizontal. Il y a plusieurs représentations graphiques possibles. Le diagramme de rayonnement peut être représenté en :

**a) En coordonnées polaires**

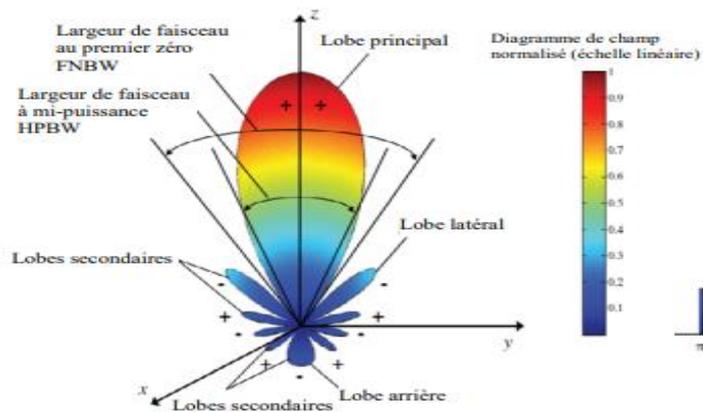


Figure I.11: diagramme de Rayonnement en coordonnées polaires [11]

**b) En coordonnées cartésiennes :**

Avec une échelle linéaire pour  $r(\theta, \varphi)$  :

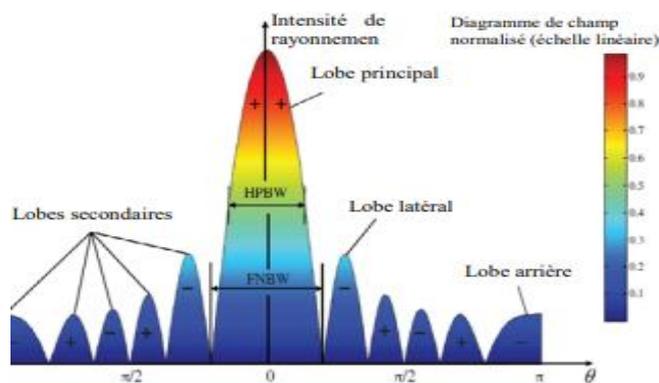


Figure I.12: diagramme de Rayonnement en coordonnées cartésiennes [11]

Les deux figures (11 et 12) présentent les principaux lobes du diagramme de rayonnement :

- Le lobe principal : c'est le lobe le plus important car il présente la directivité d'une antenne.
- Les lobes secondaires : ils correspondent à un maximum de la puissance dans une direction autre que la direction privilégiée. Idéalement, ils doivent être les plus faibles.
- Le lobe arrière : c'est un lobe secondaire dans la privilégiée de l'antenne (arrière de l'antenne).

### I.6.2 Gain d'une antenne

Le gain d'une antenne est le rapport entre la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne dans la direction  $(\theta, \varphi)$  et la densité de puissance à rayonnement isotrope, les 2 antennes étant alimentées par la même puissance.

On notera :

$P(\theta, \varphi)$  : la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne directive ( $W/m^2$ ).

$P_0$  : la densité de puissance moyenne rayonnée par l'antenne isotrope ( $W/m^2$ ).

$P_t$  : la puissance totale rayonnée par les deux antennes (W).

$$\text{Le gain est alors donné par : } G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0} = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_t / 4\pi R^2} = \frac{4\pi R^2 P(\theta, \varphi)}{\iint P(\theta, \varphi) ds} \quad \text{I-31}$$

La surface d'intégration  $S$  est une surface fermée pouvant être une sphère de centre  $O$ , position de l'antenne, et de rayon  $R$ .  $ds = R^2 \sin\theta d\theta d\varphi$  ;  $0 \leq \theta \leq \pi$  et  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$

$$\text{On peut écrire : } G(\theta, \varphi) = \frac{4\pi R^2 |f(\theta, \varphi)|^2}{\iint_S |f(\theta, \varphi)|^2 ds} = \frac{4\pi R^2 r(\theta, \varphi)}{\iint_S r(\theta, \varphi) ds} \quad \text{I-32}$$

Dans le cas où le diagramme ne dépend que de  $\theta$  et pas de  $\varphi$ , l'intégrale se simplifie et s'écrit :

$$G(\theta) = \frac{4\pi R^2 f^2(\theta)}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi R^2 f^2(\theta) \sin\theta d\theta} = \frac{2f^2(\theta)}{\int_0^\pi f^2(\theta) \sin\theta d\theta} = \frac{2r(\theta)}{\int_0^\pi r(\theta) \sin\theta d\theta} \quad \text{I-33}$$

Avec :

$\theta$  Angle entre une direction courante et l'axe de l'antenne.

$f(\theta)$  fonction de rayonnement en champ de l'antenne.

Lorsqu'on parle de gain d'une antenne, on parle souvent de gain maximal.

Donc,  $G_{max}$  est obtenu pour  $r(\theta) = 1$ . Donc :  $G$

$$\max = \frac{2}{\int_0^\pi \sin \theta d\theta} \quad (I.34)$$

Donc, comme le gain et le diagramme de rayonnement sont intimement liés, on pourra calculer le gain d'une antenne connaissant son diagramme de rayonnement.

Lorsque 'on parle de gain d'une antenne, on désigne le gain maximum de l'antenne exprimé en dB :  $G_{dB} = 10 \log_{10}(G)$

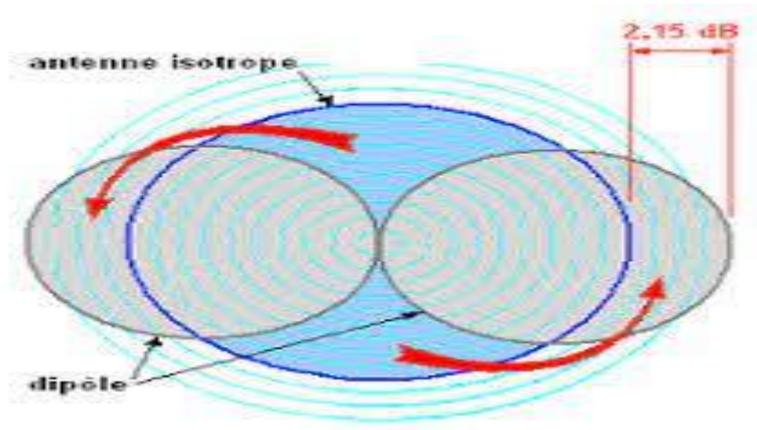


Figure I.13 : le gain des antennes isotrope et l'antenne dipôle

### I.6.3 Angle d'ouverture d'une antenne

L'angle d'ouverture d'une antenne, est l'angle de direction pour laquelle la puissance rayonnée est la moitié (-3dB) de la puissance rayonnée par la direction la plus favorable. Plus cet angle est étroit plus l'antenne est directive.

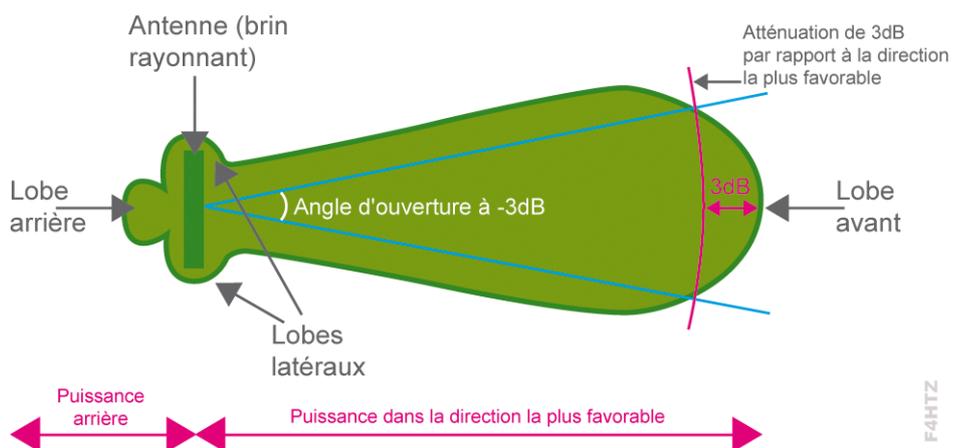


Figure I.14: angle ouverture d'une antenne

### I.6.4 La directivité et l'angle solide

#### L'angle solide

L'angle solide, notée  $\Omega$ , est une notion géométrique spéciale (3 dimensions), ce que l'angle, est au plan (2 dimensions). Il s'agit d'évaluer une surface d'espace que l'on peut voir dans une direction donnée. Ainsi, l'espace toute entier (sphère depuis son centre) est vu comme angle solide de  $4\pi$  stéradian.

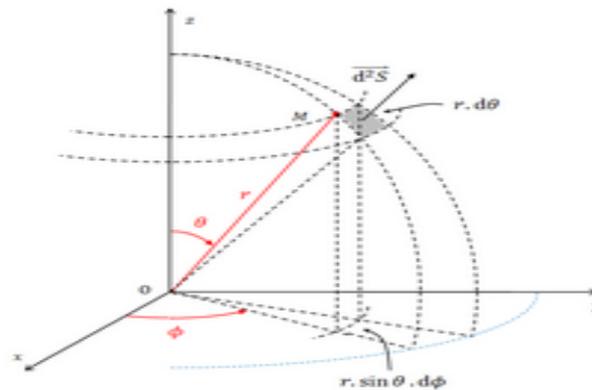


Figure I.15: représentation d'angle solide

#### La directivité

La directivité représente la puissance rayonnée dans une direction comparée à celle d'une antenne isotrope rayonnant au total la même puissance.

Quand on donne la directivité d'une antenne sans préciser de direction, il s'agit de la valeur maximale de la fonction  $D(\theta, \phi)$

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{\bar{U}} \quad \text{I-34}$$

$\bar{U}$  : est la puissance moyenne par unité d'angle solide, c'est dire la puissance totale rayonnée divisée par  $4\pi$ .

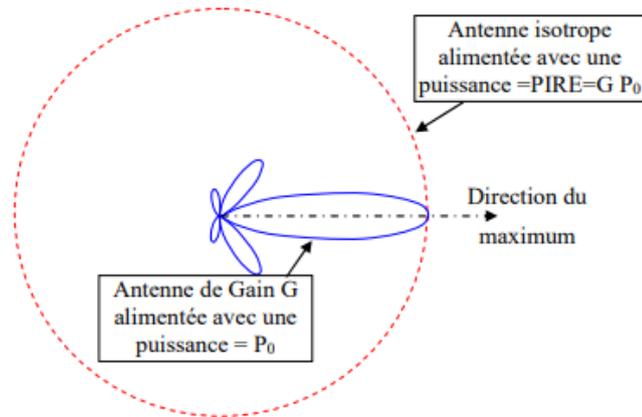
### I.6.5 La PIRE

La PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) d'une antenne est la puissance qu'il faudrait fournir à une antenne isotrope sans perte pour que celle-ci rayonne la même puissance dans la direction du maximum de l'antenne.

$$\text{PIRE} = G \cdot P_0 \quad \text{I-35}$$

$G$  : est le gain de l'antenne.

$P_0$  : est la puissance d'alimentation.



Ac

Figure I.16: La PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente)

### I.6.6 Le rendement

Comme tous les circuits à pertes, une fraction plus au moins appréciable de la puissance fournie se trouve à la sortie. Dans le cas d’une antenne les pertes sont liées à la résistance de perte.

Donc, par définition, le rendement est le rapport entre la puissance totale rayonnée et la puissance d’alimentation :  $\eta_R = \frac{P_t}{P_a}$  I-36

Le plus souvent, surtout en hautes fréquences, le rendement est très voisin de l’unité ( $\eta_R=1$ ) et l’on confond le gain et la directivité.

### I.6.7 Surface effective ou surface de captation

En réception si une antenne est éclairée par une onde incidente plane d’intensité  $\mathfrak{S}$ , alors la puissance détectée en sortie d’antenne notée **P reçue** vaut : **P reçue =  $\mathfrak{S} \cdot S_e$**  I-37

Où  $S_e$  : est la surface effective de l’antenne encore appelée surface de captation.

$S_e$  est en fait la surface équivalente de l’antenne, c’est-à-dire la surface qu’il faudrait placer devant l’onde incidente pour écranter une puissance égale à P reçue.

La surface effective est inférieure ou égale à la surface réelle d’une antenne lorsque celle-ci est une ouverture (trou dans plan, réflecteur type parabole)

Le théorème de réciprocité montre que le gain et la surface effective sont reliées par la relation suivante :

$$\frac{S_e}{G} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad \text{I-38}$$

### I.6.8 Impédance

Pour évaluer l'impédance d'une antenne, on assume une antenne en émission. L'antenne est alors considérée comme une charge à l'entrée de laquelle existe un courant  $I_{in}$  et une tension  $V_{in}$ . Le rapport de ces deux quantités fournit l'impédance  $Z_{in}$  (ou mieux encore,  $Z_a$ ) :

$$Z_a = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_a + j X_a \quad \text{I-39}$$

### I.6.9 Resistance de rayonnement

La résistance de rayonnement est définie en un point M de l'antenne parcouru par un courant  $I_M$

La résistance de rayonnement modélise l'antenne et représente la puissance rayonnée active.

En effet, l'antenne rayonne de l'énergie associée aux champs électrique E et magnétique H qu'elle émet.

La résistance de rayonnement  $R_M$  est donnée par la loi d'Ohm :

$$R_M = \frac{P_t}{I_M^2} = \frac{P_t}{\left(\frac{\sqrt{2}}{2} I_0\right)^2} = \frac{P_t}{I_0^2/2} = \frac{2}{I_0^2} \iint_S P(\theta, \varphi) ds \quad \text{(I.40)}$$

$I_M$  : Courant efficace au point M

$I_0$  : Courant maximal au point M

### I.6.10 Efficacité de rayonnement

Comme dans tout circuit à pertes, une fraction plus ou moins appréciable de la puissance fournie se retrouve à la sortie. Dans le cas d'une antenne, la sortie représente l'émission ; les pertes sont liées à la résistance de pertes. Plus faible est la résistance de pertes, meilleure est l'efficacité. L'efficacité de rayonnement de l'antenne qu'on note par  $\varepsilon$  considère le rapport de la puissance rayonnée  $\langle P_t \rangle$  à la puissance fournie à l'entrée de l'antenne  $\langle P_{in} \rangle$  :

$$\varepsilon = \frac{\langle P_t \rangle}{\langle P_{in} \rangle} = \frac{R_{ri}}{R_{ri} + R_{pertes}} \quad \text{(I.41)}$$

### I.6.11 Intensité de rayonnement

L'onde électromagnétique rayonnée à distance suffisante de l'antenne se comporte comme une onde plane. Le champ électrique et le champ magnétique sont orthogonaux entre eux et orthogonaux à la direction de propagation de l'onde (celle-ci s'éloigne de l'antenne qui en est la source), Les concepts de l'onde plane peuvent donc être appliqués ici.

Or, on sait que le vecteur de Poynting  $P$  indique la quantité de puissance électro- magnétique instantanée qui se propage par unité de surface. Pour connaître la densité de puissance en moyenne dans le temps, il faut réaliser :

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_T^0 P dt = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{2} E \times H \right\} \quad \text{Avec : } P^{\rightarrow} = \frac{1}{2} E \times H \quad I-40$$

### I.6.12 Ouverture ou longueur effective

L'ouverture effective d'antenne ( $A_e$ ) est la surface d'ouverture qui représente la capacité de l'antenne à collecter ou émettre des ondes électromagnétiques. [12]

La formule de l'aire efficace  $A_e$  d'une antenne est intimement liée à sa directivité  $D$  et à la longueur d'onde  $\lambda$  du signal qu'elle reçoit. Elle est donnée par la relation suivante :

$$A_e = \lambda^2 4\pi D \quad I-41$$

### I.6.13 Température équivalente de bruit

La température équivalente de bruit d'une antenne représente la température à laquelle un élément rayonnant (comme une antenne) serait équivalent en termes de bruit thermique.[13]

La formule générale pour calculer la température de bruit d'une antenne est la suivante :

$$T_m = T_0 + T_a + T_n \quad I-42$$

( $T_m$ ) est la température additionnelle de bruit du module (à l'entrée du module).

( $T_0$ ) est la température de référence (généralement 300 K ou 27 °C).

( $T_a$ ) est la température de bruit de l'antenne (équivalente à la température ambiante).

( $T_n$ ) est la température additionnelle de bruit de l'atténuateur.

### I.6.14 Facteur de bruit d'une antenne

Le facteur de bruit d'une antenne est un paramètre qui mesure la capacité de l'antenne à introduire du bruit supplémentaire dans le système de réception.[13]

Pour un quadripôle, au lieu de donner la température équivalente de bruit, on préfère utiliser un facteur qui indique le rapport signal à bruit à l'entrée du récepteur en fonction du rapport

signal bruit à la sortie. Le facteur de bruit F indique alors comment le récepteur dégrade le signal reçu en ajoutant son propre bruit.

$$F = \frac{SNR_I}{SNR_0} \geq 1 \tag{I-43}$$

$SNR_I$  est le rapport signal-à-bruit en puissance à l'entrée et  $SNR_0$  celui à la sortie .

Aussi :  $F = 1 + (T_e/T_0)$  I-44

$T_0=290$  K

### I.7 Les types d'antennes

Les antennes peuvent être de différents types et formes, adaptées à diverses applications, allant de la simple antenne de réception radio domestique aux systèmes complexes de télécommunication par satellite.[14]

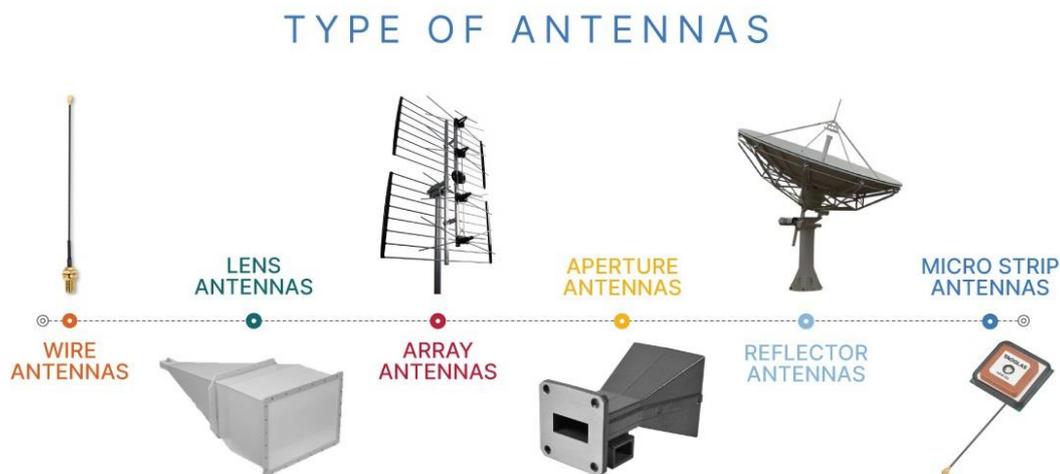


Figure I.17: différents types d'antennes

#### I.7.1 Antennes filaires

Les antennes filaires sont les plus courantes. Elles sont utilisées pour différents types de transmissions, que ce soit sur des véhicules, des bâtiments, des bateaux, des avions, etc. Il existe différents types d'antennes filaires, comme les dipôles droits, les boucles et les hélices, qui sont les plus courantes. Il est également possible de combiner différentes formes de base pour créer une antenne unique. L'antenne dipôle est souvent utilisée comme référence dans les systèmes radio-mobiles, car elle est la plus simple.

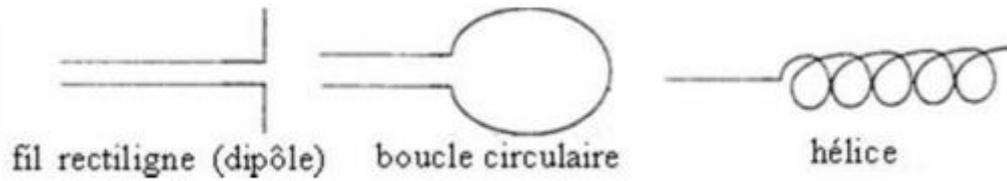


Figure I.18: Exemples d'antennes filaires

### I.7.2 Les antennes à lentilles

Les antennes à lentilles sont des dispositifs de focalisation qui sont utilisés dans de nombreuses applications hyperfréquences. Elles sont constituées d'une source primaire et d'un système focalisant diélectrique. Ces antennes utilisent une surface incurvée pour la transmission et la réception. Les lentilles de ces antennes sont souvent faites de verre, et elles exploitent les propriétés convergentes et divergentes de la lentille[15].

Il existe des méthodes pour optimiser la forme des antennes à lentilles pour obtenir des caractéristiques de rayonnement spécifiques. Par exemple, on peut utiliser un algorithme génétique couplé à une méthode d'analyse électromagnétique 3D pour optimiser la forme de la lentille.

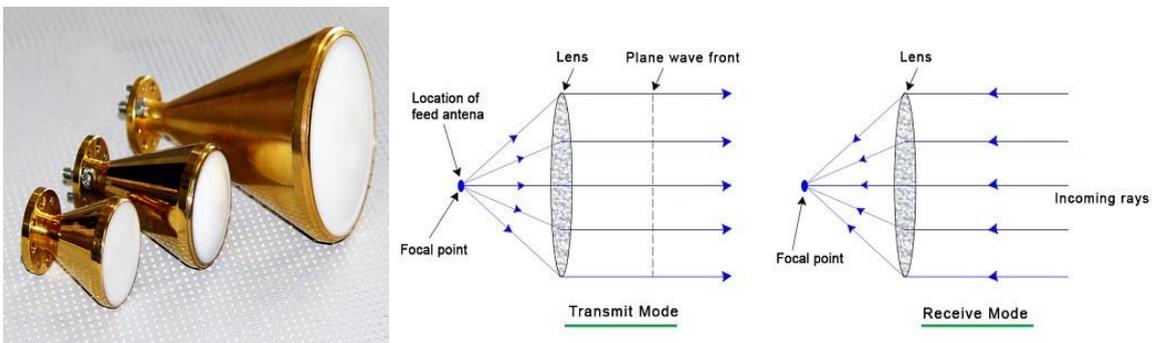


Figure I.19: Exemple d'une antenne à lentille

### I.7.3 Réseau d'antennes (antenne matricielle)

Un réseau d'antennes, aussi appelé antenne matricielle, est un ensemble d'antennes disposées et contrôlées de manière à fonctionner ensemble comme un système unique. Cette configuration permet de diriger et de modeler le faisceau émis ou reçu, améliorant ainsi la portée et la qualité du signal.

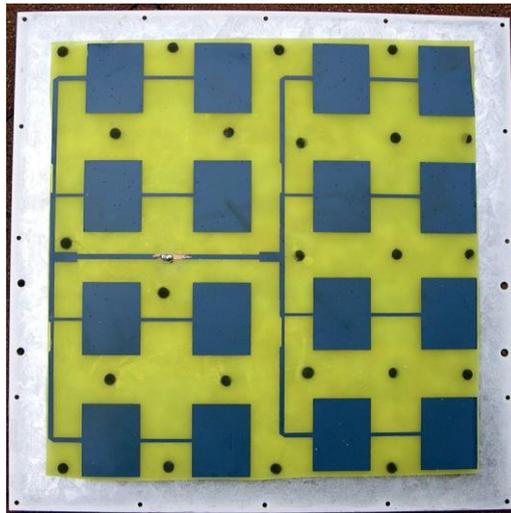


Figure I.20 : Réseau d'antennes microruban à 16 éléments (réseau phasé)

#### I.7.4 Antennes à ouverture

Les antennes à ouverture sont un sujet intéressant dans le domaine des antennes. Une antenne avec une ouverture à l'extrémité peut être qualifiée d'antenne à ouverture. Le guide d'ondes est un exemple d'antenne à ouverture.[15]

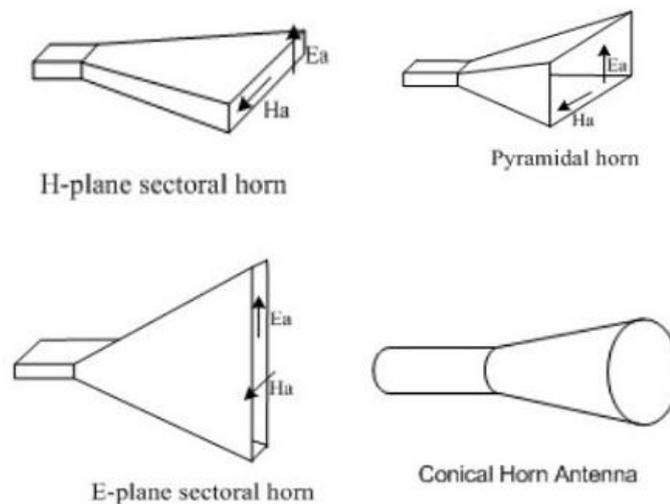


Figure I.21: Exemples d'antennes à ouverture

#### I.7.5 Les antennes à réflecteur

Ces antennes consistent principalement en une source qui illumine une surface réfléchissante. Les applications principales de ce type d'antennes se trouvent dans le domaine

des communications spatiales, qui nécessitent des antennes capables de communiquer sur des distances importantes de plusieurs millions de kilomètres. Le réflecteur parabolique est la forme la plus connue de ce type d'antennes. [16]

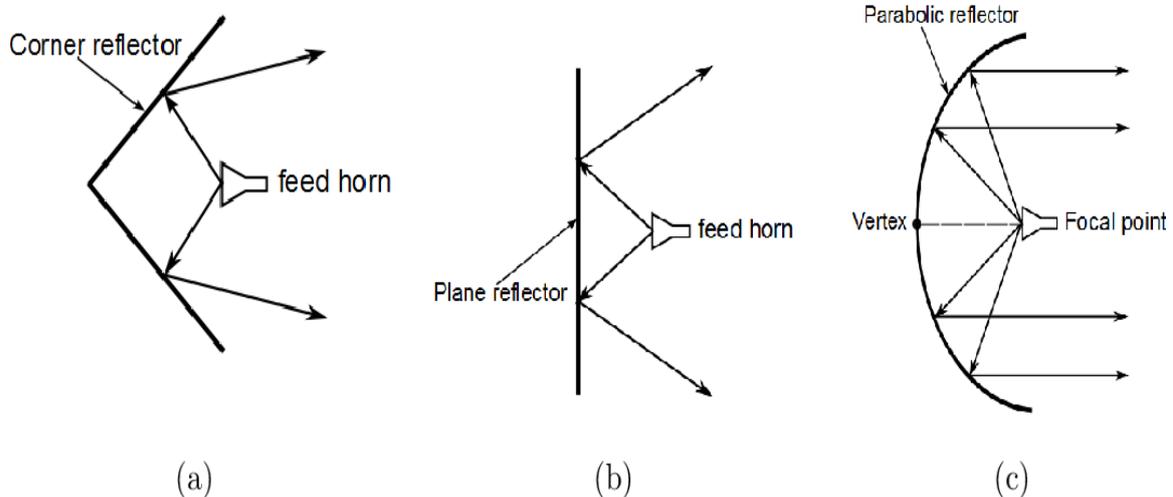


Figure I.22 : différents types d'antennes réflecteurs [17]

### I.7.6 Antennes micro-ruban ou antennes imprimées

Les antennes micro-ruban et les antennes imprimées sont deux types d'antennes qui sont souvent utilisées dans diverses applications, notamment les communications sans fil et les systèmes de communication mobile. [18]

**Antennes micro-ruban :** Ces antennes sont utilisées pour traiter des signaux ultra-haute fréquence. Elles sont souvent utilisées comme récepteurs de radio satellite ou de téléphone portable ou sont montées sur un avion ou un vaisseau spatial. Le type d'antenne micro-ruban le plus courant est l'antenne patch micro-ruban. Elle est réalisée en gravant le diagramme d'antenne dans une trace métallique.

**Antennes imprimées :** Ces antennes sont également connues sous le nom d'antennes patch ou antennes planaires. Elles sont constituées d'un plan de masse et d'un substrat diélectrique, dont la surface porte un ou plusieurs éléments métallisés. Les antennes imprimées sont utilisées lorsqu'on veut réduire l'encombrement d'une antenne, notamment sa hauteur au-dessus d'un plan de masse. Elles sont souvent utilisées dans les émetteurs-récepteurs portables de radiocommunications, sur les récepteurs GPS

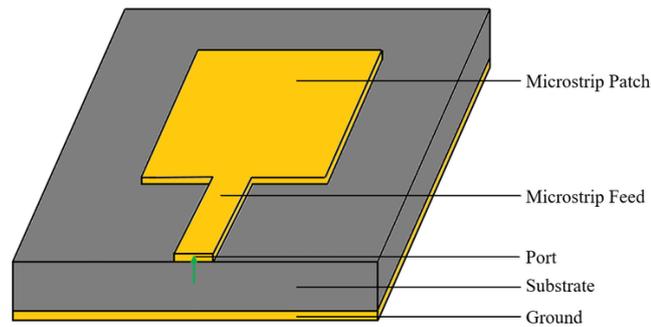


Figure I.23 : exemple d'une antenne patch

## I.8 Conclusion

Les antennes, bien que souvent négligées, sont des éléments fondamentaux dans notre monde connecté. Elles sont la pierre angulaire des systèmes de communication sans fil, de la radiodiffusion, et des technologies radar. La compréhension de leurs principes de base, des différents types existants, et des facteurs affectant leur performance est essentiel pour quiconque s'intéresse à la technologie et à l'ingénierie. Avec l'avancée continue de la technologie, les antennes continueront à évoluer, jouant un rôle toujours plus central dans l'innovation et la connectivité mondiale. Ainsi, bien plus que de simples objets, les antennes sont un symbole de l'ingéniosité humaine, facilitant la communication et l'exploration dans un monde de plus en plus interconnecté.

**Chapitre II**

**Etude de l'antenne patch**

**rectangulaire**

## Etude de l'antenne patch rectangulaire

### II.1 Introduction

L'antenne patch a été rapidement utilisée dans divers domaines tels que la technologie spatiale, les avions, les missiles, la communication mobile, le système GPS et la radio diffusion. Les antennes patch sont légères, de petite taille, peu coûteuses, simples de fabrication et faciles à intégrer aux circuits. Ce qui est plus important, c'est que ceux-ci peuvent être transformés en diverses formes comme rectangulaire, triangulaire, circulaire, carrée, etc. [19]

Ce chapitre a pour but de poser les bases générales et nécessaires, à la compréhension du fonctionnement des antennes imprimées. Nous allons vous présenter d'abord la structure d'une antenne Patch, ensuite nous énumérons les différentes techniques d'alimentation, puis nous exposons les principales caractéristiques des antennes patch. Et en fin nous décrivons le principe de fonctionnement de ces antennes et leur domaine d'application.

### II.2 Antenne patch micro ruban

#### II.2.1 Description des antennes patch micro ruban

L'antenne patch micro ruban se compose d'un patch rayonnant sur un côté d'un substrat diélectrique qui a un plan de masse de l'autre côté, comme montre (la figure II. 1)

Les antennes imprimées sont des antennes gravées généralement sur une plaque imprimée double face dont le substrat est un diélectrique de caractéristiques appropriées à la transmission THF (très haute fréquences) [20].

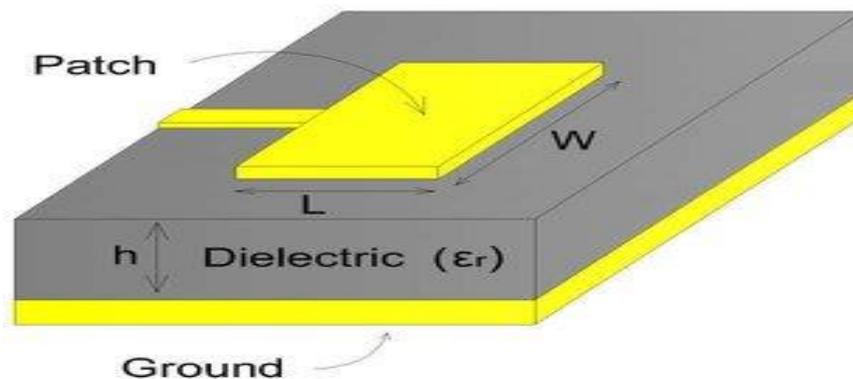


Figure II.1: antenne patch micro-ruban

Les antennes patch micro ruban gagnent en popularité pour une utilisation dans les applications sans fil en raison de leur structure à profil bas. Par conséquent, elles sont extrêmement compatibles avec les antennes intégrées dans les appareils sans fil portables tels que les téléphones portables, les téléavertisseurs, etc. Les antennes de télémétrie et de communication sur les missiles doivent être minces et conformes et sont souvent des antennes patch micro ruban.

Un autre domaine où ils ont été utilisés avec succès est la communication par satellite.

### **II.2.2 Choix de la technologie des antennes imprimées**

Actuellement, les antennes imprimées deviennent de plus en plus importantes en raison de la grande variété des formes géométriques qu'elles peuvent prendre et qui les rendent applicables aux différentes situations d'intégration. Parmi les avantages de cette technologie d'antennes, on peut citer : le faible poids, leur volume réduit, la conformabilité et la possibilité d'intégrer les circuits microondes au niveau des antennes. Ajoutons que la simplicité de leurs structures fait que ce type d'antenne est adapté au faible coût de fabrication. Ceci est une propriété clé qui explique l'introduction des antennes imprimées dans les applications de la communication mobile. [21]

Cependant, cette technologie répondant bien aux besoins de notre application. Donc, la conception antennes doit répondre à des compromis en termes de performances et de complexité de réalisation.

### **II.2.3 Description des différents éléments de la structure**

Les antennes microbandes, construites par la technique des circuits imprimés, ont en général des bandes de fréquence étroites dans leur structure de base. L'antenne microbande est représentée dans (la figure II.2), est constituée d'un mince conducteur métallique (habituellement de 17,5 à 35 $\mu\text{m}$  d'épaisseur en hyperfréquence et 9 $\mu\text{m}$  en millimétrique) de forme arbitraire, appelé élément rayonnant, déposé sur un substrat épais utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne et réduire les pertes par l'effet joule et amélioré la bande passante de l'antenne, la face inférieure est entièrement métallisée pour réaliser un plan de masse.[22]

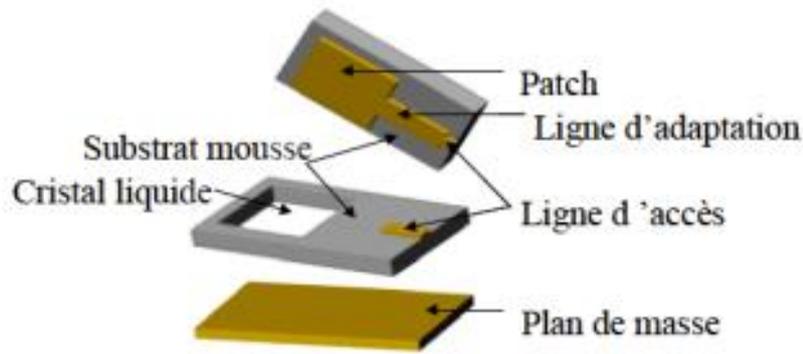


Figure II.2 : structure des antennes patch

La forme du patch conducteur peut être variée, mais elle influe sur les modes qui sont susceptibles de s'exciter dans l'antenne, et donc sur la nature du rayonnement. En pratique, on trouve essentiellement des rectangles, des disques, et plus rarement des anneaux ou des triangles. [23]

L'alimentation de l'antenne dépend de la manière dont l'antenne est intégrée dans le dispositif. Les trois principaux types sont : [22]

\_ Alimentation par ligne : une ligne micro-strip est reliée au patch et lui amène l'énergie. Elle a l'inconvénient de générer un rayonnement parasite.

\_ Alimentation par connecteur : un connecteur standard (SMA) est soudé au plan de masse qui est perforé pour permettre à l'âme central d'être reliée au patch en traversant le diélectrique. L'énergie est amenée par guide coaxial.

\_ Alimentation par fente : une ligne est disposée au dos du plan de masse, qui est entaillé d'une fente sous le patch afin que l'énergie amenée par la ligne soit communiquée à l'antenne.

L'impédance d'entrée de l'antenne que l'on souhaite la plus proche possible de  $50 \Omega$  en partie réelle, et nulle en partie imaginaire, dépend du type d'alimentation. On sait que pour une alimentation par connecteur, l'impédance varie avec la position du contact de la sonde avec le patch. Pour une alimentation par fente, c'est la largeur et la position de la fente qui vont permettre de s'approcher de l'adaptation idéale. D'une manière générale, il s'agit d'un problème complexe qui doit être traité au cas par cas par des simulations numériques, et dont la solution est souvent guidée par l'expérience. Son étude ne sera pas développée dans ce cours élémentaire sur les antennes imprimées.[24]

### II.3 Les différentes formes de patch

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peut être rectangulaire, carré, circulaire ou simplement un dipôle, ces formes sont les plus courantes car elles présentent une grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant. [25]

La figure II.3 montre ces différentes formes :

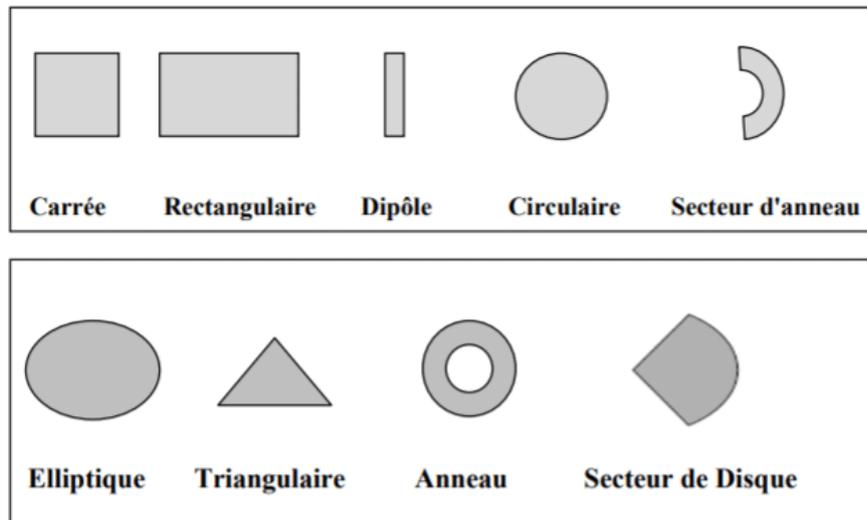


Figure II.3 : Différentes formes d'antennes patch [26]

### II.4 Techniques d'alimentation des antennes patch

Les antennes patch micro-ruban peuvent être alimentées par une variété de méthodes. Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories : avec et sans contact. Dans la méthode de mise en contact, la puissance RF est transmise directement au patch rayonnant à l'aide d'un élément de connexion tel qu'une ligne micro-ruban. Dans le schéma sans contact, le couplage de champ électromagnétique est effectué pour transférer la puissance entre la ligne micro-ruban et le patch rayonnant.

Les deux techniques d'alimentation les plus utilisées sont la ligne micro-ruban, la sonde coaxiale.

#### II.4.1 Alimentation par ligne micro ruban

D'abord la ligne micro ruban est directement connectée à l'élément rayonnant comme vu à la figure II.4, 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.[27]

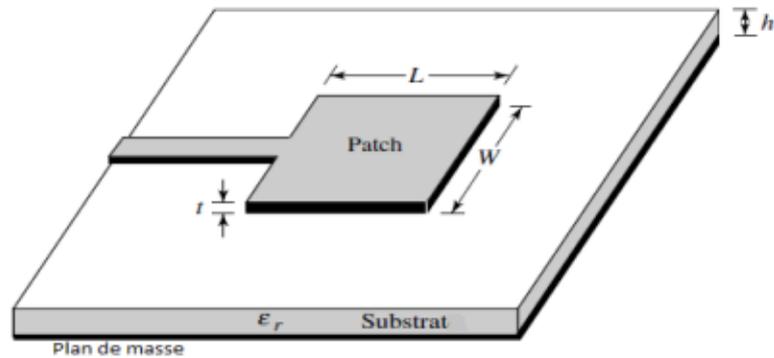


Figure II.4: Alimentation par ligne micro ruban

Nous pouvons utiliser 3 techniques d'alimentation avec la ligne micro ruban comme présentées sur la figure 5

(a) : Le point de jonction est sur l'axe de symétrie de l'élément.

(b) : Le point de jonction est décalé par rapport à cet axe et cela permet une meilleure adaptation d'impédance.

(c) : Alimentation axiale avec une encoche.

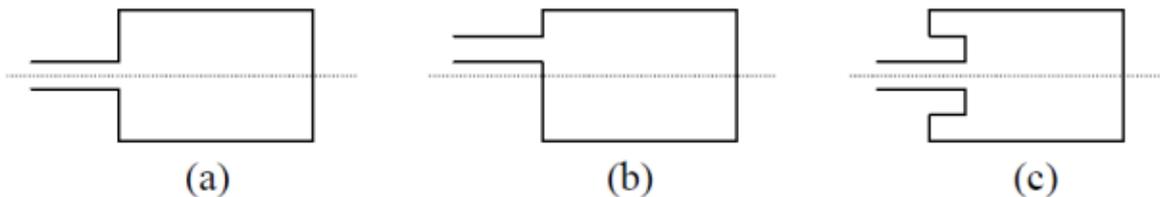


Figure II.5: position de la ligne micro-ruban [27]

#### II.4.2 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, son conducteur externe est relié au plan de masse. L'inconvénient de ce type d'alimentation réside dans la bande passante étroite et la difficulté de modélisation.

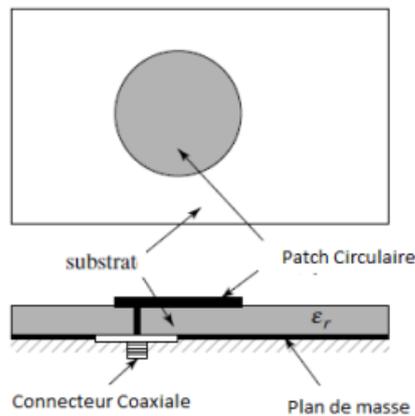


Figure II.6: Alimentation par sonde coaxiale

### II.4.3 Alimentation par couplage par fente

L'alimentation par couplage par fente consiste à introduire un couplage électromagnétique à travers une petite fente réalisée dans le plan de masse qui sépare deux substrats. L'un de ces substrats porte l'élément rayonnant (le patch), tandis que l'autre porte la ligne micro ruban, comme illustré dans la Figure 7. Cette configuration permet une optimisation indépendante entre la ligne d'alimentation et le patch. Elle est facile à modéliser mais présente un rayonnement parasite.

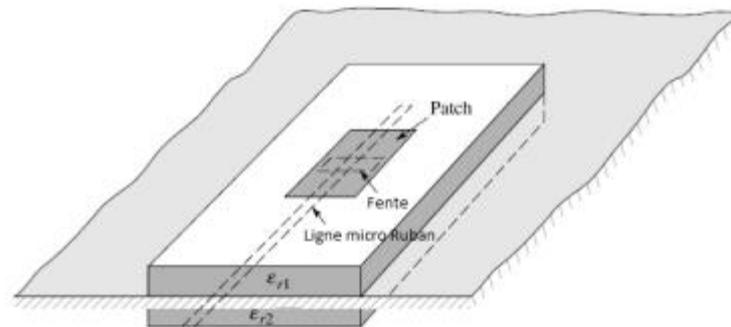


Figure II.7 : Alimentation par couplage par fente

### II.4.4 Alimentation par couplage de proximité

La meilleure bande passante réalisable en utilisant l'alimentation par couplage de proximité est illustrée par la Figure.8. 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 fabriquer.

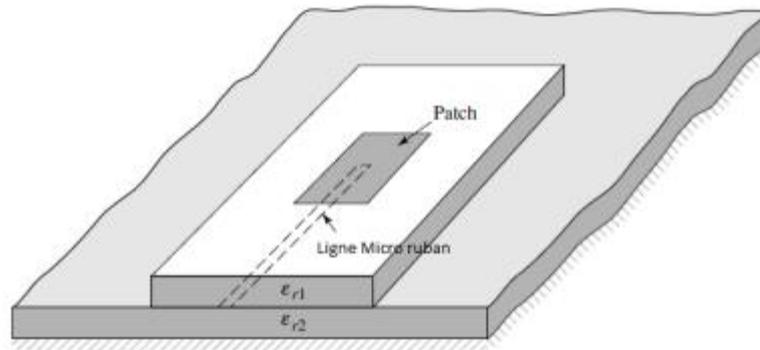


Figure II.8 : Alimentation par couplage de proximité

### II.5 Principe de Fonctionnements des antennes imprimées

Pour comprendre le fonctionnement d'un résonateur micro ruban, il est nécessaire de connaître les champs électromagnétiques notamment le champ proche. Lorsque la ligne d'alimentation est excitée par une source radiofréquence, une onde électromagnétique guidée entre la ligne et le plan de masse va se propager jusqu'à l'élément rayonnant (de largeur plus grande que la ligne, donc plus apte à rayonner). Une distribution de charge va s'établir sous l'élément rayonnant, et sur le plan de masse [28].

Pour simplifier, la structure de la « figure 9 » peut être assimilée à une cavité bornée par des murs électriques (plan de masse et élément rayonnant), et un mur latéral magnétique. Est accumulée selon un ensemble de fréquences modales (fréquences modales de résonance) auxquelles des configurations de répartition des champs sont permises, appelées modes.

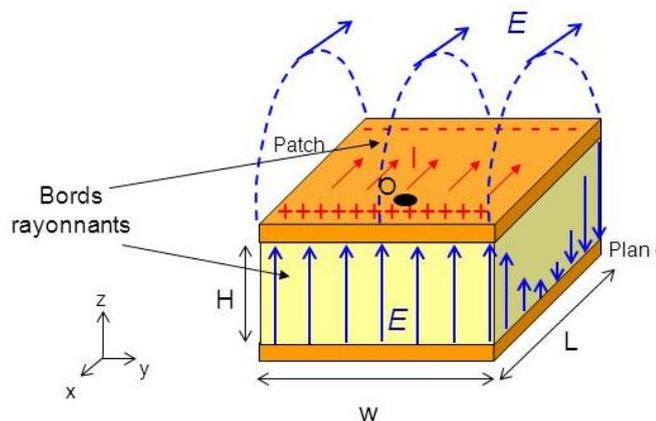


Figure II.9 : Rayonnement des antennes patch [29]

## II.6 Principales caractéristiques des antennes imprimées

Une antenne peut être caractérisée par plusieurs caractéristiques, les principales sont [25] :

### II.6.1 Coefficient de réflexion S11

De manière général lorsqu'une onde incident change de milieu de propagation, une partie de cette onde est réfléchiée et l'autre partie est transmise dans l'autre milieu. Le coefficient de réflexion d'une antenne se définit comme étant le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur les ondes réfléchiées.

### II.6.2 Rapport d'onde stationnaire (ROS) :

Le Rapport d'Onde Stationnaire (ROS) ou, en anglais, VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) tout comme le coefficient de réflexion traduit l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre deux éléments. Lorsque l'adaptation n'est pas parfaite, la partie de l'onde réfléchiée se superpose à l'onde incidente pour ne former qu'une seule onde, appelée onde stationnaire. [30]

### II.6.3 Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne, présente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans différentes directions de l'espace. Il indique la direction dans l'espace dans laquelle la puissance rayonnée est maximale.

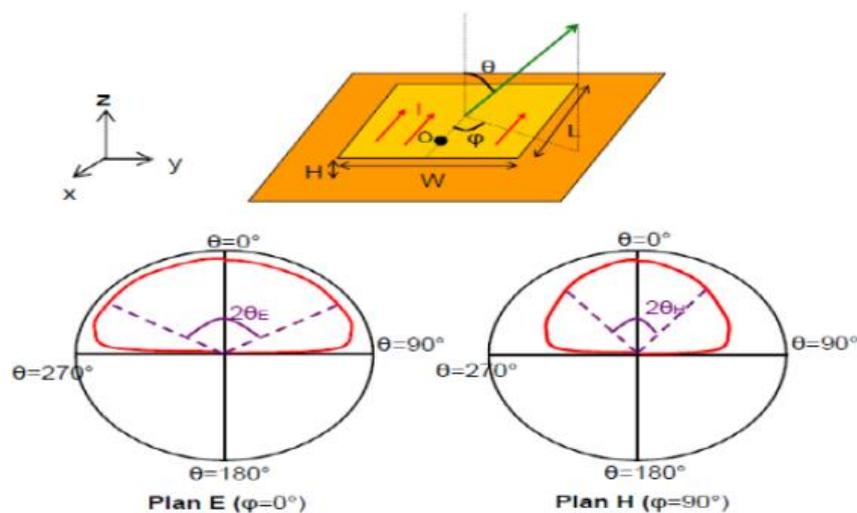


Figure II.10 : Diagramme de rayonnement de l'antenne patch

### II.6.4 La Directivité

La directivité  $D(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$  est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $P(\theta, \varphi)$  et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope

$$D(\theta, \varphi) = P(\theta, \varphi) / Pr4\pi = 4\pi P(\theta, \varphi) / P \quad \text{II-1}$$

### II.6.5 Le gain

Il dépend de sa directivité  $D(\theta, \varphi)$ , c'est le rapport entre la puissance rayonnante dans le lobe principal "Pa" et la puissance rayonnée "Pr" par une antenne de référence (la perte). Si est le gain "G", alors :

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad \text{II-2}$$

### II.6.6 La bande passante

La bande passante d'une antenne définit la plage de fréquence dans laquelle le coefficient de réflexion est inférieur à un seuil fixé arbitrairement. On déduit souvent la bande passante à partir de la courbe de son coefficient de réflexion inférieur à -10 dB ou -15 dB sur la bande passante.

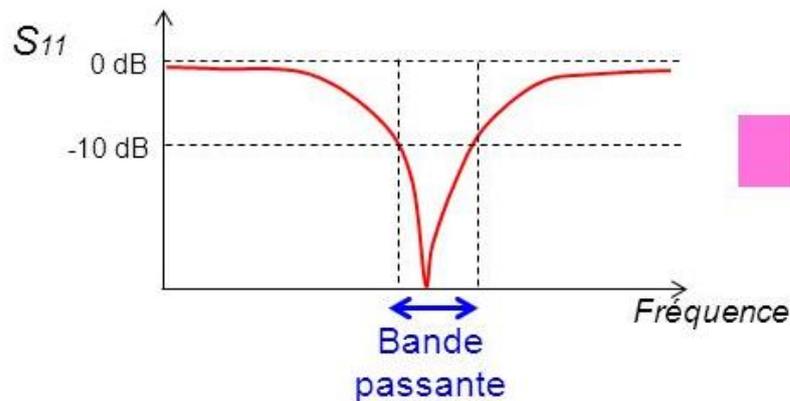


Figure II.11 : La bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion.

## II.7 Avantages et limitations des antennes imprimées

Actuellement, les antennes micro rubans sont largement utilisées, leurs applications couvrent un large domaine de fréquence 100 MHz à 100 GHz, leur configuration et dimensions favorisent leurs intégrations sur de nombreux mobiles (avion, voiture, missile,).

Parmi les avantages de ces d'antennes, on peut citer :

- Faible poids
- Encombrement réduit
- Conformations possibles
- Faible coût de fabrication, production en masse facile
- Rayonnement en polarisation linéaire et circulaire possibles
- Antennes multi-bandes, multipolarisations
- Compatibilité avec les circuits hybrides
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne

Toutefois, les antennes micro-ruban ont également des limitations que ne présentent pas les antennes traditionnelles :

- Bande passante étroite, souvent associée avec les problèmes de tolérances de fabrication
- Généralement faible gain (6 dB)
- Sur un grand plan de masse, ces antennes rayonnent uniquement dans le demi-plan
- Supportent uniquement des faibles puissances (<100 W)
- Pertes de rayonnement par ondes de surfaces dans le substrat diélectrique

Ces limitations sont connues depuis plusieurs années et des progrès considérables ont été réalisés depuis pour améliorer les performances des antennes patch. Notamment, leur bande passante peut être augmentée jusqu'à 70 % en utilisant une configuration multicouche et leur gain peut s'accroître de 30 % en mettant en réseau plusieurs antennes.

## II.8 Domaines d'applications des antennes patches

Il existe différentes applications réussies démontrant la possibilité de cette transition [26] :

- Télécommunications mobiles : Utilisées dans les téléphones portables, les modems sans fil et autres dispositifs de communication mobile.
- Systèmes de navigation : Présentes dans les dispositifs GPS et autres systèmes de positionnement.
- Réseaux sans fil : Employées dans les routeurs, les adaptateurs Wi-Fi, et les équipements de communication de données.
- Applications radar : Utilisées dans des systèmes de radar à courte portée, notamment pour les véhicules.

- Dispositifs médicaux : Intégrées dans les appareils médicaux pour des communications sans fil internes.

## II.9 Conception

Sur la base de la formulation simplifiée qui a été décrite, la procédure de conception suppose que les informations spécifiées sont  $\epsilon_r$  du substrat, la fréquence de résonance  $f_r$  et la hauteur du substrat  $h$ . La procédure est la suivante :

1. Pour un élément rayonnant efficace, une largeur pratique conduisant à une bonne efficacité de rayonnement est donnée par :

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_0} \mu_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{C_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad \text{II-3}$$

2. Déterminer  $\epsilon_{reff}$  la constante diélectrique effective de l'antenne micro-ruban en utilisant :

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad \text{II-4}$$

3. Déterminer  $L_{eff}$  la longueur effective de l'antenne micro-ruban en utilisant :

$$L_{eff} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad \text{II-5}$$

4. Une fois  $W$  déterminé en utilisant (II. 3), déterminer  $\Delta L$  en utilisant :

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_r + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_r - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad \text{II-6}$$

5. La longueur réelle du patch peut être maintenant déterminée en résolvant (II.7) pour  $L$ , tel que :

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\epsilon_0} \mu_0} - 2\Delta L \quad \text{II-7}$$

Les longueurs typiques de patches micro-ruban varient entre :

$$L \approx (0.47 \text{ } 0.49) \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = (0.47 \text{ } 0.49) \lambda_d \quad \text{II-8}$$

Où  $\lambda_d$  est la longueur d'onde dans le diélectrique. Plus  $\epsilon_r$  du substrat est petite, plus la dispersion est grande ; ainsi la longueur du patch est plus petite. En revanche, plus  $\epsilon_r$  est grande, plus les champs sont maintenus dans le substrat ; ainsi, la dispersion est plus petite et la longueur est plus longue et plus proche de  $\lambda_d/2$ . [31]

## **II.10 Conclusion**

Plusieurs techniques existent pour réaliser les antennes en se basant sur ses propriétés et ses caractéristiques afin d'assurer un bon fonctionnement et choisir la plus adaptée à l'application envisagée.[21]

Dans notre travail, le choix est porté sur les antennes patch, leurs avantages sont nombreux dont ils nous permettent de les utiliser dans divers secteurs.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'antenne patch en générale, ainsi que ses caractéristiques, principe de fonctionnement et avec ses différentes techniques d'alimentation. Une description des antennes patch a été aussi donnée en citant ses avantages et ses différentes applications.

Après ce bref aperçu sur les bases des antennes patch, le chapitre suivant sera consacré pour la conception et la simulation de l'antenne patch rectangulaire en utilisant les logiciels CST Microwave Studio et HFSS d'Ansys (High Frequency Structure Simulator).

**Chapitre III**

**Modélisation et simulation**

**d'une antenne patch sous**

**CST et HFSS**

## **Modélisation et simulation d'une antenne patch sous CST et HFSS**

### **III.1 Introduction**

Les antennes patch sont attractives pour l'utilisation dans les véhicules à grande vitesse, tels que les missiles, les avions et plus particulièrement les satellites [32]. Un grand nombre de recherches sur les antennes patch microbandes a été publié [32], [33]-[34].

L'objectif principal de ce travail est la conception et la simulation d'une antenne patch de forme rectangulaire. Cette antenne est excitée par une ligne micro ruban ayant un port d'alimentation adapté à  $50 \Omega$ . Les encoches d'adaptation insérées entre la ligne micro ruban et l'élément rayonnant ont un impact direct et positif sur l'amélioration des caractéristiques de rayonnement de ce type d'antenne en termes de coefficient de réflexion, de rapport d'ondes stationnaires, d'impédance d'entrée et de diagramme de rayonnement autour d'une fréquence de résonance de 2,4 GHz. Les simulations seront effectuées par les deux simulateurs HFSS (High Frequency Structure Simulator) et CST (Computer Simulation Technology).

### **III.2 Outils de simulation**

La conception des antennes devient de plus en plus complexe avec les progrès récents des systèmes de communication.

De nos jours, il est très important de trouver le logiciel le mieux adapté à la conception d'antenne que nous exigeons. Les structures Complexe d'antenne ne peuvent pas être simulées sans l'utilisation de ces logiciels, appelés solveurs électromagnétiques. Les critères importants des simulations sont le temps et la précision des résultats [35].

Dans ce chapitre, deux célèbres solveurs électromagnétiques High Frequency Structure Simulator (HFSS) et CST Microwave studio, sont comparés pour la précision et le temps de simulation avec des simulations d'antenne patch. En fin de compte, les avantages et les inconvénients de ces logiciels sont énoncés sur la base des résultats de la simulation.

#### **III.2.1 Description du Logiciel de Simulation CST :**

CST Microwave Studio est un logiciel de simulation électromagnétique de structure passives en 3 dimensions basée sur la résolution des équations de Maxwell suivant la technique des équations intégrales finies (Finité Intégration Technique). Cette méthode numérique offre une discrétisation de l'espace permettant la description directement en 3 dimensions de tous les composants des systèmes décrits, ce qui lui permet d'être appliqué à de nombreux problèmes

électromagnétiques allant de la statique aux hyperfréquences en analyses temporelle et fréquentielle [36].

### III.2.2 Description du Logiciel de Simulation HFSS

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un logiciel de simulation électromagnétique qui étudie des structures complexes en trois dimensions en simulant ces structures et en proposant des visualisations claires des résultats en 2D et en 3D. HFSS est utilisé essentiellement pour les expérimentations et les études de systèmes fonctionnant en hautes fréquences, il est exploité notamment pour calculer les paramètres S, les fréquences de résonances ainsi que les champs électromagnétiques. En utilisant les équations de Maxwell, le HFSS divise les structures géométriques complexes en des formes géométriques plus simples, précisément des tétraèdres sur lesquels le calcul mathématique sera plus faisable, d'où on commence à parler de la convergence qui est la persistance des résultats obtenus. Le logiciel présenté ici utilise la méthode des éléments finis [18].

### III.3 La Conception d'une antenne patch rectangulaire avec encoche

L'élément rectangulaire (Figure III-1) est sans contexte le plus utilisé. Pour la raison d'être facile dans sa conception, robuste et très facile à manipuler. Ils existent différentes méthodes pour la miniaturisation de ce type d'antennes, ce qui facilite leurs intégrations sur les circuits imprimés ou les cartes électroniques des appareils (téléphone portable, Modem wifi, carte wifi...).

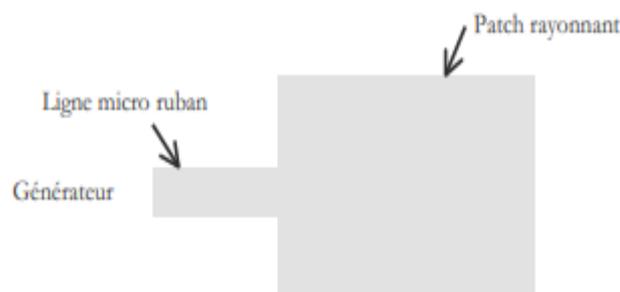


Figure III.1: Antenne Patch rectangulaire alimentée par une ligne micro ruban

Cette disposition présente un inconvénient si la ligne rayonne. C'est le cas en très haute fréquence. Le rayonnement de la ligne perturbe alors celui de l'antenne qui ne présente pas la même pureté de polarisation. Cependant pour les cas usuels, cette technique très utilisée,

présente le grand avantage de la simplicité de réalisation. Pour améliorer l'adaptation entre la ligne micro ruban et l'antenne, il est courant de réaliser des encoches (Figure III-2) dont la taille est à calculer afin d'obtenir une meilleure adaptation [38].

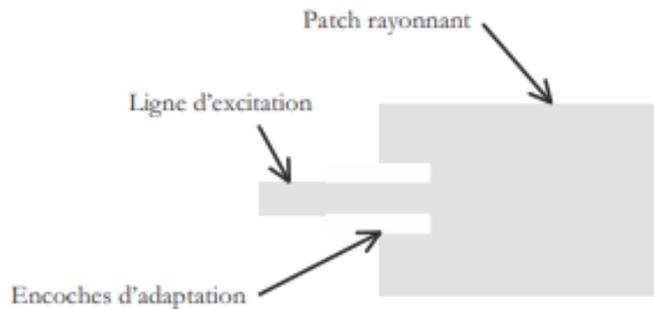


Figure III.2: Encoches d'adaptation [38]

### III.3.1 Structure de l'antenne

La figure III.3 illustre la structure d'antenne patch que nous avons conçue. Cette structure est composée d'un patch de forme rectangulaire, de longueur  $L_p = 29.5 \text{ mm}$  et de largeur  $W_p = 38 \text{ mm}$ , imprimée sur un substrat de type Epoxy-FR4, de permittivité relative de 4.3, d'épaisseur de  $1.5 \text{ mm}$ , de longueur  $L_s = 59 \text{ mm}$  et de largeur  $W_s = 76 \text{ mm}$ . L'antenne est excitée par une ligne micro ruban ayant un port d'alimentation de  $50 \Omega$ , de longueur  $L_m = 14.75 \text{ mm}$  et de largeur  $W_m = 2.86 \text{ mm}$ . Le tout est posé sur un plan de masse de longueur  $L_s = 59 \text{ mm}$  et de largeur  $W_s = 76 \text{ mm}$ . Les encoches insérées entre la ligne micro ruban et l'élément rayonnant ayant une largeur  $W_{in} = 0.74 \text{ mm}$  et une longueur  $L_{in} = 9 \text{ mm}$ , permettent d'améliorer les performances de rayonnement de cette antenne en termes de coefficient de réflexion, de rapport d'ondes stationnaires, d'impédance d'entrée et de diagramme de rayonnement. L'antenne est destinée à fonctionner à une fréquence de 2.4 GHz pour des applications Wifi.

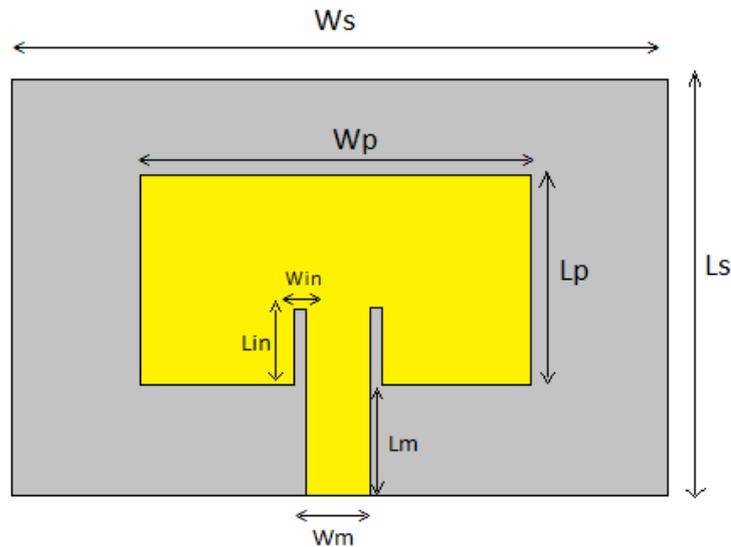


Figure III.3: Géométrie de l'antenne patch de forme rectangulaire

On a calculé les dimensions de l'antenne patch rectangulaire en utilisant les équations du tableau III.1.

Tableau III-1: Paramètres de l'antenne patch rectangulaire

Paramètre d'antenne	Equation	Légende
Largeur efficace de l'antenne(W)	$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$	fr : fréquence de résonance
Constante diélectrique effective ( $\epsilon_{reff}$ )	$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W}\right]^{-1/2}$	$\epsilon_r$ : permittivité du substrat
Longueur effective ( $L_{eff}$ )	$L_{eff} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{reff}}}$	h : l'épaisseur du substrat
L'extension de la longueur ( $\Delta L$ )	$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_r + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_r - 0.258)(W/h + 0.8)}$	
Longueur réelle (L)	$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} - 2\Delta L$	

Le tableau III.2 ci-dessous regroupe les dimensions de l'antenne patch proposée.

Tableau III-2: Dimensions de l'antenne patch de forme rectangulaire

<b>Paramètres</b>	<b>Description</b>	<b>Valeur (mm)</b>
<b>Ls</b>	Longueur du substrat et du plan de masse	59 mm
<b>Ws</b>	Largeur du substrat et du plan de masse	76 mm
<b>Hs</b>	Epaisseur de substrat	1.5 mm
<b>Mt</b>	Epaisseur de plan de masse Et du patch	0.035 mm
<b>Lp</b>	Longueur du patch	29.5 mm
<b>Wp</b>	Largeur de patch	38 mm
<b>Lm</b>	Longueur de la ligne micro-ruban	14.75 mm
<b>Wm</b>	Largeur de la ligne micro-ruban	2.86 mm
<b>Lin</b>	Longueur de l'encoche	9 mm
<b>Win</b>	Largeur de l'encoche	0.74 mm

A partir de ces dimensions nous allons faire la conception de l'antenne sous les deux logiciels CST et HFSS.

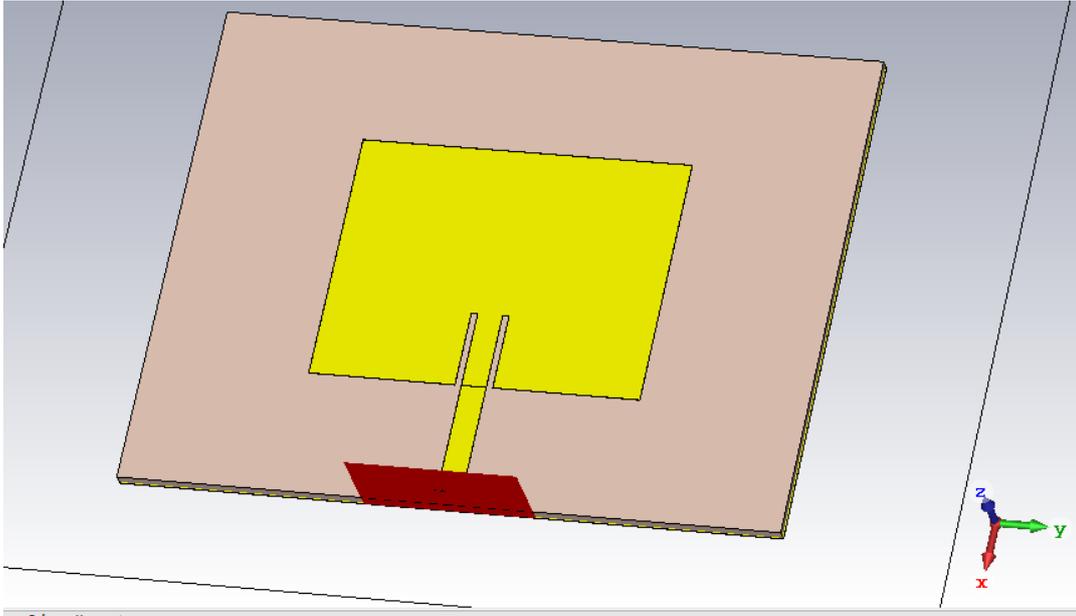


Figure III.4: Le design de l'antenne par CST

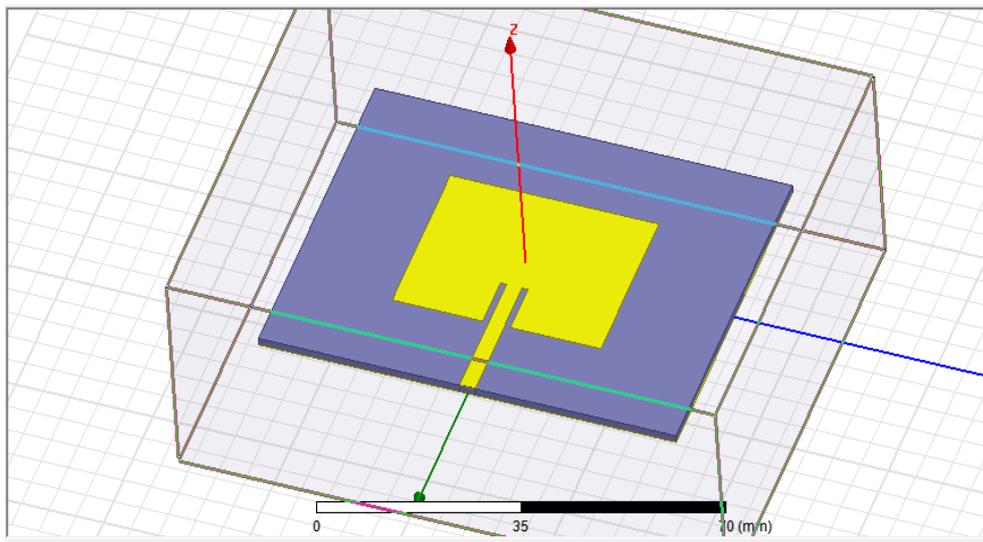


Figure III.5: Le design de l'antenne par HFSS

### III.4 Les résultats de simulation par le logiciel CST

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation obtenus en termes de coefficient de réflexion, de rapport d'ondes stationnaires et de diagramme de rayonnement autour d'une fréquence de résonance de  $2.4\text{ GHz}$ . Ces résultats sont représentés respectivement sur les figures III.6 jusqu' à figure III.12.

### III.4.1 Coefficients de réflexion ou perte de retour ( $S_{11}$ )

La figure III.6 donne les variations du paramètre  $S_{11}$  (Coefficient de réflexion) de l'antenne en fonction de la fréquence

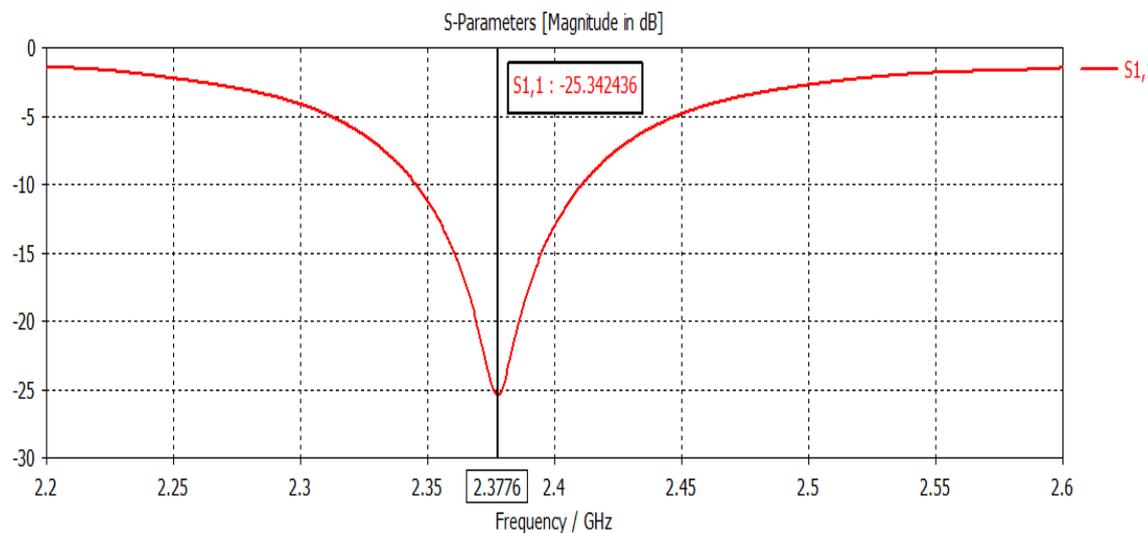


Figure III.6: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence (CST)

On remarque qu'on a une bonne adaptation à la fréquence 2.3776 GHz, le coefficient de réflexion est inférieur à -25 dB.

La largeur de bande de l'antenne est de 66 MHz autour de la fréquence de résonance 2.3776 GHz dans l'intervalle 2.3448 – 2.4109 GHz

### III.4.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR)

La figure III-7 montre la variation du VSWR en fonction de la fréquence.

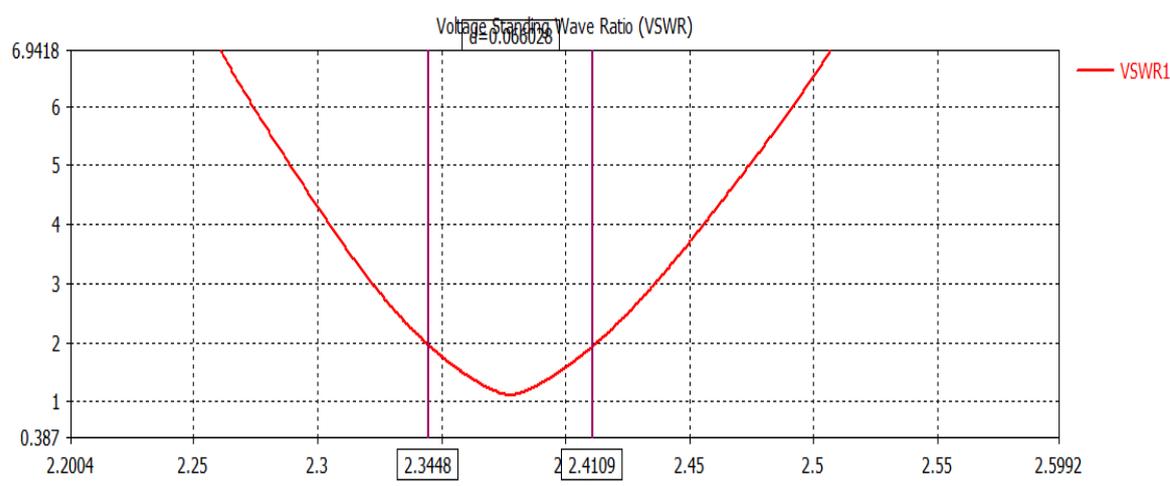


Figure III.7: VSWR en fonction de la fréquence (CST)

Le rapport d'ondes stationnaires est inférieur à 2 à la fréquence de résonance 2.3776 GHz, ce qui confirme que l'antenne est bien adaptée.

#### III.4.3 Diagrammes de rayonnement

Les figures III-8 jusqu' à III-11 présentent le diagramme de rayonnement de l'antenne en 3D et 2D à la fréquence 2.4 GHz.

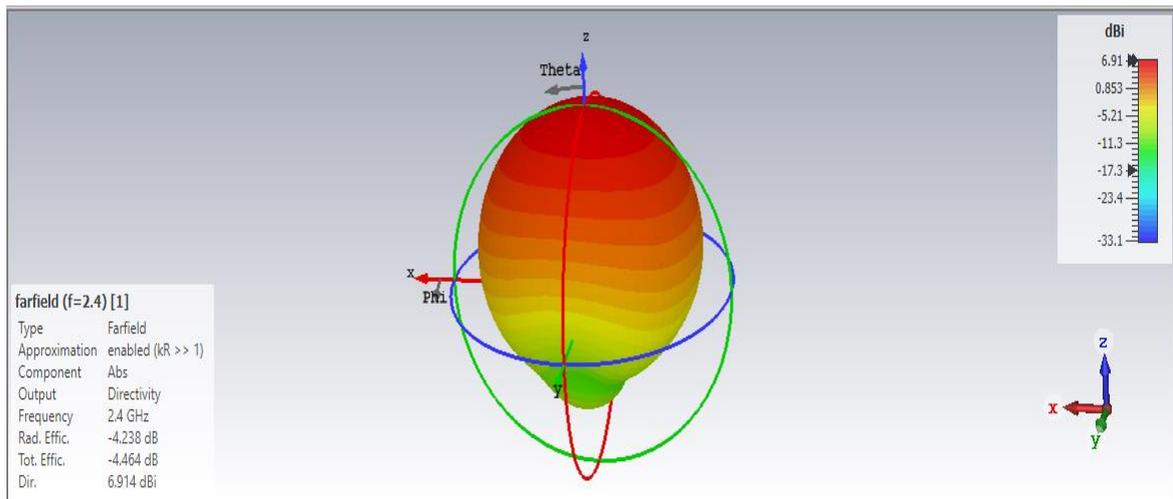


Figure III.8: Diagramme de rayonnement en 3D (directivité) de l'antenne patch (CST)

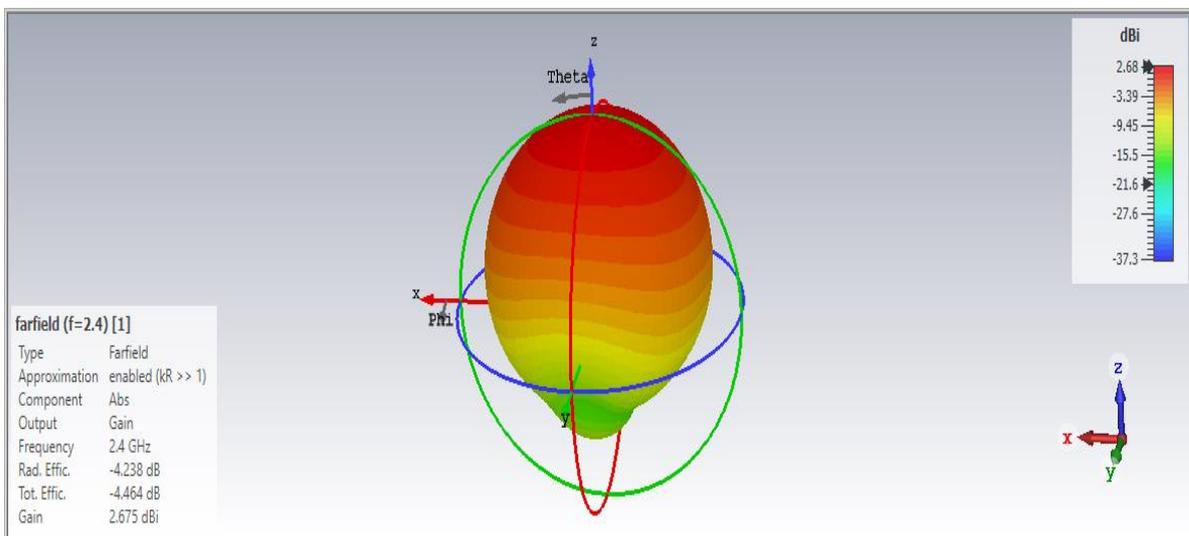


Figure III.9: Diagramme de rayonnement en 3D (Gain réalisé) de l'antenne patch (CST)

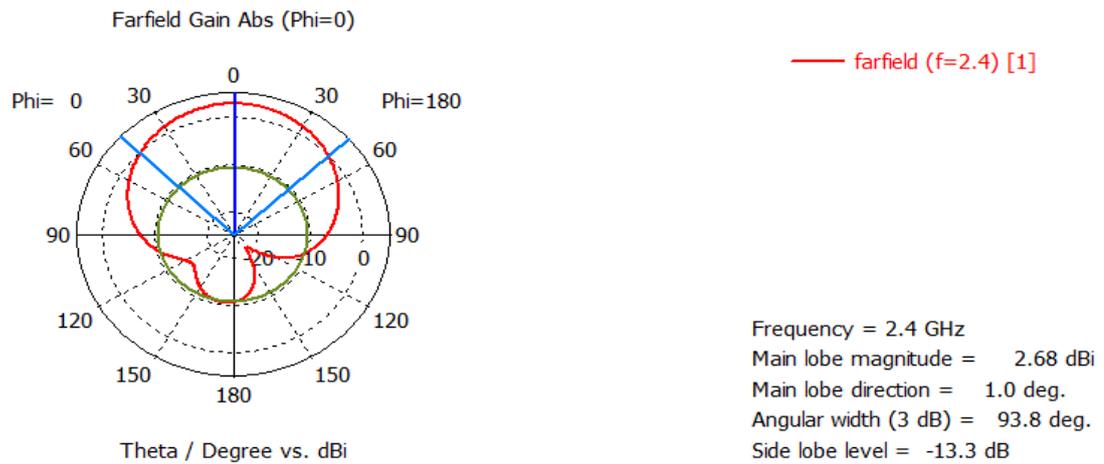


Figure III.10 : Diagramme de rayonnement en 2D ( $\phi=0^\circ$ ) de l'antenne patch (CST)

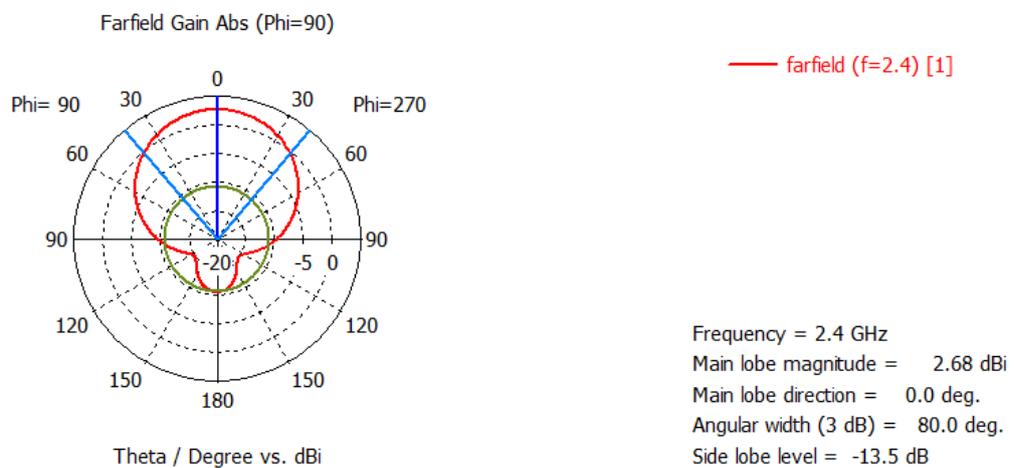


Figure III.11: Diagramme de rayonnement en 2D ( $\phi=90^\circ$ ) de l'antenne patch (CST)

Le tracé bidimensionnel du diagramme de rayonnement de cette antenne permet de visualiser ses composants notamment ses lobes dans deux plan vertical et horizontal. Les deux figures ci-dessus montre que, soit pour  $\phi=0^\circ$  ou soit pour  $\phi=90^\circ$ , le diagramme est principalement composé d'un lobe plus important. En observant le diagramme de rayonnement 3D, on peut constater que la plupart du rayonnement se trouve dans la direction verticale suivant de l'axe z avec un gain maximal de 2.68 dB.

#### III.4.4 Distribution de courant (courant de surface)

La figure III-12 montre la distribution de courant. On remarque qu'un fort courant est localisé autour de l'encoche

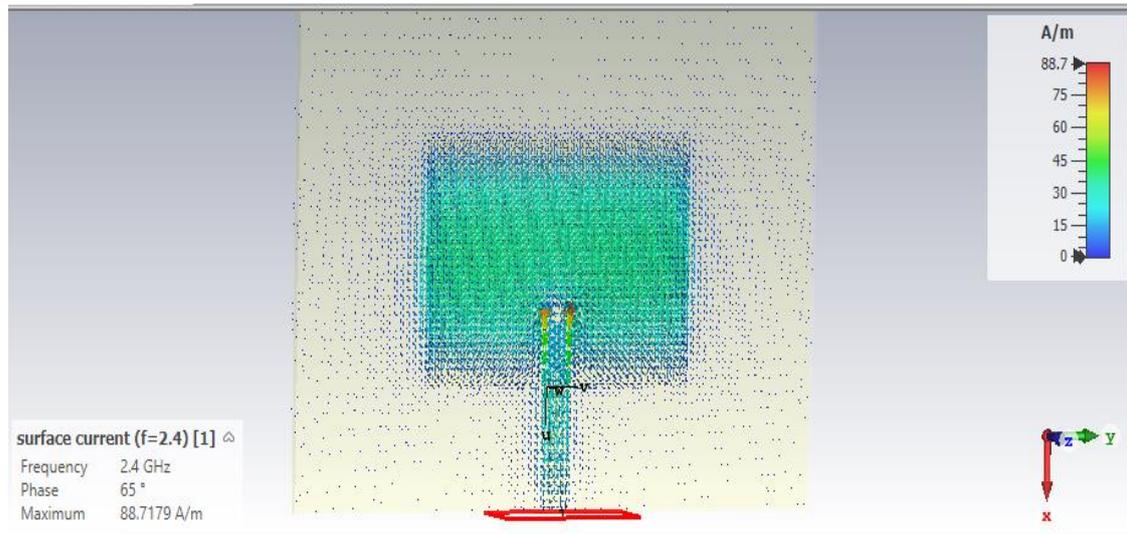


Figure III.12: Courant de surface de l'antenne patch (CST)

Tableau III-3: Résumé des résultats de la simulation de l'antenne patch sous logiciel CST

Paramètres	Valeur
Fréquence de résonance (GHz)	Fr = 2.3776 GHz
Pertes de retour ( $S_{11}$ )	$S_{11} \text{ min} = -25.34 \text{ dB}$
Bande passante (BW)	BW= 66 MHz à $S_{11} = -10 \text{ dB}$
Rapport d'onde stationnaire (VSWR)	VSWR = 1.1 < 2
Directivité	D = 6.914 dB
Gain	G = 2.68 dB

### III.5 Les résultats de simulation par le logiciel HFSS

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation par le logiciel HFSS obtenus en termes de coefficient de réflexion, de rapport d'ondes stationnaires et de diagramme de rayonnement autour d'une fréquence de résonance de 2.4 GHz. Ces résultats sont représentés respectivement sur les figures III.13 jusqu' à figure III.21.

#### III.5.1 Coefficients de réflexion ou perte de retour ( $S_{11}$ )

La figure III.13 donne les variations du paramètre  $S_{11}$  (Coefficient de réflexion) de l'antenne en fonction de la fréquence

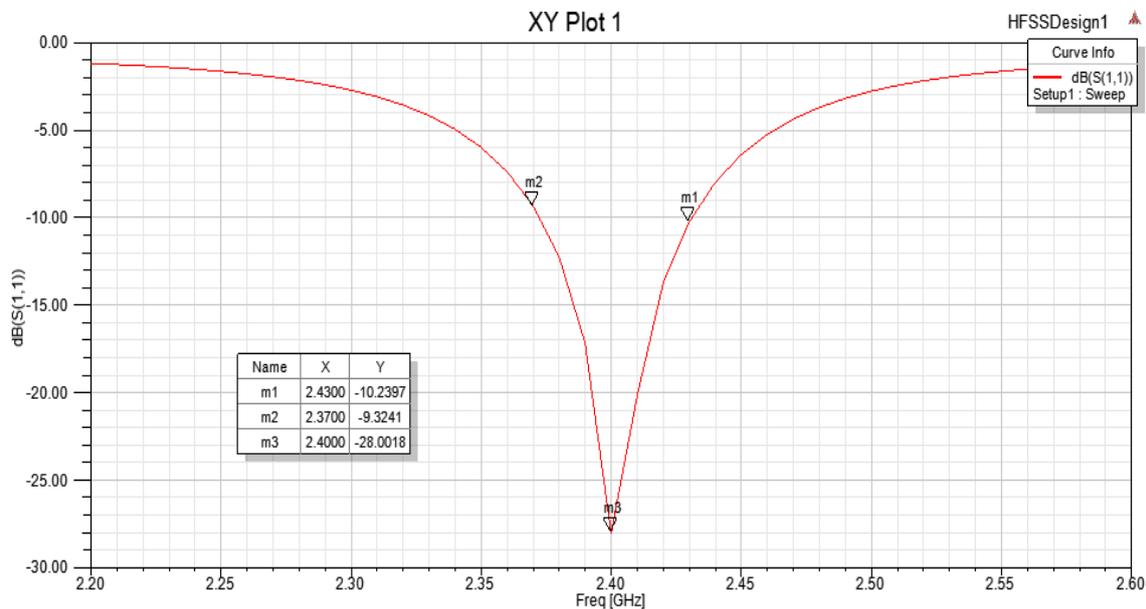


Figure III.13: Coefficient de réflexion en fonction de la fréquence (HFSS)

On remarque qu'on a une bonne adaptation à la fréquence 2.4 GHz, le coefficient de réflexion est inférieur à -28 dB.

La largeur de bande de l'antenne est de 60 MHz autour de la fréquence de résonance 2.4 GHz dans l'intervalle 2.3700 – 2.4300 GHz

#### III.5.2 Rapport d'onde stationnaire (VSWR)

La figure III-7 montre la variation du VSWR en fonction de la fréquence.

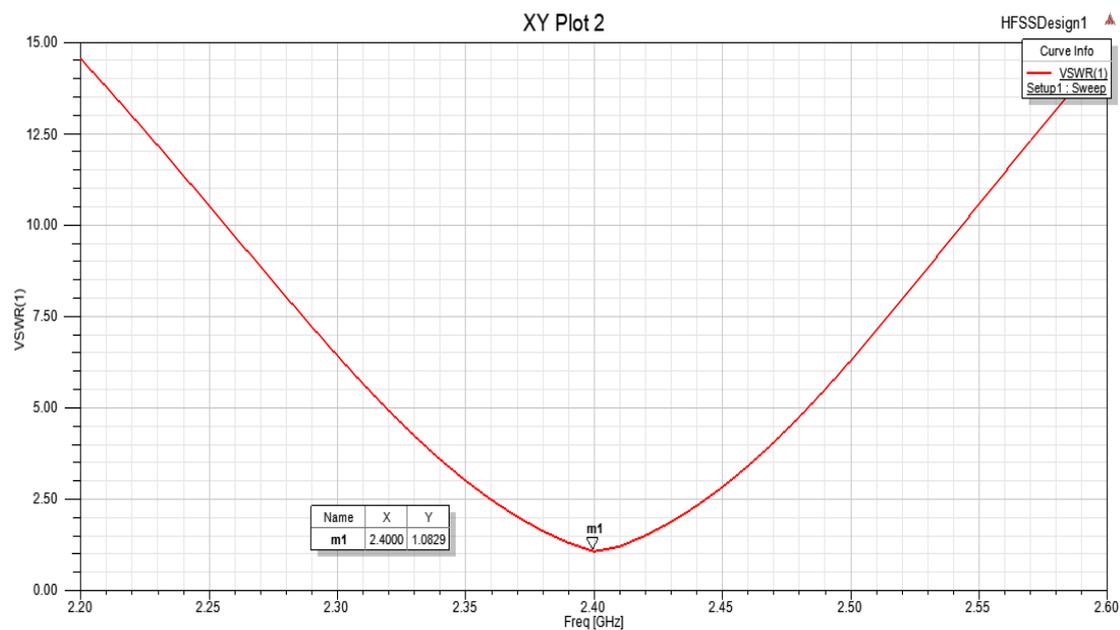


Figure III.14: VSWR en fonction de la fréquence (HFSS)

Le rapport d'ondes stationnaires est inférieur à 2 (1.08) à la fréquence de résonance 2.4 GHz, ce qui confirme que l'antenne est bien adaptée.

### III.5.3 Diagrammes de rayonnement

Les figures III.15 et III.16 montrent le diagramme de rayonnement de l'antenne patch rectangulaire implantable en 3D. Les coupes de ce diagramme dans deux plans verticaux orthogonaux pour  $\phi = 90^\circ$  et  $\phi = 0^\circ$  obtenus sous HFSS à la fréquence 2.4 GHz sont représentées, respectivement, sur les figures III.17 et III.18.

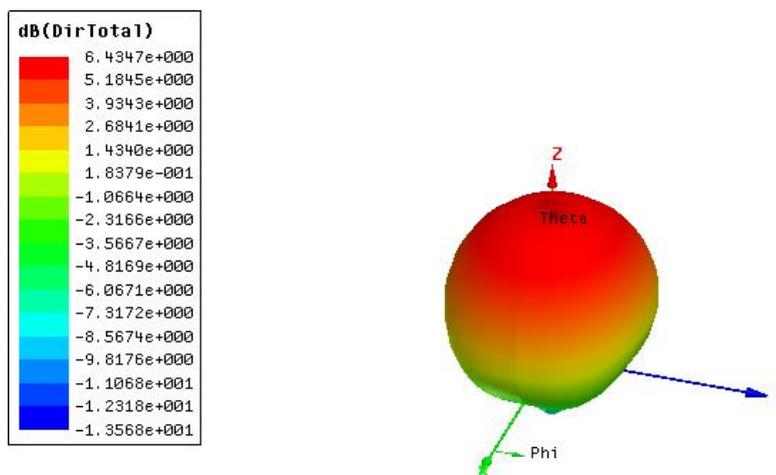


Figure III.15: Diagramme de rayonnement en 3D (directivité) de l'antenne patch (HFSS)

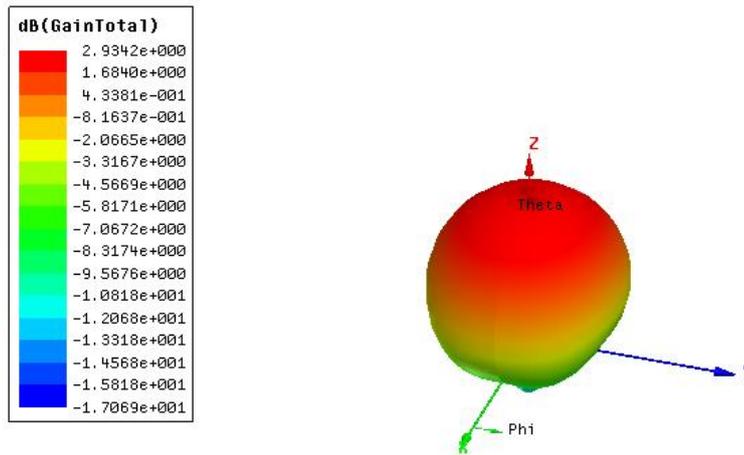


Figure III.16: Diagramme de rayonnement en 3D (Gain réalisé) de l'antenne patch (HFSS)

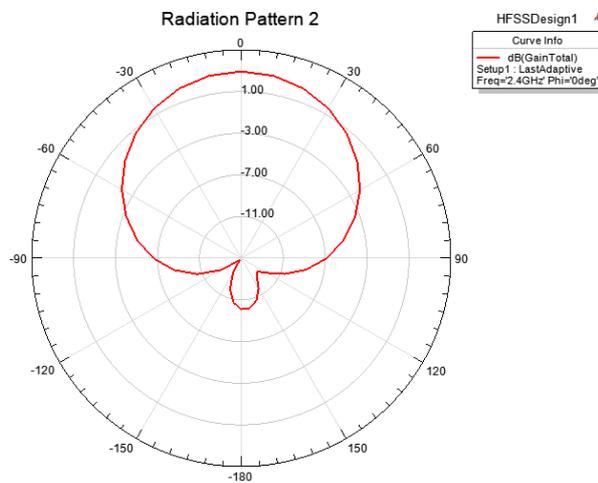


Figure III.17: Diagramme de rayonnement en 2D (phi=0°) de l'antenne patch (HFSS)

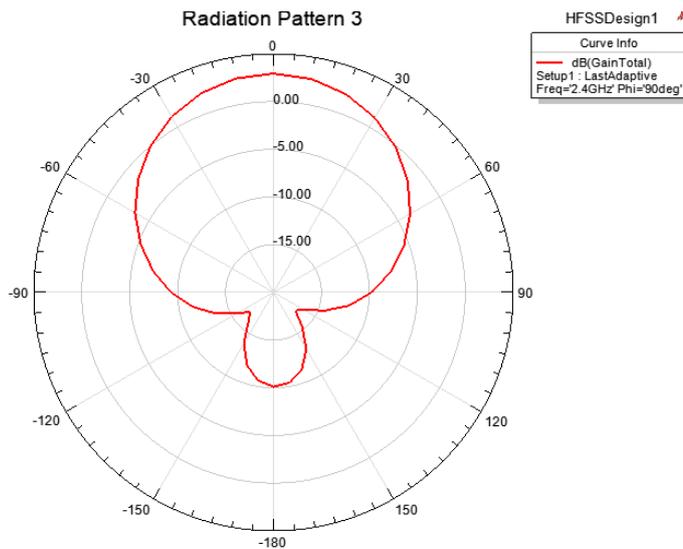


Figure III.18: Diagramme de rayonnement en 2D (phi=90°) de l'antenne patch (HFSS)

Nous constatons que le gain de l'antenne patch de forme rectangulaire est atteint une valeur maximale de  $2.93\text{dB}$  pour une fréquence de résonance de  $2.4\text{ GHz}$ . Ce résultat est acceptable pour assurer le bon fonctionnement de cette antenne.

#### III.5.4 Distribution de courant (courant de surface)

Nous observons que le rayonnement est répandu dans les zones les plus importantes de l'antenne. Cela indique que cela fonctionne parfaitement.

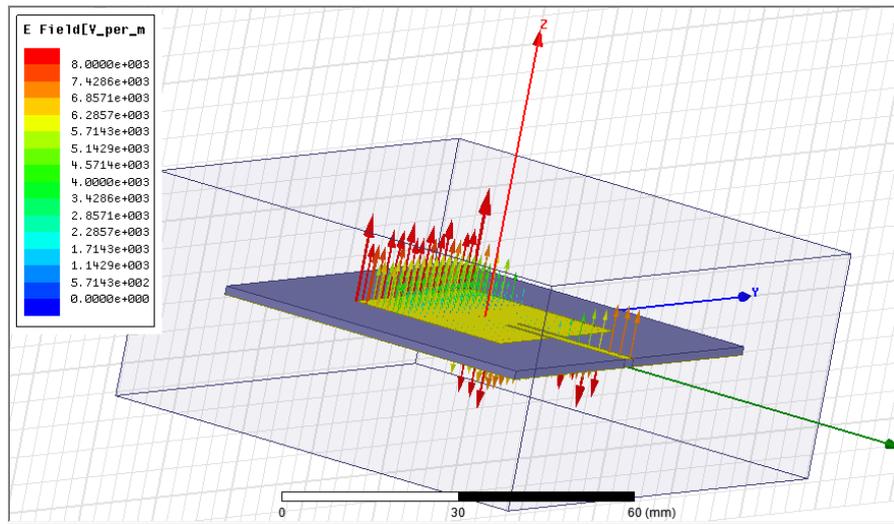


Figure III.19: Courant de surface de l'antenne patch (HFSS)

#### III.5.5 Gain

La figure III.20 montre la valeur du Gain avec un maximum  $2.93\text{ dB}$  pour  $f=2.4\text{ GHz}$ .

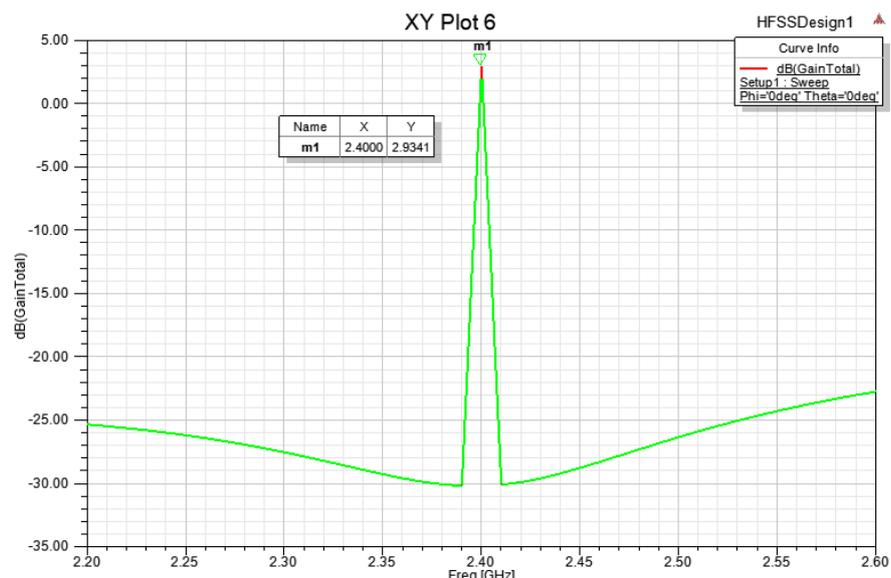


Figure III.20: Le gain de l'antenne patch (HFSS)

III.5.6 Directivité :

La valeur max de directivité est (6.43 dB) dans la bande de fréquence est 2.4GHz.

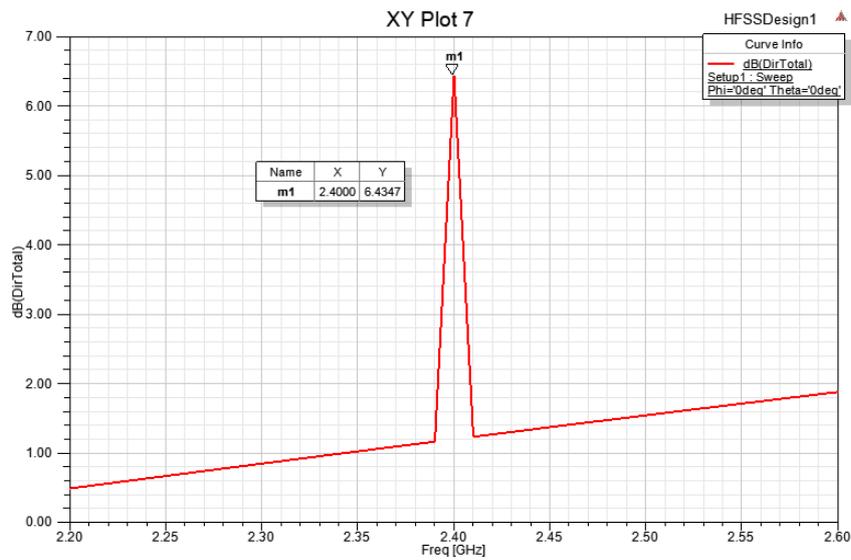


Figure III.21: La directivité de l'antenne patch (HFSS)

Tableau III-4: Résumé des résultats de la simulation de l'antenne patch sous logiciel HFSS

Paramètres	Valeur
Fréquence de résonance (GHz)	Fr = 2.4 GHz
Pertes de retour ( $S_{11}$ )	$S_{11} \text{ min} = -28.0018 \text{ dB}$
Bande passante (BW)	BW= 60 MHz à $S_{11} = -10 \text{ dB}$
Rapport d'onde stationnaire (VSWR)	VSWR = 1.08 < 2
Directivité	D =6.43 dB
Gain	G = 2.93 dB

### III.6 Comparaison et discussion

Les résultats de simulation obtenus par les simulateurs HFSS et CST se concordent pratiquement bien. La légère différence enregistrée en termes de niveaux des coefficients de réflexion, des rapports d'ondes stationnaires et de fréquences de résonance est due au pas de simulation et au maillage utilisé pour chaque simulateur pendant la simulation.

L'accord entre ces résultats est évalué quantitativement par la moyenne de l'erreur relative de fréquence de résonance comme indiqué sur le tableau III.5.

La mesure du critère de précision (erreur) est définie comme la différence de la fréquence de résonance relative à chaque simulateur et la fréquence de référence appropriée. Elle est déterminée par la formule suivante [37] :

$$\frac{\Delta f_r}{f_r} (\%) = 100. \left[ \frac{|f_r - f_{\text{simulation}}|}{f_r} \right] \quad \text{III-1}$$

Où,  $f_r$  est la fréquence de résonance du mode fondamental de notre travail qui est égale à 2.4 GHz

Tableau III-5: comparaison entre les résultats des deux simulations (CST et HFSS)

Paramètres	Valeur donnée par CST	Valeur donnée par HFSS
<b>Fréquence de résonance (GHz)</b>	$f_r = 2.3776 \text{ GHz}$	$f_r = 2.4 \text{ GHz}$
<b>Pertes de retour (<math>S_{11}</math>)</b>	$S_{11} \text{ min} = -25.34 \text{ dB}$	$S_{11} \text{ min} = -28.0018 \text{ dB}$
<b>Bande passante (BW) à <math>S_{11} = -10 \text{ dB}</math></b>	BW= 66 MHz	BW= 60 MHz
<b>Rapport d'onde stationnaire (VSWR)</b>	< 2	< 2
<b>Directivité</b>	D =6.914 dB	D =6.43 dB
<b>Gain</b>	G = 2.68 dB	G = 2.93 dB
<b>Critère de précision <math>\frac{\Delta f_r}{f_r} (\%)</math></b>	0.9%	0%
<b>Le temps de simulation</b>	3 minutes	9 minutes

### Chapitre III Modélisation et simulation d'une antenne patch sous CST et HFSS

Dans le cadre des comparaisons entre les deux simulateurs, CST et HFSS, les deux outils peuvent être utilisés efficacement, mais il y a des points spécifiques à considérer :

HFSS est souvent préféré pour des simulations nécessitant une précision très élevée et où les détails fins de la structure sont critiques, comme les antennes avec des géométries complexes.

CST Studio pourrait être plus avantageux si la rapidité de simulation et la facilité d'utilisation sont prioritaires. CST est également excellent pour des itérations rapides et pour des études où les temps de simulation sont critiques.

Le choix du meilleur outil :

**Précision** : HFSS est plus précis, avec un critère de précision (erreur)  $\frac{\Delta_{fr}}{fr} (\%) = 0\%$ .

**Rapidité et flexibilité** : CST Studio est le plus rapide et le plus flexible. Tell que, le temps de simulation par CST est de 3 minutes, tandis que le temps de simulation par HFSS est de 9 minutes.

**Facilité d'utilisation** : CST Studio est généralement le plus intuitif.

Pour la simulation d'une antenne patch rectangulaire, la précision est la priorité, alors le simulateur HFSS (High Frequency Structure Simulator) est le plus adapté.

#### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé et simulé une antenne patch rectangulaire à performances améliorées. Dans un premier temps, la simulation a été effectuée à l'aide du logiciel CST, puis avec HFSS. L'objectif principal était d'étudier les propriétés de l'antenne patch. Les caractéristiques les plus importantes de l'antenne conçue, telles que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain et le rapport d'onde stationnaire (ROS) ont été présentées. Les résultats de simulation obtenus par les deux logiciels, montrent que l'antenne conçue présente de bonnes performances.

Une méthode largement utilisée pour valider les résultats de simulations consiste à comparer les résultats obtenus en utilisant différents logiciels qui appliquent des méthodes d'analyse des structures d'antennes distinctes. HFSS repose sur la méthode des éléments finis (FEM), tandis que CST est basé sur la technique d'intégration des éléments finis (FIT). Les deux logiciels, HFSS (High Frequency Structure Simulator) et CST (Computer Simulation Technology), produisent des résultats pratiquement identiques lors de la simulation, ce qui confirme la validité des résultats obtenus dans ce mémoire.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

L'objectif de cette étude était de modéliser et de concevoir une antenne patch rectangulaire pour des applications Wi-Fi, en utilisant les simulateurs HFSS (High Frequency Structure Simulator) et CST (Computer Simulation Technology). Nous avons effectué des simulations pour une antenne patch rectangulaire alimentée par une ligne micro-ruban avec des encoches d'adaptation, centrée autour d'une fréquence de résonance de 2,4 GHz. Cette recherche a mis en lumière l'efficacité des deux simulateurs en termes de précision, de rapidité, et de facilité d'utilisation.

Les résultats obtenus montrent une concordance notable entre les simulations réalisées par HFSS et CST, malgré quelques variations mineures en termes de niveaux des coefficients de réflexion, des rapports d'ondes stationnaires, et des fréquences de résonance. Ces différences sont principalement attribuables au pas de simulation et au maillage propre à chaque simulateur.

Le temps de simulation s'est révélé être un facteur significatif dans la comparaison entre les deux simulateurs : CST a complété la simulation en 3 minutes, alors que HFSS a pris 9 minutes. Cette différence démontre l'avantage de CST en termes de rapidité, ce qui peut être crucial dans des contextes nécessitant des itérations rapides.

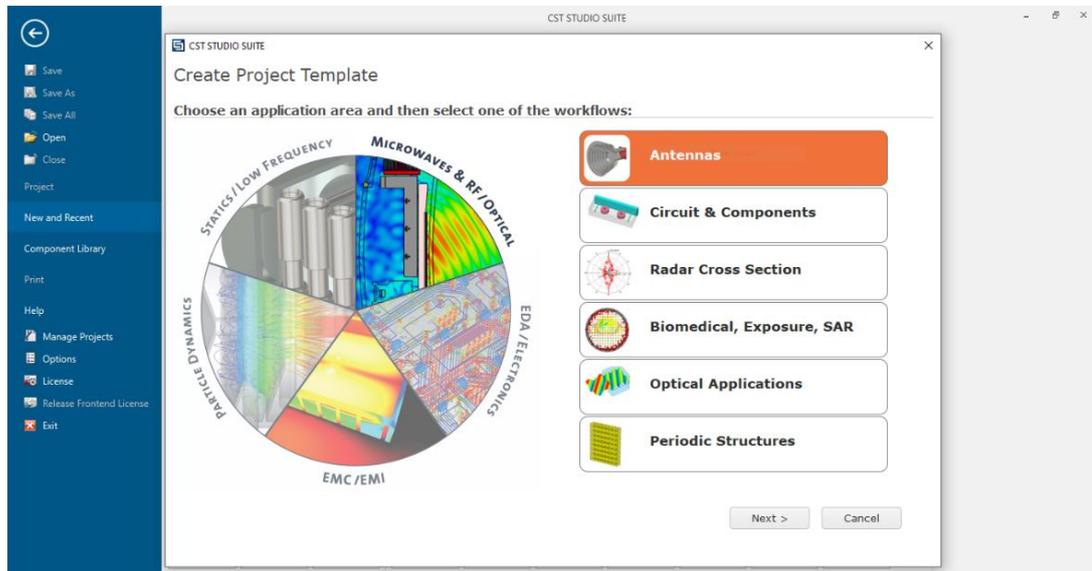
En conclusion, le choix du simulateur dépend de l'équilibre entre précision et rapidité requis pour une application spécifique. HFSS est recommandé pour des études nécessitant une précision très élevée et une attention aux détails fins, ce qui est souvent critique dans la conception d'antennes avec des géométries complexes. En revanche, CST est avantageux pour sa rapidité et sa flexibilité, rendant ce simulateur plus adapté pour des scénarios où le temps de simulation et l'intuitivité de l'outil sont prioritaires. Pour la simulation de l'antenne patch rectangulaire étudiée dans cette recherche, HFSS se distingue comme l'outil le plus précis, ce qui en fait le simulateur de choix pour les besoins de conception où la précision est primordiale.

Cette étude contribue à une meilleure compréhension des capacités et des limites des simulateurs HFSS et CST, fournissant ainsi des indications pratiques pour les ingénieurs et les chercheurs dans la sélection des outils de simulation appropriés pour la conception d'antennes.

## Annexe

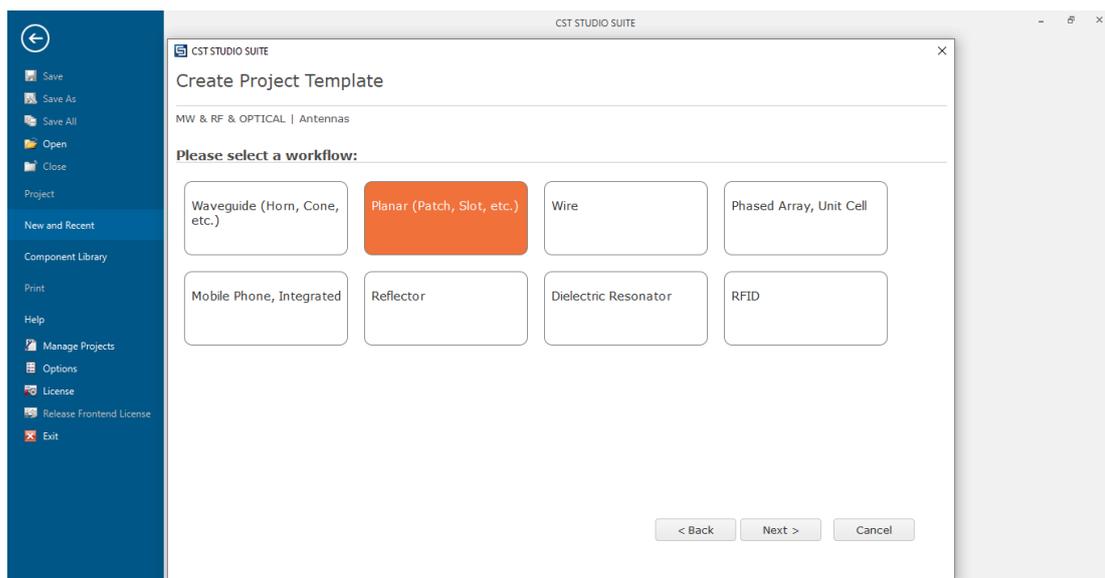
### A) Les étapes à suivre pour la modélisation et la simulation sous CST MWS

#### 1. Lancement de la fenêtre principale de CST Studio et sélection du domaine d'application



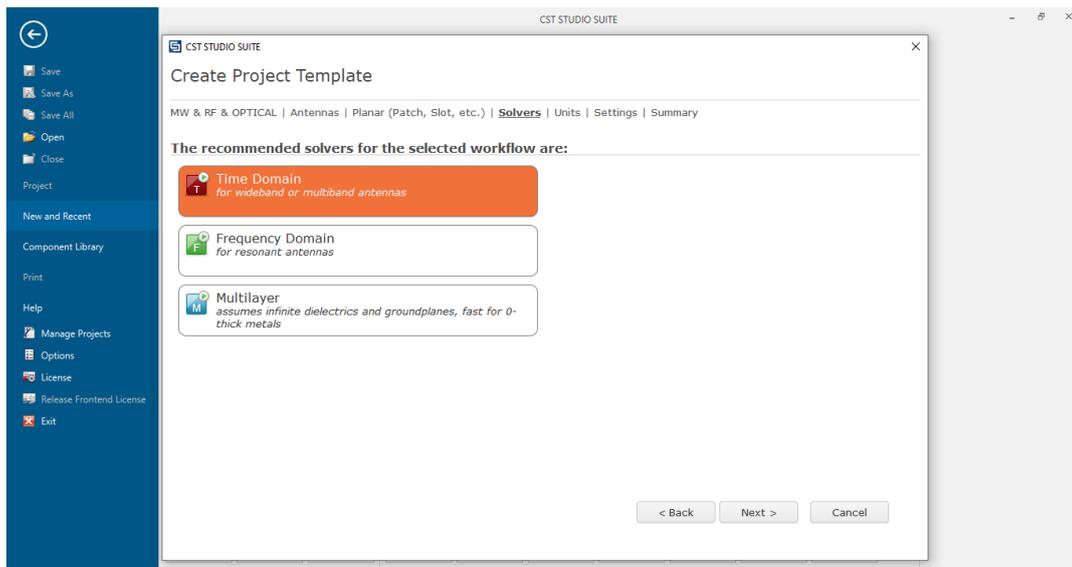
La fenêtre ci-dessus nécessite la sélection d'une zone d'application et la spécification du type de travail à effectuer, en sélectionnant dans ce cas le champ MW & RF & Optical, en particulier Antennes.

#### 2. Choix du type d'antenne à mettre en œuvre dans CST



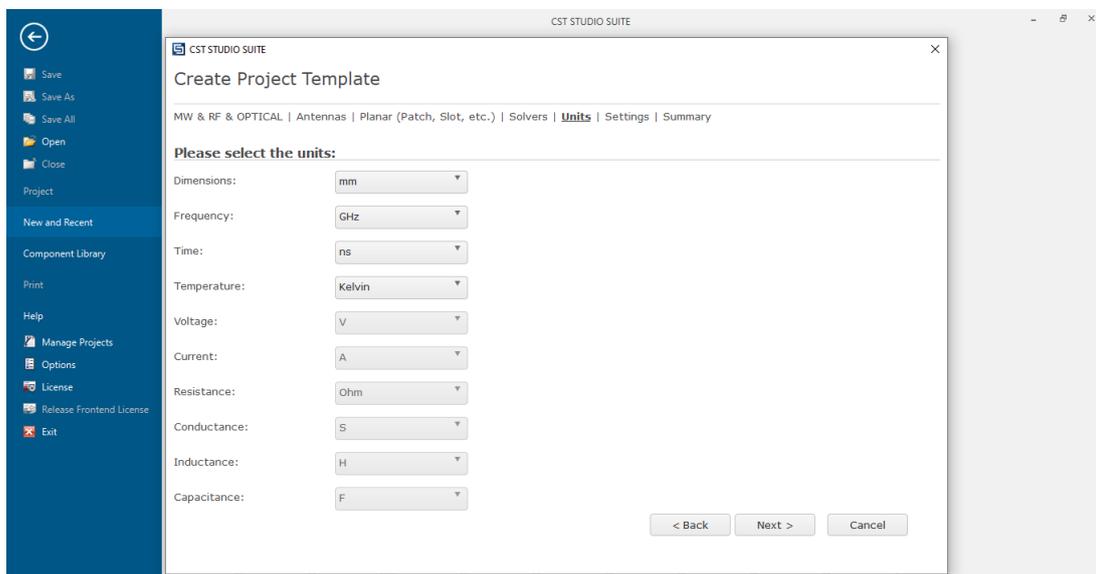
## Annexe

### 3. Sélection du type de simulation à utiliser dans CST

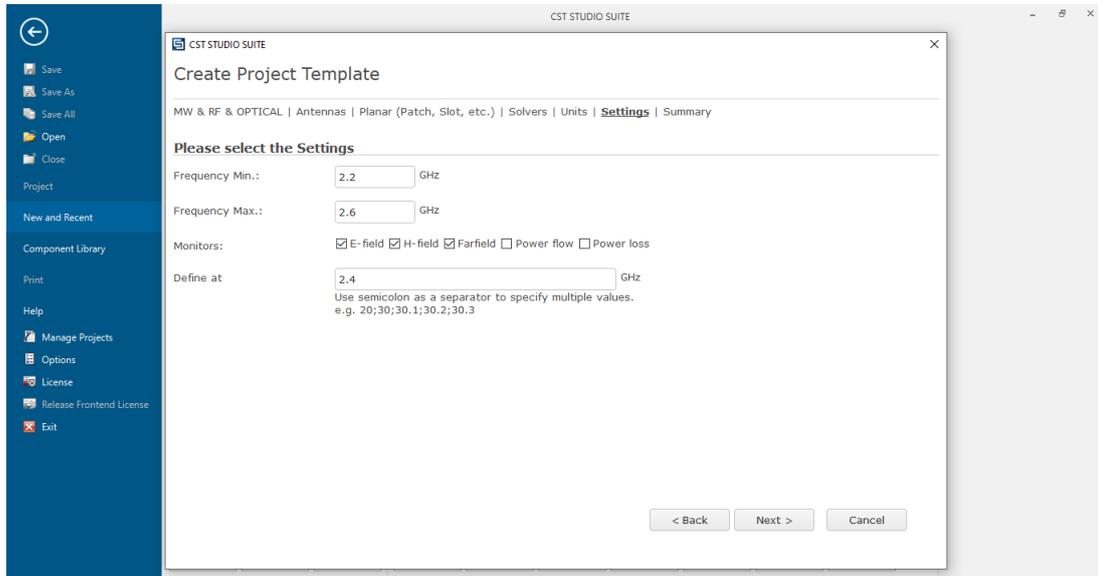


Le mode temporel Domain a été choisi. Dans le domaine temporel, le solveur transitoire peut résoudre la plupart des problèmes des champs électromagnétiques et faire d'analyse d'une antenne avec une bonne précision.

### 4. Sélection des unités de mesure à utiliser dans CST

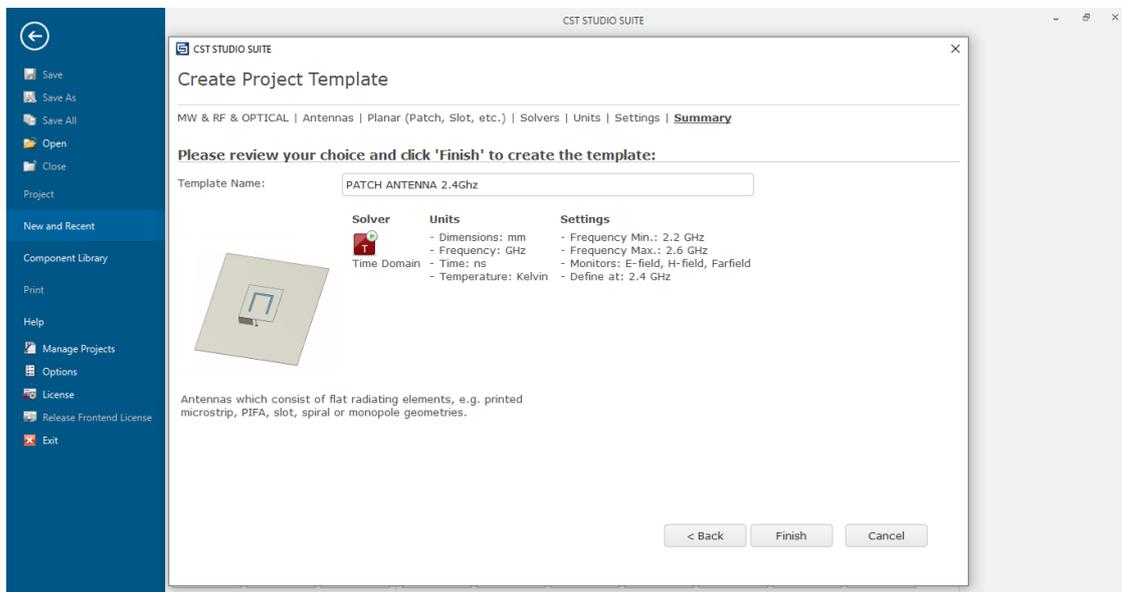


## 5. Configuration de la gamme de fréquences et des moniteurs à analyser



Dans cette étape, nous définissons les fréquences d'intérêt et ce qui doit être surveillé, dans ce cas les fréquences entre 2.2 et 2.6 GHz, avec 2.4 GHz étant la fréquence centrale, et nous choisissons de surveiller les champs E et H, ainsi que le diagramme de rayonnement de l'antenne.

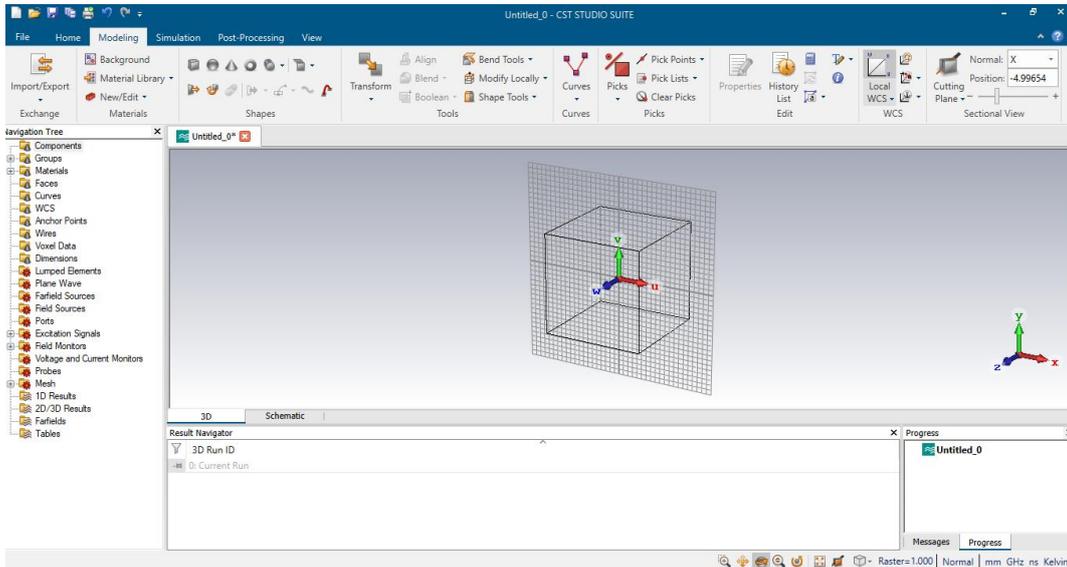
## 6. Nom et résumé des configurations de modèles créés dans CST



Enfin, un résumé du projet à réaliser est affiché et le modèle est nommé Patch Antenne

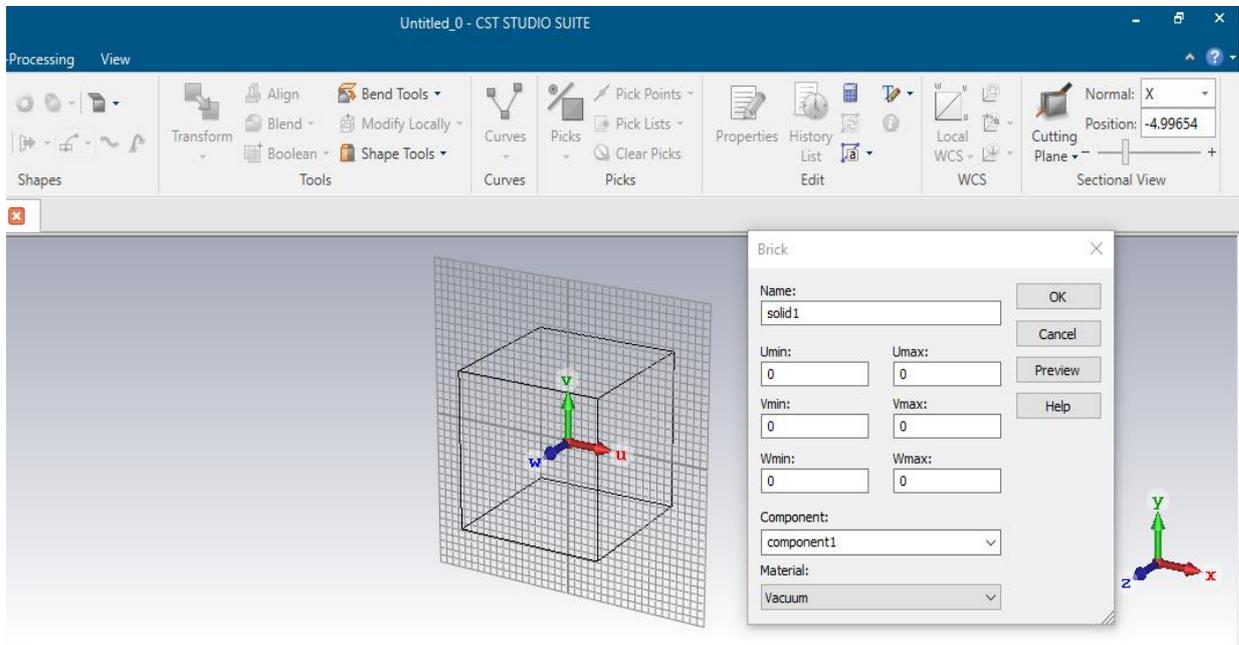
## Annexe

### 7. Espace de travail CST Microwave Studio

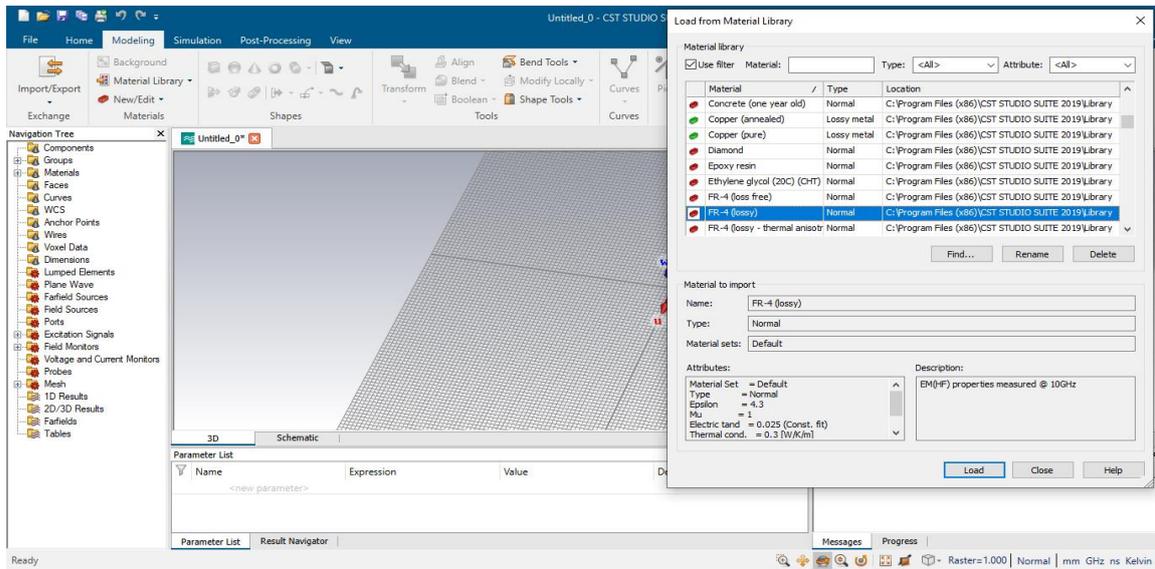
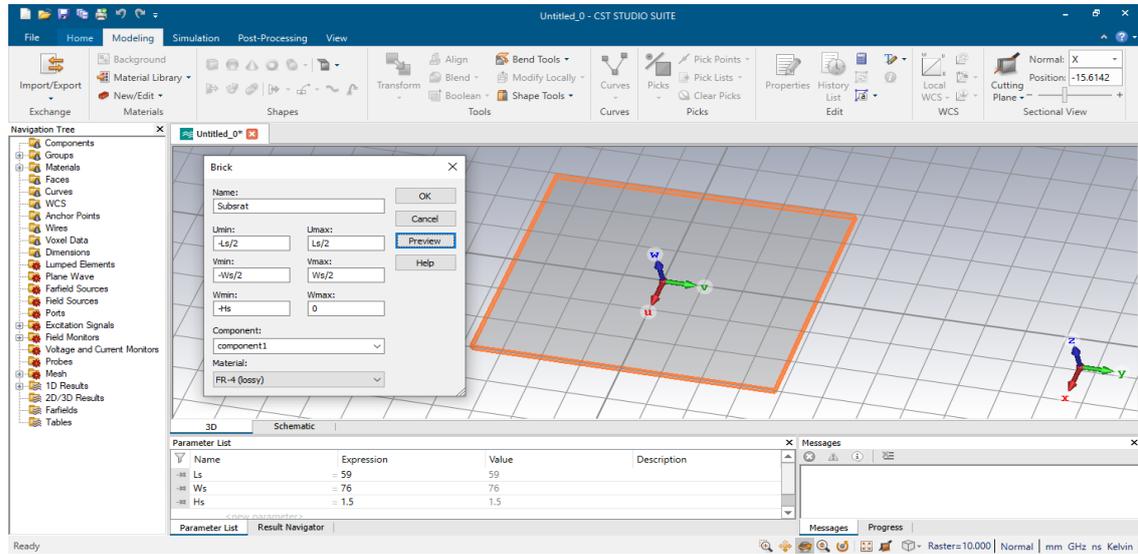


Dans cette phase, un modèle de projet est créé dans CST Microwave Studio, apparaissant dans une fenêtre qui constitue l'espace de travail dans lequel la modélisation de l'antenne patch doit être effectuée.

### 8. Fenêtre pour la modélisation des structures dans CST Microwave Studio

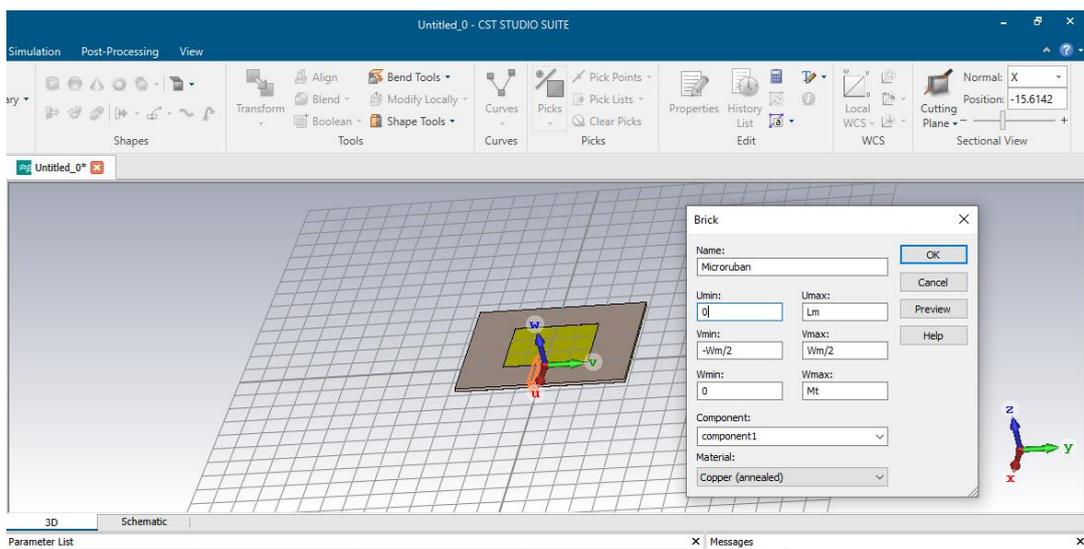
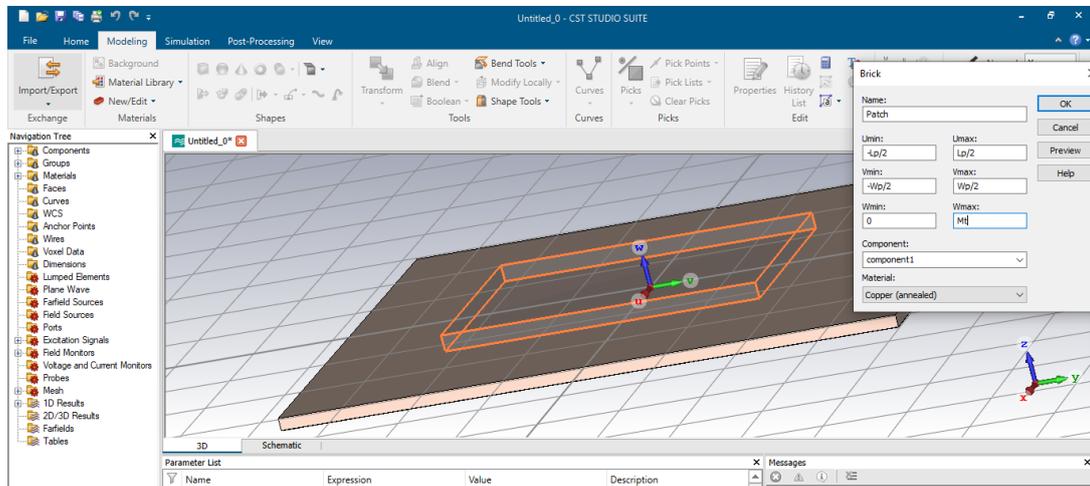
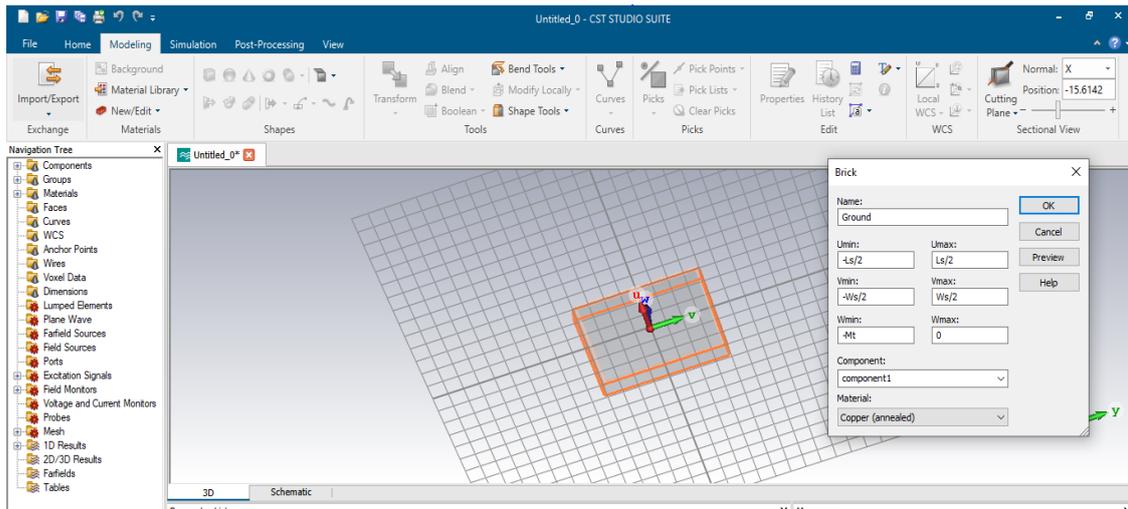


### 9. Modélisation du substrat d'antenne patch

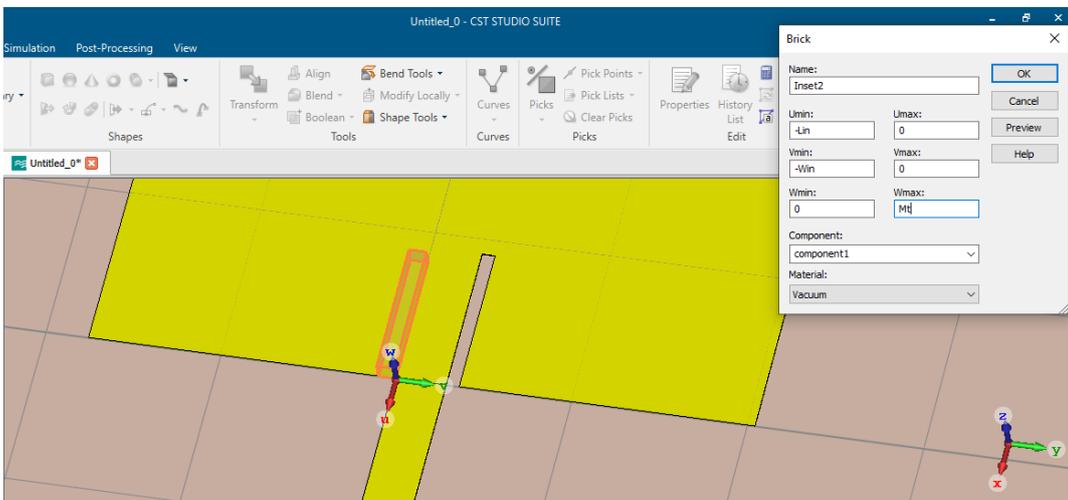
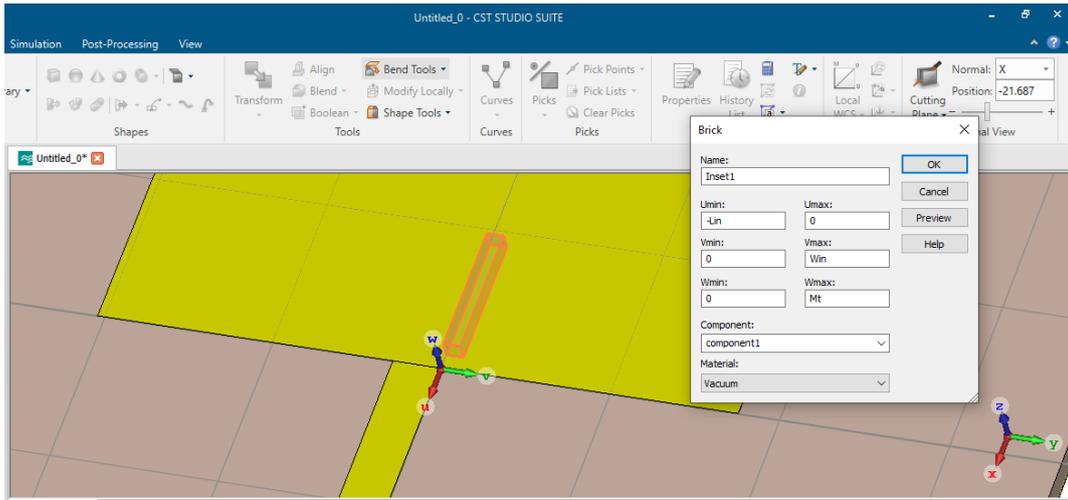


### 10. Modélisation du plan de masse de l'antenne patch

## Annexe

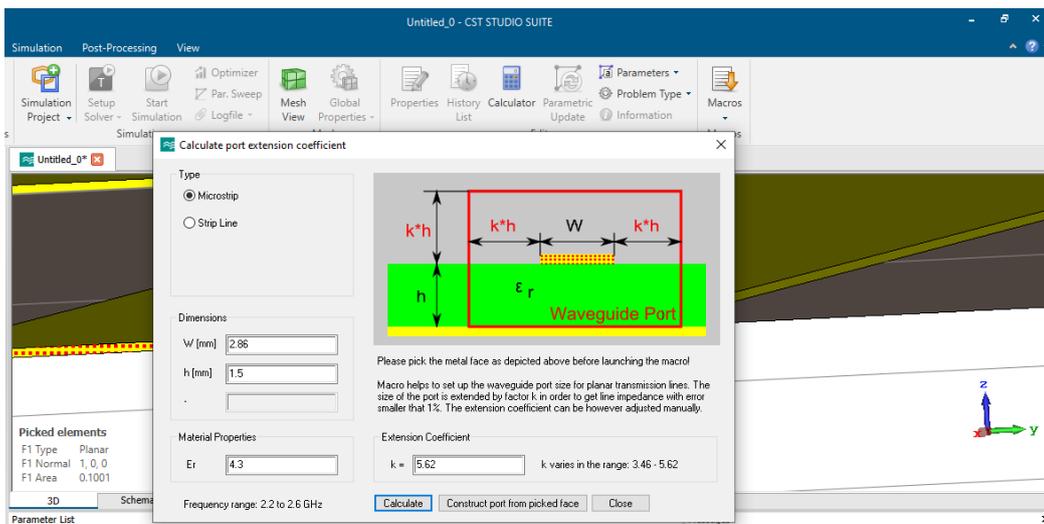


# Annexe

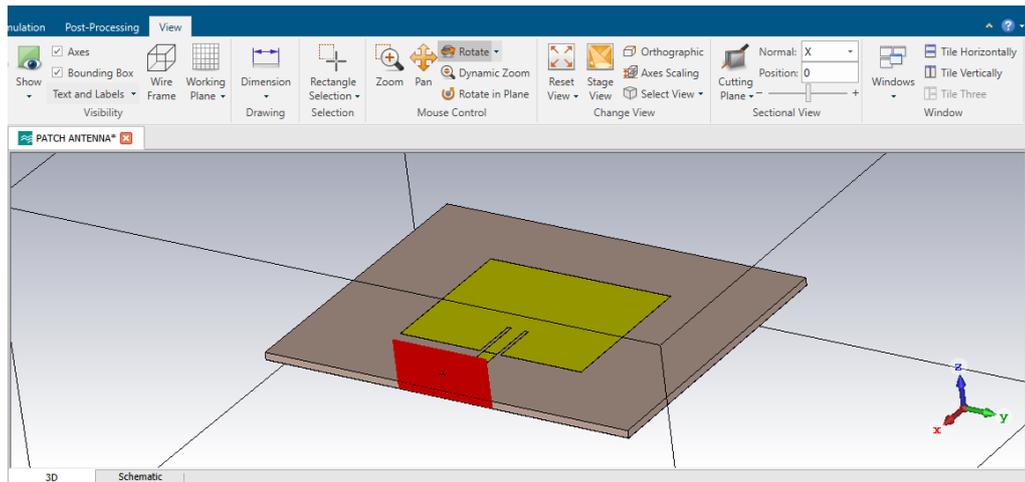


## 14. Alimentation de l'antenne via l'onde de port de guidage

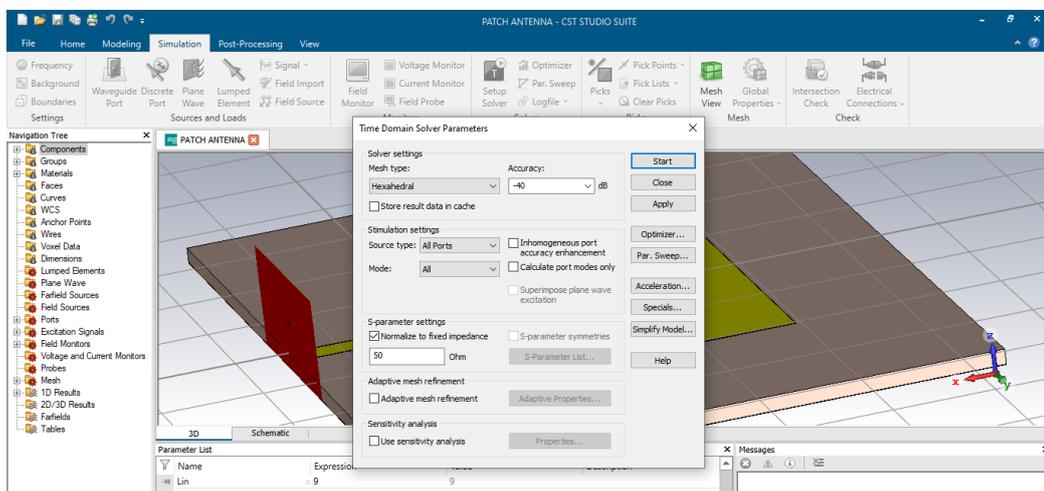
Nous cliquons sur modeling –picks–pick face sur la fin de la ligne. Ensuite, nous cliquons sur –macros–solver–ports–calculate port extension coefficient



## Annexe

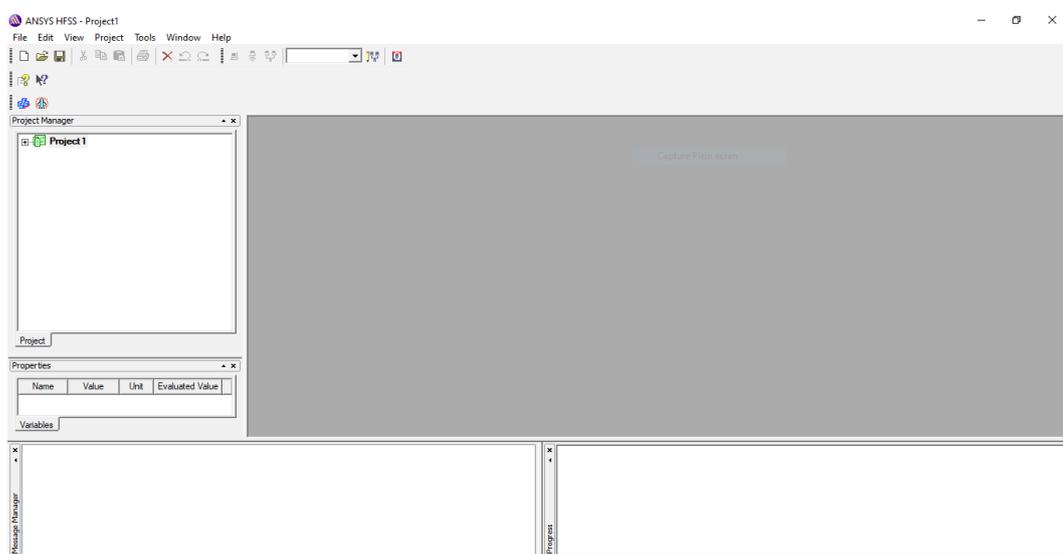


### 15. Sélection de l'outil Setup Solver pour la simulation et progrès de la simulation dans CST Microwave Studio



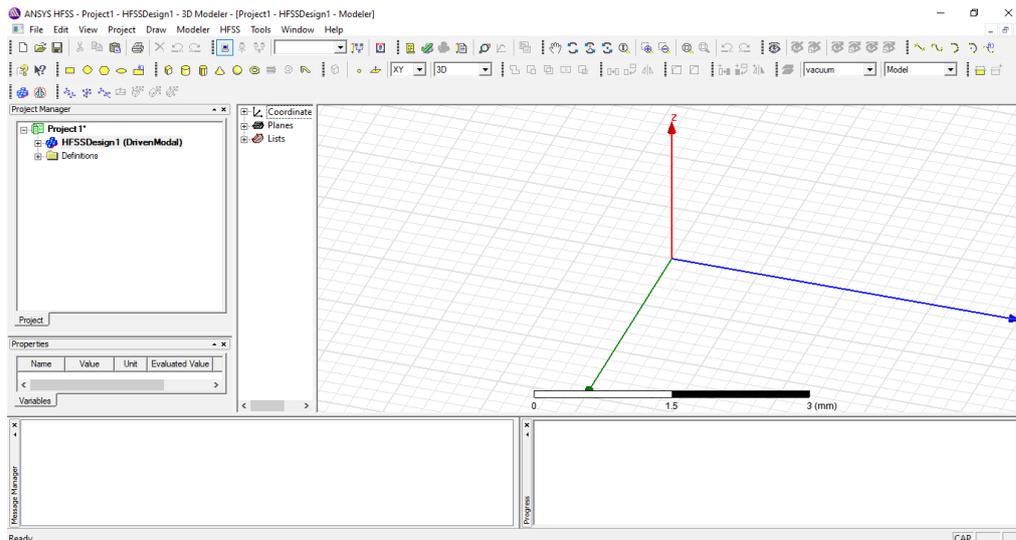
### B) Les étapes à suivre pour la modélisation et la simulation sous HFSS

#### 1. Lancement de la fenêtre principale de L'ANSYS HFSS

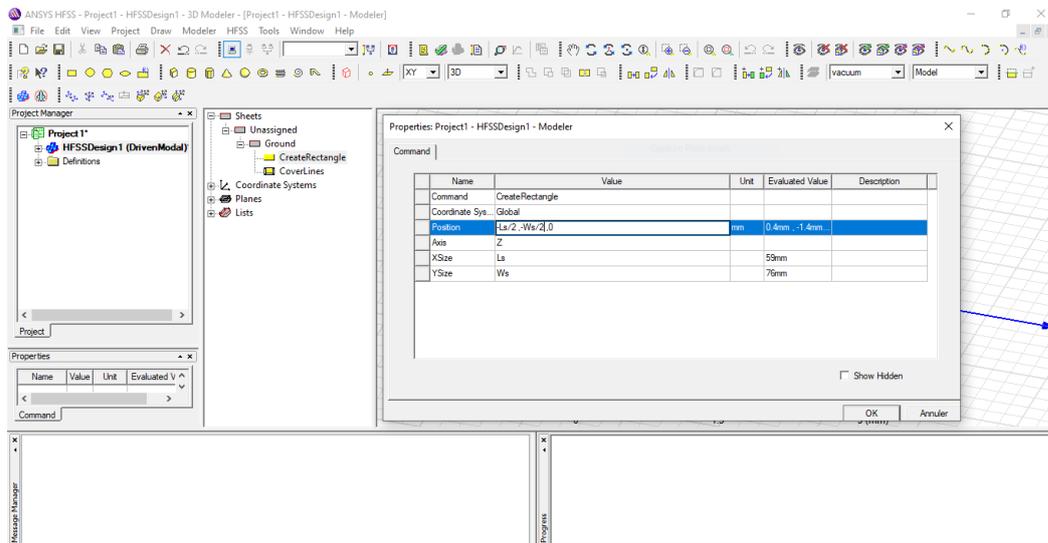


# Annexe

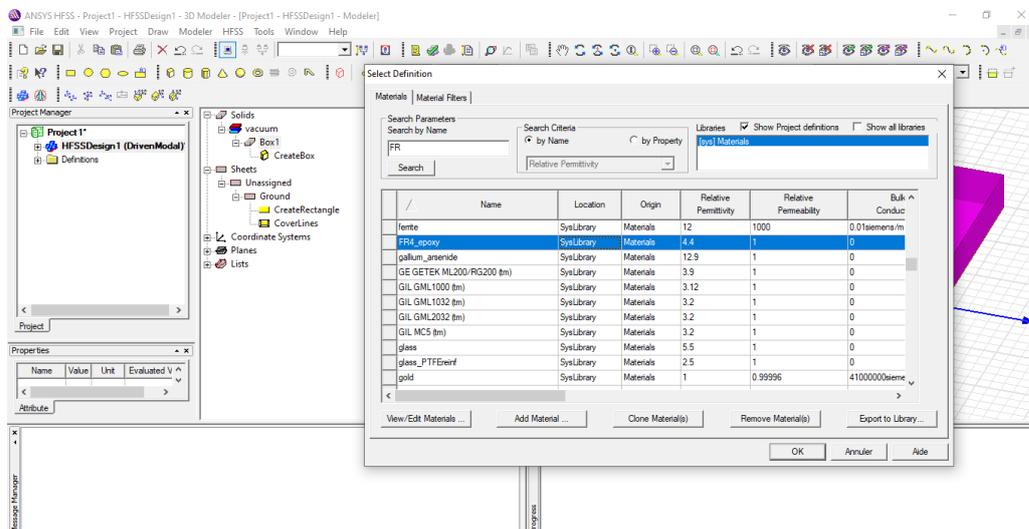
## 2. Ouvrir un nouveau Project sous HFSS



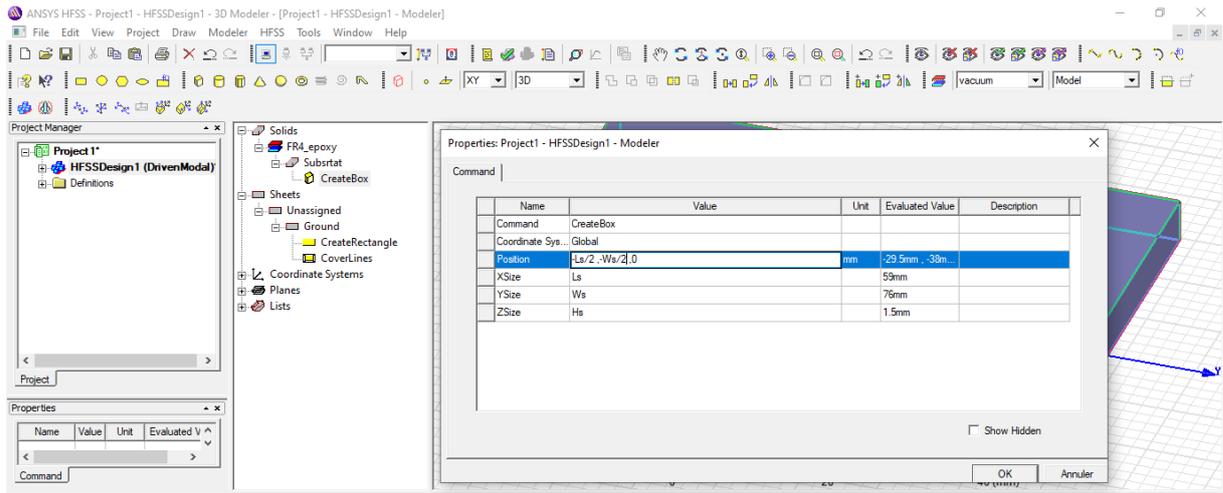
## 3. Modélisation du plan de masse de l'antenne patch :



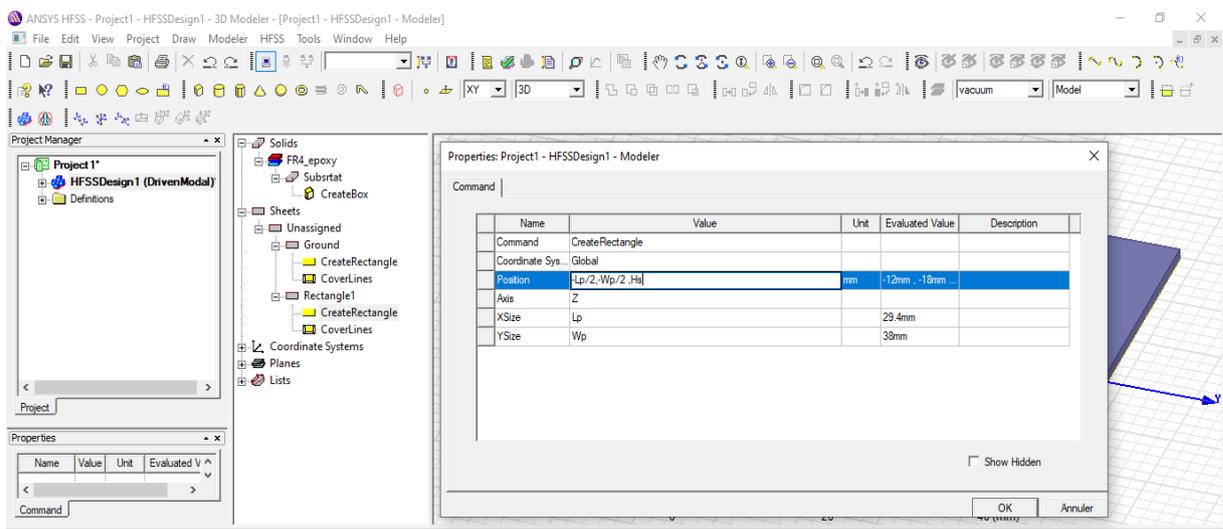
## 4. Modélisation du substrat d'antenne patch



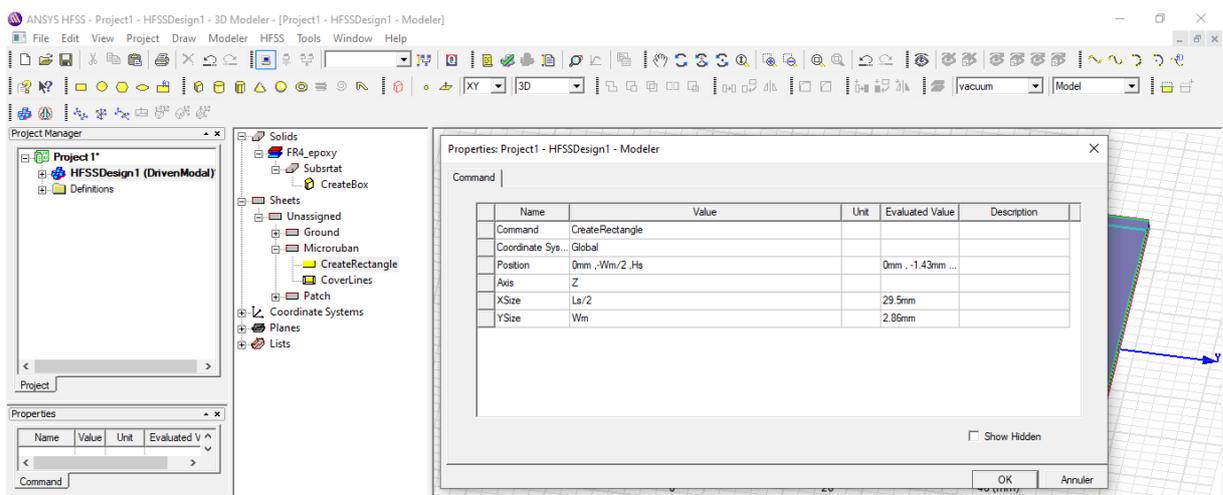
# Annexe



## 5. Modélisation de l'antenne patch

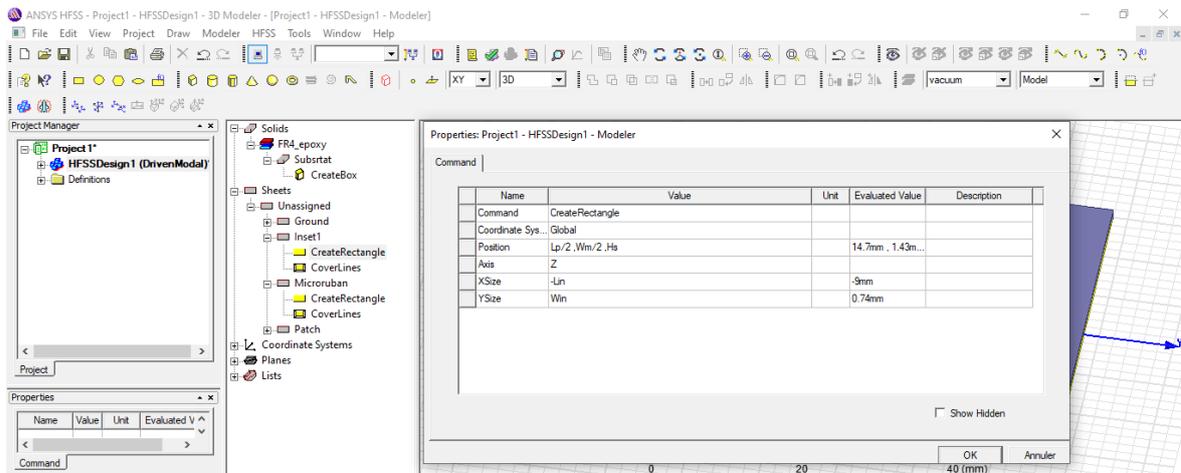


## 6. Modélisation de la ligne micro ruban

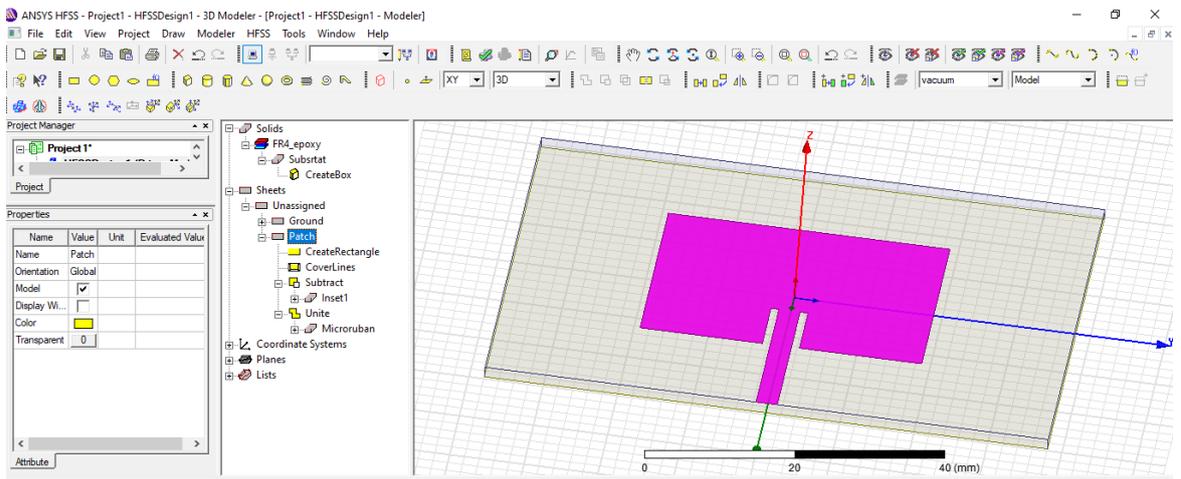


# Annexe

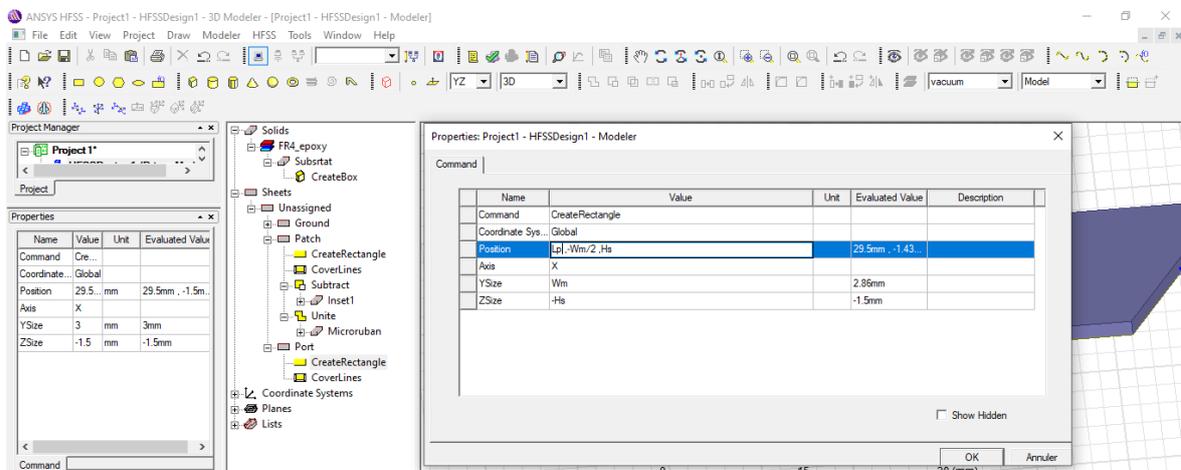
## 7. Modélisation des encoches aux bords de l'élément rayonnant



## 8. Nous avons fusionné le patch et la ligne micro ruban en utilisant l'outil booléenne 'unite'

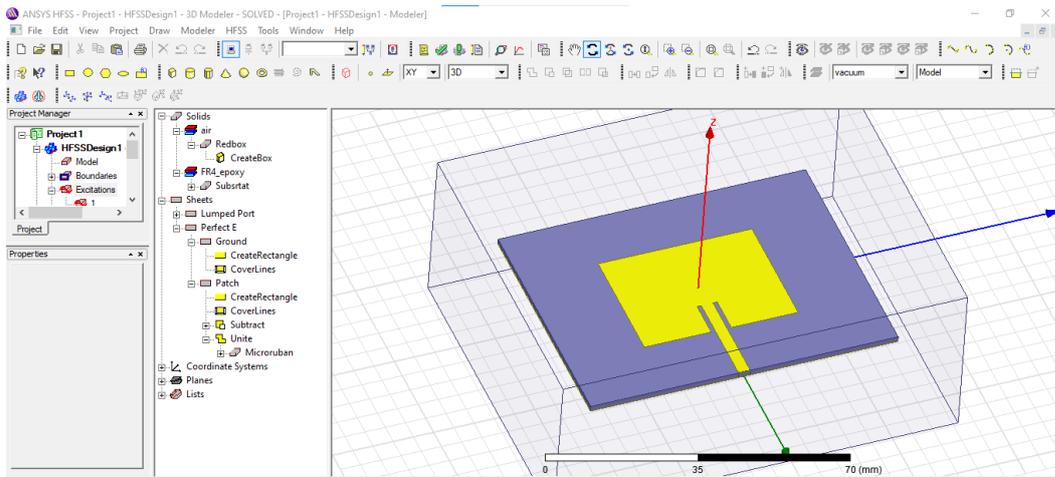


## 9. Alimentation de l'antenne via l'onde de port de guidage

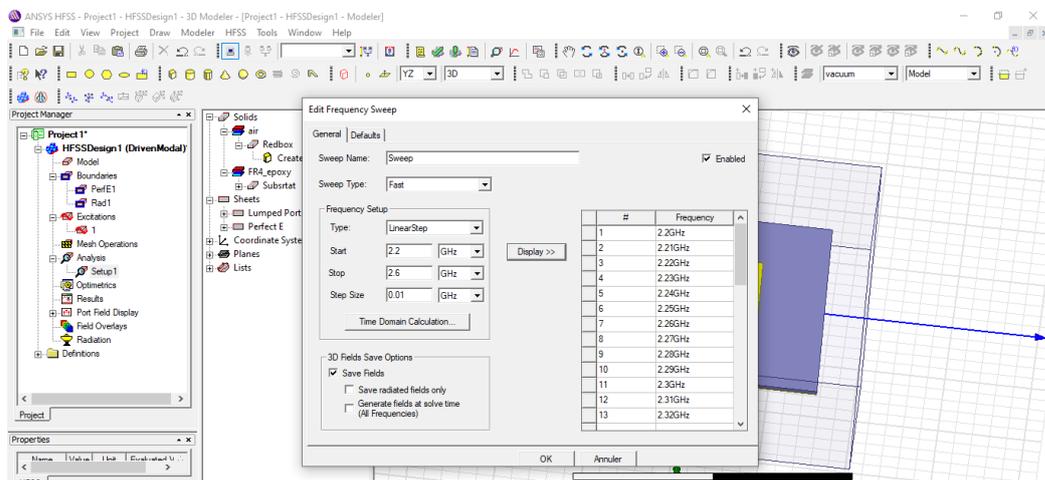


## Annexe

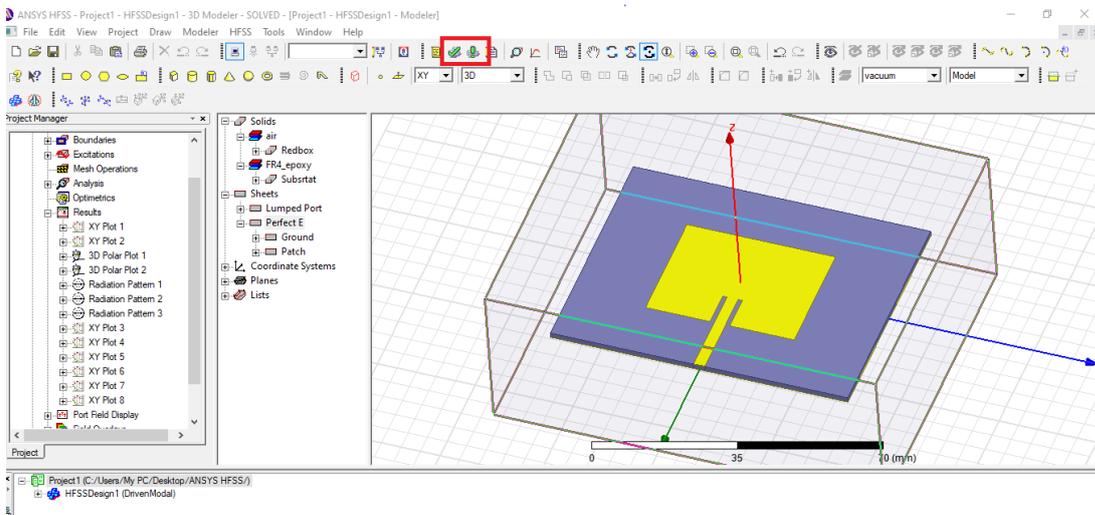
### 10. Affecter la condition 'conducteur électrique parfait (PEC) perfect E' aux trois plaques



### 11. Configuration de la gamme de fréquences



### 12. Sélection de l'outil 'validate' après 'Analyse all' et progrès de la simulation dans ANSYS HFSS 15.0



# Références

## Références

- [1] KHOUALED KHAWLA, DOUKHI IBTISSEM. Simulation et fabrication d'une nouvelle antenne pour la détection des tumeurs cancéreuses. 2023.
- [2] J. Galy, Antenne adaptative : Du second ordre aux ordres supérieurs. Applications aux signaux de télécommunications, Doctoral dissertation, Toulouse 3, 1998.
- [3] BALANIS, Constantine A. Antenna theory: A review. Proceedings of the IEEE, 1992, vol. 80, no 1, p. 7-23.
- [4] BLEWETT, J., BLEWETT, I. J., et WOODWARD, P. K. Measurement of shear-wave velocity using phase-sensitive detection techniques. Canadian Geotechnical Journal, 1999, vol. 36, no 5, p. 934-939.
- [5] CHEN, Fang, HUANG, Hongwei, GUO, Lin et al. Le rôle de la polarisation dans la photocatalyse. Angewandte Chemie International Edition, 2019, vol. 58, n° 30, p. 10061-10073.
- [6] BRÉHAT, François et WYNCKE, Bruneau. Représentation des états de polarisation des ondes lumineuses. Editions Publibook, 2003.
- [7] POZAR, David M. A modern course in microwave engineering. IEEE transactions on education, 1990, vol. 33, no 1, p. 129-134.
- [8] COLIN DE VERDIÈRE, Yves. Les équations de Maxwell. Séminaire de théorie spectrale et géométrie, 1996, vol. 15, p. 115-125.
- [9] Maxicours.com, 2023. \*Rôle des antennes émettrices et réceptrices\*. [En ligne] Disponible à l'adresse : <https://www.maxicours.com/se/cours/role-des-antennes-emettrices-et-receptrices/> [Accédé le 1 Juin 2024].
- [10] SOLTANE, Samia. ETUDE ET CARACTERISATION D'ANTENNES IMPRIMEES POUR SYSTEME ULTRA-LARGE BANDE. 2015. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [11] Université de Chlef. Cours sur les antennes [en ligne]. Chlef : Université de Chlef, s.d. [consulté le 2 juin 2024]. Disponible à l'adresse : [https://www.univ-chlef.dz/ft/wp-content/uploads/2020/04/Plyco\\_cours\\_Antennes.pdf](https://www.univ-chlef.dz/ft/wp-content/uploads/2020/04/Plyco_cours_Antennes.pdf).
- [12] Electricity and Magnetism. Formule de l'aire efficace d'une antenne : Définition et usage [en ligne]. s.l. : Electricity and Magnetism, s.d. [consulté le 2 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.electricity-magnetism.org/fr/formule-aire-efficace-antenne-definition-usage/>.
- [13] Techniques de l'Ingénieur. Température équivalente de bruit - Radar Tutoriel - Bruit [en ligne]. s.l. : Techniques de l'Ingénieur, s.d. [consulté le 12 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/telecommunications-th9/radars-42162210/temperature-equivalente-de-bruit-radar-tutoriel-bruit/>.

## Références

- [14] PICON, Odile, CIRIO, Laurent, RIPOLL, Christian, et al. Les antennes: Théorie, conception et applications. Dunod, 2009.
- [15] KOZAKOFF, D. J. Aperture Antennas. Dans : WEBSTER, J. G. (Ed.). Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1002/047134608X.W1284>.
- [16] KANSO, A., CHANTALAT, R., THEVENOT, M., ARNAUD, E., et MONEDIERE, T. Offset Parabolic Reflector Antenna Fed by EBG Dual-Band Focal Feed for Space Application. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2010, vol. 9, pp. 854-858. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2010.2070055>.
- [17] GARCÍA-CAÑETE, Antonio, et Javier C. MARTÍNEZ. Fast analysis of a compound large reflector antenna. Semantic Scholar. 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.semanticscholar.org/paper/Fast-analysis-of-a-compound-large-reflector-antenna/>.
- [18] TOUATI, Mohamed\_Housssem\_Eddine. Conception et Simulation d'une antenne micro-ruban circulaire. 2014.
- [19] HASSAD, Mourad. Modélisation d'une antenne patch réalisée sur un substrat a tenseurs de permittivité et de perméabilité diagonaux. 2009. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [20] Adane, A. Cours d'antennes patch. Juillet 2020, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger.
- [21] Pr. AMHARACHE -Rapport Antenne patch -Ecole Nationale des Sciences Appliquée- année 2014/2015
- [22] Melihi, S et Fengal Tine-hinane. Antenne de Téléphonie mobile, caractérisation et optimisation. Thèse de master, Université ABDERRAHMANE MIRA-Bejaia, 2016.
- [23] Ras laine, A., et H. Saadi. Etude, simulation et mise en réseaux d'une antenne imprimée de forme U. Thèse de master, Université Saad Dahleb de Blida, 2008-2009.
- [24] <https://fr.scribd.com/document/713263198/TP-conception-des-antennes-sous-CST-STUDIO-SUITE-2017-2022>
- [25] K. BELAID et T. BOUMEDDANE « Etude des antennes planaires avec le modèle de la cavité et le modèle de la ligne de transmission » MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU en2012/2013
- [26]<https://www.researchgate.net/profile/MiraouiAbdelfettah/publication/figure/fig8/AS:75608045-Differentes-for mes-dantennes-patch.ppm> [consulté le 12 juin 2024]
- [27] W. Deghfel et R. Merzougui « Etude et conception d'une antenne patch ultra large bande ULB à bande rejetée » Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA thèse de master 'en 2016 /2017'
- [28] M. Ait Tamlihat, H. Belmahi, Y. El Kaissi et S. Ibriz « Antennes patch » Antenne et Microondes Master Matière et Rayonnement Module en 2019 .
- [29][https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fslideplayer.fr%2Fslide%2F1319027%2F-\\_%26p-sig=AOvVaw3xiezljhFdQct0pUEVw](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fslideplayer.fr%2Fslide%2F1319027%2F-_%26p-sig=AOvVaw3xiezljhFdQct0pUEVw) [consulté le 12 juin 2024]

## Références

- [30] F.A. Belainine, M.A. Salmi « Etude De La Miniaturisation Des Antennes Par Repliement Application Pour La Conception D'une Antenne 2.4ghz » Mémoire de Master, Université Houari Boumediene d'Alger 2013.
- [31] [https://www.univ-chlef.dz/ft/wp-content/uploads/2020/04/Plyco\\_cours\\_Antennes.pdf](https://www.univ-chlef.dz/ft/wp-content/uploads/2020/04/Plyco_cours_Antennes.pdf)
- [32] I. J. Bahl and P. E. Bhartia, Microstrip Antennas. Dedham, MA : Artech House, 1980.
- [33] Y. T. Lo, D. Solomon, and W. F. Richards, "Theory and experiment on microstrip antennas," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-27, pp. 137-145, Mar. 1979.
- [34] O. Lafond, M. Himdi, and J. P. Daniel, "Aperture coupled microstrip patch antenna with thick ground plane in millimetre waves," Electron. Lett., vol. 35, no. 17, pp. 1394-1395, 1999.
- [35] Elliot P , The applied computational electromagnetic society, Antenna and propagation Magazine , IEEE, Volume 33, Issue 1, 3rd August 2002, pp..18-19.
- [36] N. Belgacem « Conception Des Antennes Pifa Mono-Bande Et Multi-Bandes Gsm, Dcs, Pcs, Umts Et Wifi Pour Téléphones Mobiles » Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2013.
- [37] A. El Alami, "Contribution à l'Amélioration des Performances d'Antennes Patch pour l'Identification par Radio Fréquence (RFID)", Thèse de doctorat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Faculté des Sciences et Techniques, Fès, Maroc, 10 Janvier 2015.