

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière Télécommunication  
Spécialité Réseaux et Télécommunication  
présenté par

CHANANE Bouchra

&

MELLAS Khadidja

### Conception et réalisation d'une antenne MIMO multi- bandes à base de la technologie SIW

Proposé par :

M.ABED AHCÉNE

MCB

USD BLIDA

Année Universitaire 2021-2022

## Remerciements

---

*Au terme de cette étude, je tiens à présenter mes sincères remerciements au bon dieu de m'avoir accordé la connaissance de la science et de m'avoir aidé à réaliser ce travail.*

*Je veux très sincèrement remercier M. ABED Ahcène, Enseignant à l'Université de Blida pour avoir assuré l'encadrement de ce travail. Sa disponibilité, son expérience, son savoir scientifique et ses qualités humaines ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail.*

*Monsieur, le Président et les membres du jury, j'ai très sensibles à l'honneur que vous nous faites en acceptant de juger ce travail.*

*Pour terminer, j'adresse mes profondes reconnaissances à toutes celles et tous ceux que nous n'avez pas cités ici et qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, sans oublier ma famille, sans eux je n'aurais pas pu continuer.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail aux êtres les plus chers du mon cœur :*

*A Mon cher père*

*Aucune dédicace, ne saurait exprimer mon grand respect, et ma reconnaissance pour les sacrifices que tu as consentis pour mon éducation. J'implore dieu le tout puissant de vous accorder bonne santé, longue vie.*

*A la mémoire de ma chère mère.*

*Je ne saurais exprimer mon grand chagrin en ton absence. J'aurais aimé que tu sois à mes côtés ce jour, que ce travail soit une fierté pour toi. Puisse dieu puissant l'avoir en sainte miséricorde*

*A mes sœurs et mes frères*

*Ames chères sœurs et mon frère, que le dieu puissant vous donne de santé, bonheur, courage et surtout réussite. A mes amies et mes profs A toutes mes amies de près ou de loin, mes amies dans l'académie, dans l'association. «À toute personne qu'elle m'a encouragée depuis que j'ai commencé.*

**Bouchra**

*Ma petit famille*

*Un grand merci à ma petite famille mes parent , ma sœur RAHIL et mon frère TOUFIK pour leur amour leur confiance leur conseils ainsi que leur soutien inconditionnel qui m'a permis de réaliser les études pour lesquelles je me destine et par conséquent ce mémoire*

**Khadija**

---

## ملخص:

الهوائي عنصر مهم في مجال الاتصالات السلكية واللاسلكية لإرسال المعلومات في شكل موجات كهرومغناطيسية. ولتحسين أداء الهوائيات من حيث التغطية يتم عادة جمع الهوائيات على شكل شبكات. إلا أنه في الكثير من الحالات وخصوصاً إذا كان التباعد بين عناصر الشبكة أقل من نصف طول، يحدث عادةً اقتراناً متبادلاً حاداً يقلل من قدرة النظام على التكيف. لذلك من الصعب جداً تثبيت هذه الأنظمة في وحدات متنقلة ذات حجم محدود. الهدف من هذا المشروع هو دراسة وتنفيذ شبكة متعددة الهوائيات MIMO باستخدام تقنية SIW. يتم اختبار النظام النموذجي عن طريق المحاكاة في بيئة HFSS على ركيزة من نوع Fr4-epoxy مع ثابت عازل  $\epsilon_r = 4.4$  وسمك  $h = 1.6mm$  باعتبار التوتر 2.4GHz.

## كلمات المفاتيح:

شبكات هوائية ، هوائيات متعددة MIMO ، HFSS.

---

## Résumé:

Une antenne est un élément important dans les systèmes de télécommunications pour la transmission d'informations sous forme d'ondes électromagnétiques. Afin d'améliorer les performances des antennes en termes de zone de couverture, elles sont généralement regroupées sous forme de réseaux. Cependant, dans de nombreux cas, en particulier si l'espacement entre les éléments du réseau est inférieur à une demi-longueur d'onde, un couplage mutuel se produit généralement, ce qui réduit l'adaptabilité du système. Il est donc très difficile d'installer ces systèmes dans des unités mobiles de taille limitée.

L'objectif de ce projet est d'étudier et de mettre en œuvre un réseau multi-antennes MIMO utilisant la technologie SIW. Le système modèle est testé par simulation dans un environnement HFSS sur un substrat Fr4-époxy avec une constante diélectrique  $\epsilon_r = 4,4$  et une épaisseur  $h = 1,6mm$  avec une fréquence de travail de 2,4GHz.

## Mots clés :

Guide d'onde intégré au substrat ; Réseau d'antennes ; MIMO ; HFSS .

---

## Abstract :

An antenna is an important element in telecommunication systems for transmitting information in the form of electromagnetic waves. To improve the performance of antennas in terms of coverage area, they are usually grouped together in arrays. However, in many cases, especially if the spacing between the array elements is less than half a wavelength, mutual coupling usually occurs, which reduces the adaptability of the system. This makes it very difficult to install these systems in mobile units of limited size.

The objective of this project is to study and implement a multi-antenna MIMO network using SIW technology. The model system is tested by simulation in an HFSS environment on a Fr4-epoxy substrate with a dielectric constant  $\epsilon_r = 4.4$  and a thickness  $h = 1.6mm$  with a working frequency of 2.4GHz.

## Keywords:

Substrate Integrated Waveguide SIW ; Array antenna ; MIMO ; HFSS.

---

# Table des matières

## Table des matières

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Liste des acronymes

<b>1</b>	<b>Antennes et technologie SIW</b>	<b>3</b>
1.1	Introduction . . . . .	3
1.2	Historique . . . . .	3
1.3	Définition d'une antenne . . . . .	4
1.4	Rôle de l'antenne . . . . .	4
1.5	Notions fondamentales . . . . .	5
1.5.1	rappel d'électromagnétisme . . . . .	5
1.5.2	Equations de Maxwell . . . . .	6
1.5.3	Présentation des équations de Maxwell . . . . .	6
1.6	Caractéristiques des antennes . . . . .	7
1.6.1	Diagramme de rayonnement d'une antenne . . . . .	7
1.6.1.1	puissance rayonnée par une antenne . . . . .	7
1.7	Directivité, gain et rendement d'une antenne . . . . .	9
1.7.1	Directivité . . . . .	9
1.7.1.1	Gain . . . . .	9
1.7.1.2	Rendement . . . . .	10
1.8	Modèle électrique et comportement fréquentiel . . . . .	11
1.8.1	Modèle électrique d'une antenne . . . . .	11
1.8.1.1	Modèle d'impédance complexe d'une antenne . . . . .	11
1.8.1.2	Bande passante et facteur de qualité . . . . .	13
1.9	Types d'antennes . . . . .	13
1.9.1	Antennes filaires . . . . .	14

1.9.2	Antennes à fentes . . . . .	15
1.9.3	Antennes microrubans . . . . .	15
1.9.4	Antennes réseaux . . . . .	16
1.9.5	Antennes réflecteurs . . . . .	17
1.10	Polarisation d'une antenne – Perte de polarisation . . . . .	17
1.10.1	Polarisation d'une antenne . . . . .	17
1.10.1.1	Perte de polarisation . . . . .	18
1.11	Technologie SIW . . . . .	18
1.12	Caractéristiques de propagation de la technologie SIW . . . . .	19
1.13	Domaines d'application . . . . .	20
1.14	Avantage et inconvénient . . . . .	20
1.15	Conclusion . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Antennes Multi-Input Multi-Output MIMO</b>	<b>22</b>
2.1	Introduction . . . . .	22
2.2	Reseau d'antennes . . . . .	22
2.2.1	Facteur de réseau . . . . .	23
2.2.2	Champ électrique total . . . . .	24
2.2.3	Types de réseaux d'antennes . . . . .	25
2.2.3.1	Réseaux linéaires . . . . .	25
2.2.3.2	Réseaux circulaires . . . . .	27
2.2.3.3	Réseaux planaires . . . . .	28
2.2.3.4	Autres types de réseau d'antennes . . . . .	28
2.2.4	Alimentation d'un réseau d'antennes . . . . .	29
2.3	Domaines d'applications des réseaux d'antennes . . . . .	30
2.3.1	Systèmes MIMO . . . . .	30
2.3.2	Principe de l'antenne MIMO . . . . .	31
2.3.2.1	Diversité spatiale . . . . .	32
2.3.2.2	Diversité de polarisation . . . . .	32
2.3.2.3	Diversité temporelle . . . . .	32
2.3.2.4	Diversité de fréquence . . . . .	33
2.3.3	Différentes catégories de MIMO . . . . .	33
2.3.3.1	Diversité spatiale MIMO : . . . . .	33
2.3.3.2	Multiplexage Spatial MIMO : . . . . .	33
2.3.3.3	MIMO - Beamforming : . . . . .	34
2.4	Conclusion . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Conception et Simulation d'antennes SIW</b>	<b>35</b>
3.1	Introduction . . . . .	35
3.2	Logiciel de simulation HFSS . . . . .	35
3.2.1	Description générale des outils HFSS . . . . .	36

---

3.2.2	Conception et configuration d'une structure . . . . .	37
3.2.2.1	Choix du substrat . . . . .	37
3.2.2.2	Type de la solution . . . . .	37
3.2.2.3	Boxe de radiation . . . . .	38
3.2.2.4	Assignement des excitations . . . . .	39
3.2.3	Validation de la conception . . . . .	39
3.2.4	Analyse de la conception . . . . .	40
3.2.5	Etapes de simulation d'antenne sous HFSS . . . . .	40
3.2.5.1	Configuration des solutions . . . . .	40
3.2.5.2	Créer les rapports . . . . .	41
3.3	Simulation d'antennes proposées . . . . .	42
3.3.1	Antenne patch SIW (structure 1) . . . . .	42
3.3.2	Antenne patch MIMO_SIW (structure 2) . . . . .	44
3.3.3	Antenne patch MIMO_SIW (structure 3) . . . . .	47
3.4	Conclusion . . . . .	49
	<b>Bibliographie</b>	<b>51</b>

# Liste des figures

1.1	Système de communication radio par (OEM)	5
1.2	Charge Q	5
1.3	champ B	6
1.4	Angle solide	7
1.5	Diagramme de rayonnement	8
1.6	Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture	9
1.7	Modèle électrique d'une antenne	11
1.8	Bande passante et coefficient de réflexion	13
1.9	Antenne dipôle, circulaire, hélice	14
1.10	Dipôle a une longueur totale d'une demi-longueur d'onde	15
1.11	Antennes à fentes	15
1.12	Formes rectangulaires et circulaires	16
1.13	Exemples d'antennes réseaux.	16
1.14	Schéma illustrant l'antenne parabolique	17
1.15	Plans de symétrie et d'antisymétrie	18
1.16	Pertes de polarisation	18
1.17	Structure d'un guide d'onde intégré au substrat	20
2.1	Géométrie d'un réseau d'antenne	23
2.2	Géométries d'un réseau d'antennes. (a)-linéaire (b)-circulaire (c)-planaire (d)-volumique	26
2.3	Gain de réseau en fonction du nombre d'éléments rayonnants	27
2.4	Alimentation d'un réseau d'antennes patch (a)-série (b)-parallèle	30
2.5	Diversité temporelle	32
2.6	Diversité fréquentielle	33
3.1	fenetre 3D	36
3.2	Choix du substrat	37
3.3	Choix du type de la solution	38
3.4	Boxe de radiation	38



---

3.5	Configuration d'excitation . . . . .	39
3.6	Validation d'une structure . . . . .	39
3.7	Antenne de base sous HFSS . . . . .	40
3.8	Fréquence de travail . . . . .	41
3.9	Création du rapport . . . . .	41
3.10	Antenne patch SIW . . . . .	42
3.11	Coefficient de reflexion (Antenne 1) . . . . .	43
3.12	Diagramme de rayonnement (Antenne 1) . . . . .	43
3.13	Distribution du champ électrique (Antenne 1) . . . . .	44
3.14	Antenne patch en technologie siw (Antenne 2) . . . . .	44
3.15	Coefficient de reflexion (Antenne 2) . . . . .	45
3.16	Coefficient de transmission (Antenne 2)) . . . . .	45
3.17	Diagramme de rayonnement (Antenne 2) . . . . .	46
3.18	Distribution du champ électrique (Antenne 2) . . . . .	46
3.19	Antenne patch MIMO_SIW 3 . . . . .	47
3.20	Coefficient de reflexion (Antenne 3) . . . . .	47
3.21	Diagramme de rayonnement (Antenne 3) . . . . .	48
3.22	Distribution du champ électrique (Antenne 3) . . . . .	48
3.23	Gain de l'antenne 3 . . . . .	49

# Liste des tableaux

3.1 Antenne patch SIW . . . . . 42

# Liste des Acronymes

$\vec{\nabla}$	: L'opérateur Nabla
$\rho$	: la densité volumique de charge
$\epsilon$	: la permittivité électrique
$\epsilon_0$	: la permittivité électrique dans le vide
$\epsilon_r$	: la permittivité électrique dans le milieu
$\mu_0$	: la perméabilité magnétique dans le vide
$\mu$	: la perméabilité magnétique
$\mu_r$	: la perméabilité magnétique dans le milieu
$\sigma$	: la conductivité électrique
$\lambda$	: la longueur
$C$	: la célérité de la lumière
$T$	: la période
$f$	: la fréquence
$p$	: la densité
$p_r$	: la puissance Rayonnée
$D(\theta, \varphi)$	: la directivité d'une antenne
$P(\theta, \varphi)$	: l'intensité de rayonnement dans une direction
$I$	: le courant électrique
$v$	: la tension électrique
$Z_e$	: l'impédance d'entrée
$B$	: la bande passante
$f_{\min}$	: la fréquence minimale
$f_{\max}$	: la fréquence maximal
$f_c$	: la fréquence de résonance
$\eta$	: le rendement
$R_{rad}$	: la résistance de rayonnement
$S_{11}$	: la coefficient de réflexion
$Z_r$	: l'impédance caractéristique

# Introduction générale

Dans les télécommunications, les informations sont véhiculées dans un support sous la forme d'ondes (ondes électromagnétiques, lumière etc.). Ces informations peuvent provenir de sources variées, elles doivent être converties préalablement sous une forme apte à être transmise à travers le support de transmission. Pour chaque support, doit être définie, un système global de télécommunication intégrant et gérant le fonctionnement d'un ensemble de sous-systèmes. Le système de télécommunication désigne l'ensemble d'équipements et techniques permettant d'assurer la transmission d'information entre les utilisateurs .

La technologie MIMO permet d'augmenter les débits de données sans avoir besoin d'une bande passante supplémentaire. Mais lorsque les antennes sont placées dans un espace inférieur à  $\lambda/2$  , elles sont généralement confrontées à un couplage mutuel grave ce qui dégrade l'adaptabilité des systèmes. C'est donc une tâche très difficile de réaliser ces systèmes dans des unités mobiles de taille limitée. D'autres facteurs tels que le coefficient de corrélation élevé entre les antennes étroitement espacées affectent également les performances du système de communication MIMO. Ainsi, afin de décorréler de telles antennes.

Aujourd'hui, la technologie appelée guide d'ondes intégré au substrat (siw) est devenue un successeur assuré pour la mise en œuvre de dispositifs et d'antennes à micro-ondes dans la région des ondes millimétriques. Le SIW est une technologie qui transforme une conception non-planaire telle qu'une antenne en forme plane en la plaçant sur un seul substrat. Les SIW de type guide d'ondes sont fabriqués à l'aide de deux rangées de cylindres ou de fentes conductrices insérées dans un substrat électrique entre deux plaques métalliques équidistantes. Le SIW est donc conçu sous forme plane. L'onde se propage dans la structure de type guide d'ondes formée par les via métalliques. L'espacement fermé des via métalliques empêche l'onde de fuir à travers le substrat et agissent donc comme parois latérales d'un guide d'ondes . Ces via sont également utiles pour empêcher le couplage mutuel entre différents éléments du système MIMO.

Ce projet a pour but d'étudier et de réaliser une antennes SIW (substrat Integrated Waveguid) pour les applications des systèmes MIMO (Multi Input Multi Output). Le pro-

prototype sera réalisé sur un substrat de type Fr4-Epoxy d'une constante diélectrique  $\epsilon_r = 4.4$  et d'une épaisseur  $h = 1.6\text{mm}$  pour une fréquence de travail de 2.45GHz. Pour atteindre nos objectifs, ce mémoire sera organisé en trois chapitres essentiels.

- **Chapitre 1** : présente des généralités sur les antennes, en particulier les bases théoriques types de technologies telles que les guides d'ondes classiques et la technologie planaire ainsi que et la technologie SIW.
- **Chapitre 2** : présente antenne réseaux, type des antennes réseaux ,domaine d'application des réseaux antenne ,système MIMO , principe de système MIMO et à la fin déférente catégorie système MIMO
- **chapitre 3** : montre les simulations et les étapes de conception pour l'antenne SIW appliquée aux systèmes MIMO. Il sera entièrement consacré à la présentation et l'analyse des résultats de simulation d'une antenne utilisant la technologie SIW, pour étudier les caractéristiques d'une antenne dans la bande de fréquences [2 – 5GHz]. Les simulations sont effectuées à l'aide du logiciel de simulation HFSS.

# Antennes et technologie SIW

## 1.1 Introduction

Les antennes servent à la communication à grande distance , car à petit distance on utilise des câbles ou bien des guide d'onde puisque c'est moi Couteux .Ce pendant aujourd'hui on communique par voie hertzienne entre une station base et une entre mobile très proche à l'intérieur d'une même pièce pour éviter le filtrage .

dans ce chapitre nous présentons en premier l'historique ,la définition Des antennes , nous donner ensuite leur caractéristique et le domaine D'utilisation, leur avantage aussi que les inconvénient . Finalement nous Termine ce chapitre en rappelons les différents type .

## 1.2 Historique

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

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

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

Et c'est au physicien «James maxwell » et théoricien fondateur de l'électromagnétisme, d'unifier les divers observations et relations entre le champ magnétique et électrique pour

formuler dans les années 1860/1865 les célèbres équations connues aujourd'hui sous le nom « équations de maxwell » qui ont été publiées ensuite en 1873 [2].

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

### 1.3 Définition d'une antenne

L'antenne est en fait un morceau de métal ou diélectrique. Dans un langage plus adapté à l'électronique, on dirait qu'il s'agit d'un appareil métallique qui rayonne ou reçoit des ondes électromagnétiques. En d'autres termes, c'est une structure de transition entre l'espace libre et les guides. Les moyens de guidage peuvent être des lignes de transmission ou des guides d'ondes. Il est utilisé pour transférer l'énergie de la source à l'antenne ou de l'antenne au récepteur.

En termes simples, un conducteur électrique traversé par un courant fournit de l'énergie sous forme de chaleur, de lumière (lampes). De même, il fournit un champ magnétique (principe du transformateur) et de l'électricité (principe du condensateur). Le principe de l'antenne d'émission est d'assurer Ce champ se propage, c'est alors une onde électromagnétique.

Les ondes électromagnétiques sont converties en énergie électrique sous la conduite de conducteurs électriques .Le principe de l'antenne réceptrice est d'assurer que le champ électromagnétique dans l'air est converti en énergie utilisable (signal électrique).

### 1.4 Rôle de l'antenne

Voici un système de communication radio qui transmet des informations par l'intermédiaire d'une onde électromagnétique (OEM).

L'antenne d'émission reçoit le signal électrique de l'émetteur et produit l'onde électromagnétique. Cette OEM se propage dans l'espace autour de l'antenne d'émission en fonction du type et de la forme d'antenne utilisée, certaines directions de propagation

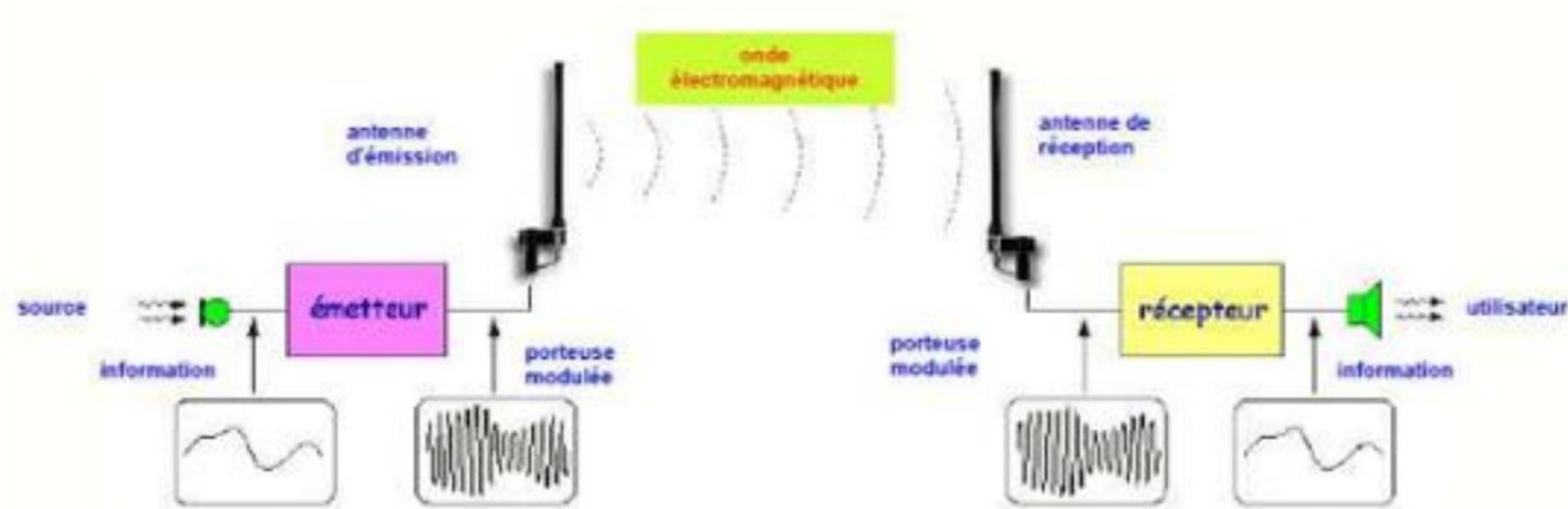


FIGURE 1.1. Système de communication radio par (OEM)

peuvent être privilégiées. La puissance produite par l'émetteur ou appliquée à l'antenne se disperse dans l'espace. L'antenne de réception capte une faible partie de cette puissance et la transforme en signal électrique.

## 1.5 Notions fondamentales

Le but de ce chapitre est de revenir sur certaines notions fondamentales d'électromagnétisme avant de se concentrer sur les antennes. Il s'agit de répondre aux questions suivantes :

### 1.5.1 rappel d'électromagnétisme

Les ondes électromagnétiques sont converties en énergie électrique sous la conduction de conducteurs électriques, et le principe de l'antenne de réception est d'assurer que le champ électromagnétique dans l'air est converti en énergie utilisable

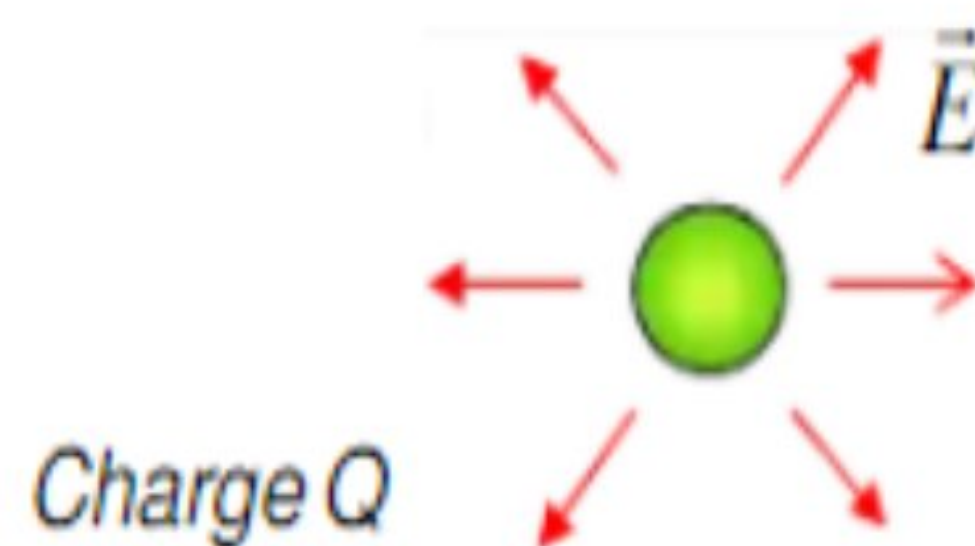


FIGURE 1.2. Charge Q



$$\vec{E}(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^3} \vec{r} \quad (1.1)$$

c'est-à-dire une charge mobile traversant l'interconnexion fondamentale est à l'origine du champ magnétique qui tourne autour du fil

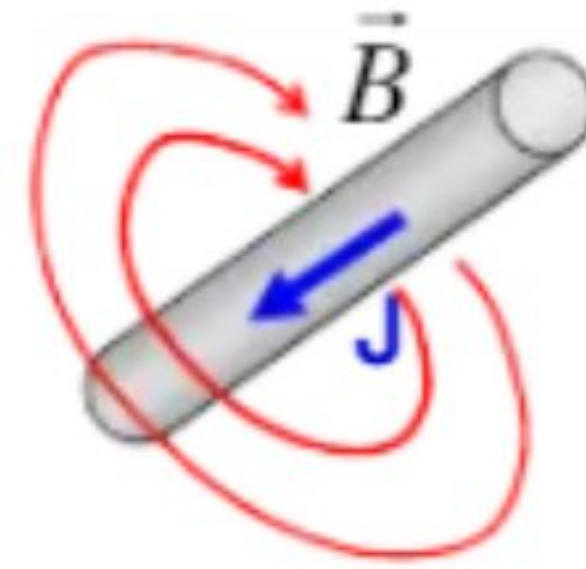


FIGURE 1.3. champ B

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\vec{J} \wedge \vec{r}}{r^3} dv \quad (1.2)$$

### 1.5.2 Equations de Maxwell

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

### 1.5.3 Présentation des équations de Maxwell

Equation de Maxwell-Gauss  $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$  Equation 3

Equation de Maxwell-Thompson  $\operatorname{div} \vec{B} = 0$  Equation 4

Equation de Maxwell-Faraday  $\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt}$  Equation 5

Equation de Maxwell-Ampère  $\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{d\vec{E}}{dt}$  Equation 6

A notre que :

—  $\rho$  : densité volumique de charge

—  $\epsilon$  : permittivité électrique (F/m). A noter  $\epsilon_0$  permittivité diélectrique dans le vide (=  $8.8 \times 10^{-12}$ ) et

- $\epsilon_r$  : permittivité électrique relative telle que  $\epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0$
- $\mu$  : perméabilité magnétique (H/m). A noter  $\mu_0$  : permittivité diélectrique dans le vide ( $=4\pi \cdot 10^{-7}$ )
- $\mu_r$  : permittivité magnétique relative telle que  $\mu = \mu_0 \times \mu_r$
- $\sigma$  : conductivité électrique du milieu (S/m)

## 1.6 Caractéristiques des antennes

### 1.6.1 Diagramme de rayonnement d'une antenne

#### 1.6.1.1 puissance rayonnée par une antenne

Une antenne sert à convertir une puissance électrique en une puissance rayonnée, c'est-à-dire transportée par une onde électromagnétique, qui peut se propager dans toutes les directions de l'espace. Les directions dans lesquelles cette puissance vont dépendre des caractéristiques de l'antenne. Commençons par exprimer la puissance rayonnée par une antenne quelconque, dont le centre est placé au centre d'un repère sphérique et connectée à une source qui lui fournit une puissance électrique  $P_a$ . La puissance rayonnée dans une direction quelconque  $(\theta, \varphi)$  dans un angle solide  $\Omega$  [2].

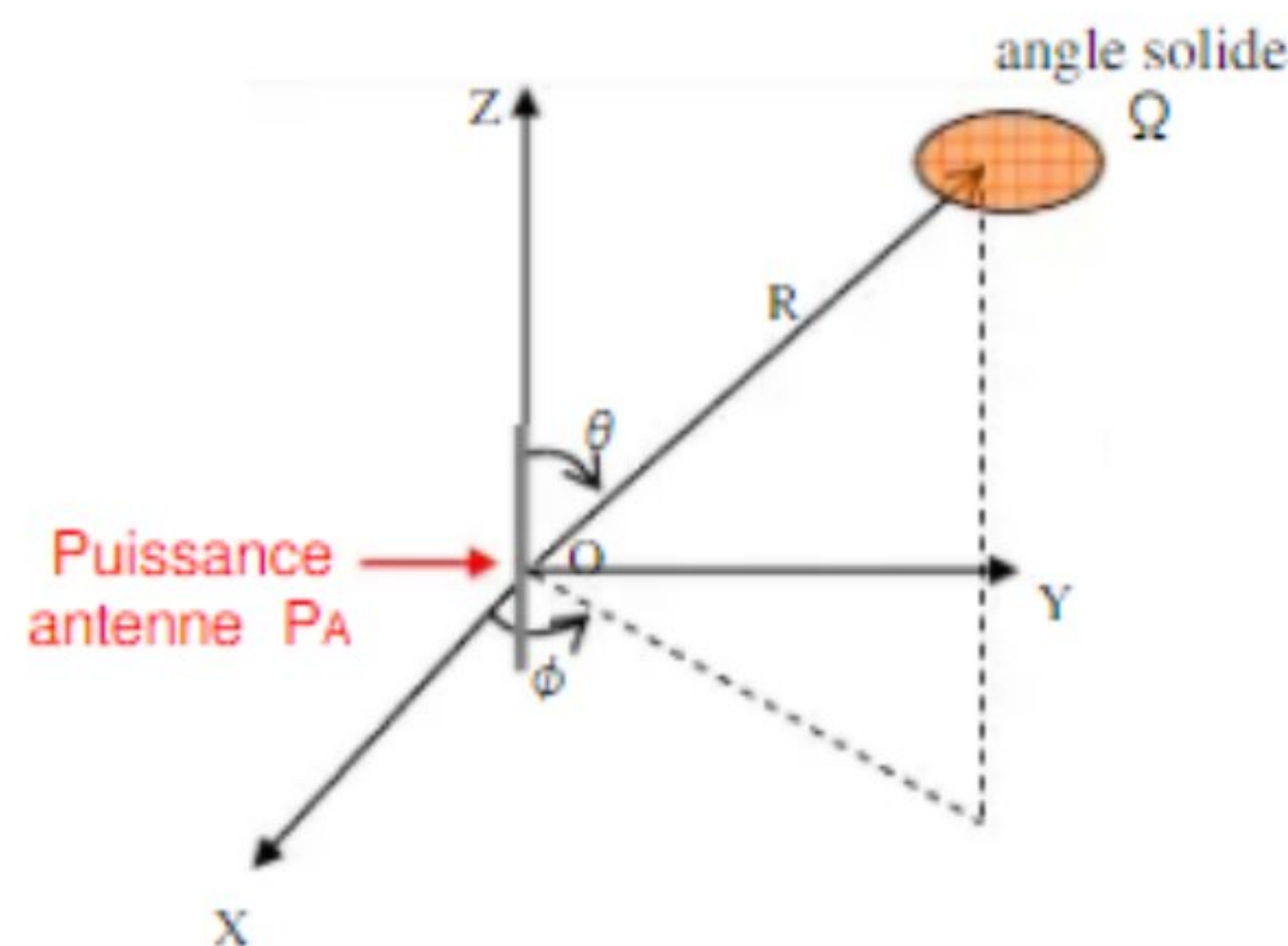


FIGURE 1.4. Angle solide

$$p(\theta, \varphi) = \frac{P_a}{\Omega} \text{ (WOUW/Sr)} \quad (1.3)$$

$$p(\theta, \varphi) = \frac{P_a}{\Omega R^2} \text{ (w/m}^2\text{)} \quad (1.4)$$

$$p_{tot} = \int \int p(\theta, \varphi) d\varphi d\theta (w/m^2) \quad (1.5)$$

**Diagramme de rayonnement** Les antennes sont rarement omnidirectionnelles et émettent ou reçoivent dans des directions privilégiées. Le diagramme de rayonnement représente les variations de la puissance rayonnée par l'antenne dans les différentes directions de l'espace. Il indique les directions de l'espace  $(\theta_0, \varphi_0)$  dans lesquelles la puissance rayonnée est maximale. Il est important de noter que le diagramme de rayonnement n'a de sens que si l'onde est sphérique

$$r(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_0(\theta_0, \varphi_0)} \quad (1.6)$$

avec :

- $p(\theta, \varphi)$  : puissance rayonnée dans une direction quelconque
- $p_0(\theta_0, \varphi_0)$  : puissance rayonnée max

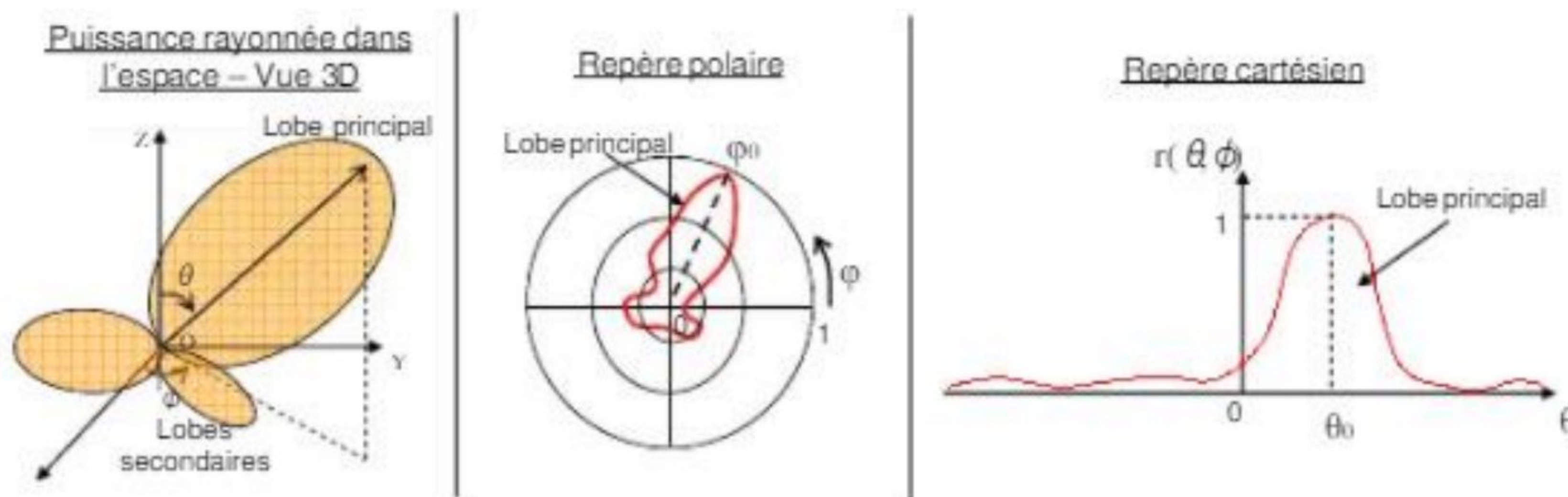


FIGURE 1.5. Diagramme de rayonnement

**Angle d'ouverture** L'angle d'ouverture (beamwidth) caractérise la largeur du lobe principal. L'angle d'ouverture à 3dB représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée. Il s'agit de l'angle entre les 2 directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal [3].

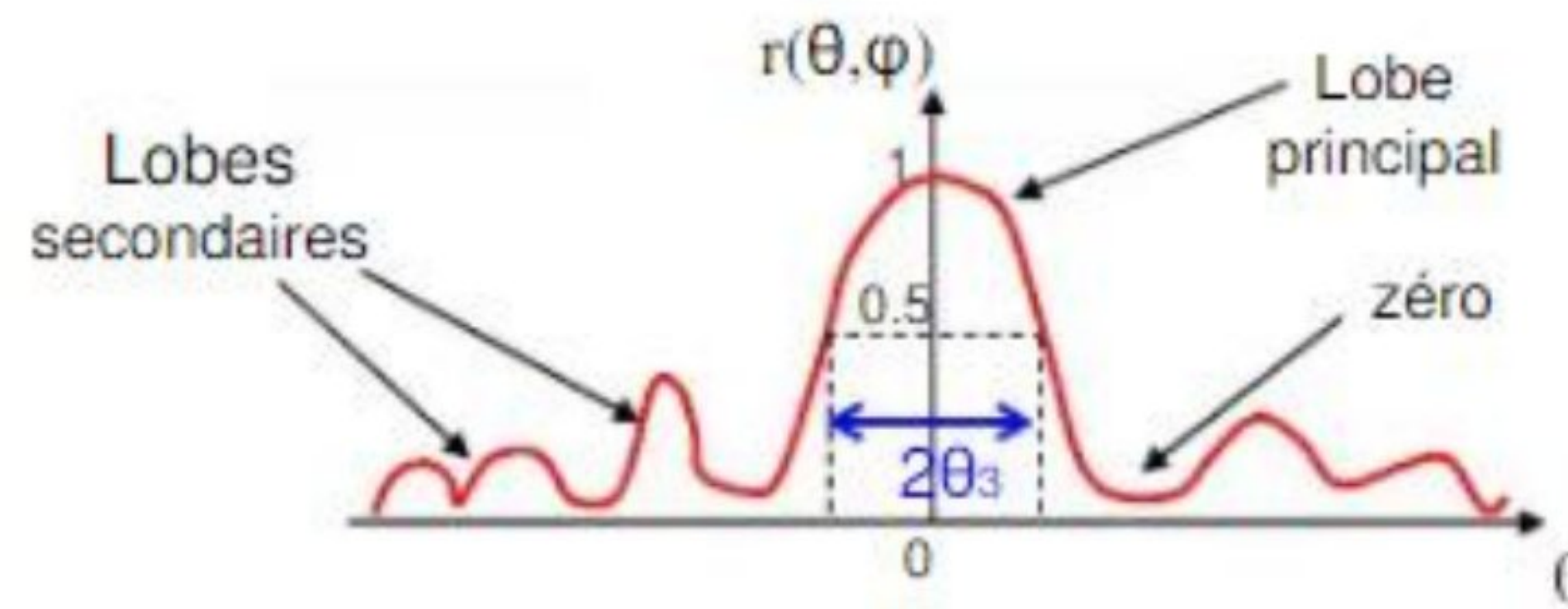


FIGURE 1.6. Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture

## 1.7 Directivité, gain et rendement d'une antenne

Ces 3 grandeurs permettent de caractériser la façon dont une antenne convertit la puissance électrique incidente en puissance électromagnétique rayonnée dans une direction particulière. Le gain et la directivité permettent de comparer les performances d'une antenne par rapport à l'antenne de référence qu'est l'antenne isotrope

### 1.7.1 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 [4].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_R}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_R} \quad (1.7)$$

#### 1.7.1.1 Gain

Le gain  $G(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$  est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $P(\theta, \varphi)$  sur la puissance que rayonnerait une antenne isotrope sans pertes. En général, le gain  $G$  correspond au gain dans la direction de rayonnement maximal  $(\theta_0, \varphi_0)$ . Cette propriété caractérise la capacité d'une antenne à focaliser la puissance rayonnée dans une direction.

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_A} \Rightarrow G = 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_A} \quad (1.8)$$

Si l'antenne est omnidirectionnelle et sans pertes, son gain vaut 1 ou 0 dB. Le gain est

généralement exprimé en dB (voir annexe A) ou en dBi car une antenne isotrope est utilisée comme référence. On trouve aussi parfois le gain exprimé en dBd, lorsqu'une antenne dipôle est utilisée comme référence

### 1.7.1.2 Rendement

Le rendement  $\eta$  d'une antenne traduit sa capacité à transmettre la puissance électrique en entrée  $P_A$  sous forme de puissance rayonnée  $P_r$ .

On le définit comme le rapport entre la puissance totale rayonnée par une antenne et la puissance qui lui est fournie. Le rendement est lié aux pertes dans le réseau de polarisation et dans les éléments rayonnants [5]. on voit que le rendement relie le gain et la directivité

$$P_R = \eta \times P_A \Rightarrow G = \eta \times D \quad (1.9)$$

**Lien entre gain et angle d'ouverture** Intuitivement, on voit que le gain est dépendant de l'ouverture d'une antenne. Plus le gain d'une antenne est grand, plus l'angle d'ouverture du lobe principal est faible, ce que montre le résultat suivant :

$$G = \eta \cdot 4\pi \frac{P(\theta_0, \varphi_0)}{P_R} \quad (1.10)$$

Et

$$P_R = 0 \rightarrow 4\pi \int P(\theta, \varphi) d\Omega = 0 \rightarrow 4\pi \int r(\theta, \varphi) P(\theta_0, \varphi_0) d\Omega \quad (1.11)$$

Alors

$$G = \eta \cdot \frac{4\pi}{\int r(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (1.12)$$

**Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)** La puissance isotrope rayonnée équivalente d'une antenne (PIRE ou EIRP en anglais) est un terme souvent utilisé en télécommunications (principalement dans les bilans de liaison) qui définit, dans la direction de rayonnement maximal, la puissance électrique qu'il faudrait apporter à une antenne isotrope pour obtenir la même puissance rayonnée dans cette direction

$$P_{IRE} = G \cdot P_A \quad (1.13)$$

## 1.8 Modèle électrique et comportement fréquentiel

Une antenne rayonne efficacement sur une bande de fréquence étroite qui correspond à sa fréquence de résonance

### 1.8.1 Modèle électrique d'une antenne

On peut résumer le comportement de l'antenne passive (qui présente un comportement linéaire) ainsi : une antenne stocke des charges (comportement capacitif = stockage sous forme d'énergie électrique), s'oppose aux variations des courants qui y circulent (comportement inductif = stockage sous forme d'énergie magnétique) et dissipe une partie de l'énergie (pertes ohmiques et par rayonnement). D'un point de vue électrique, une antenne passive peut donc être modélisée par un circuit équivalent RLC valable pour une antenne dipôle) et l'impédance  $Z_{in}$  vue à l'entrée de l'antenne. A noter que les valeurs du modèle ne sont valides que sur des bandes étroites.

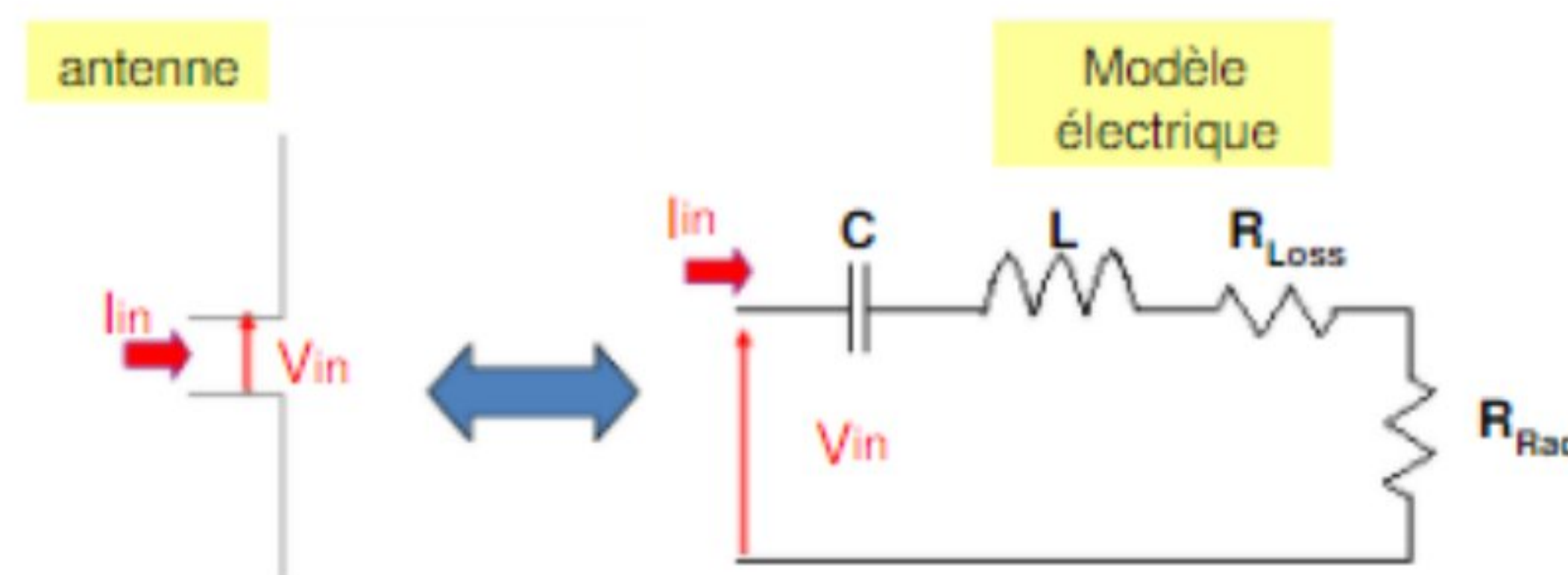


FIGURE 1.7. Modèle électrique d'une antenne

#### 1.8.1.1 Modèle d'impédance complexe d'une antenne

L'impédance d'une antenne est donnée par [6]

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_{in} + j.X_{in} \quad (1.14)$$

—  $R_{in}$  partie active

$$R_{in} = R_{rad} + R_{loss} \quad (1.15)$$

—  $X_{in}$  partie réactive

$$X_{in} = iLW + \frac{1}{iCW} \quad (1.16)$$

avec :

- $R_{rad}$  : est la résistance de rayonnement
- $R_{lass}$  : est la résistance de pertes

**Résistance de rayonnement** Il ne s'agit pas de la résistance liée aux pertes ohmiques de l'antenne, mais de la perte de puissance liée à l'onde électromagnétique rayonnée par l'antenne. Il s'agit donc d'une puissance active Une grande résistance de rayonnement indique une forte capacité à convertir l'énergie électrique incidente (lié au courant qui « passe » dans la résistance de rayonnement) en énergie électromagnétique. En effet, la puissance électrique qui lui est fournie est une puissance égale à :

$$P_{Rad} = \frac{1}{2} R_{Rad} I_{in}^2 \quad (1.17)$$

A partir de la connaissance du courant en tout point de l'antenne, il est possible de calculer la puissance rayonnée. Cependant, cette définition suppose que le courant soit constant en tout point de l'antenne. En pratique, on considèrera le point où le courant est maximum. L'efficacité d'une antenne est reliée au rapport entre la puissance rayonnée et la puissance dissipée totale

$$\eta = \frac{P_{Rad}}{P_A} = \frac{R_{Rad}}{R_{Rad} + R_{lass}} \quad (1.18)$$

Le coefficient de réflexion est le rapport entre l'onde réfléchiée en entrée de l'antenne et l'onde incidente. Il dépend de l'impédance d'entrée de l'antenne et de l'impédance caractéristique

$$P_A = P_S (1 - T_{IN}^2) \quad (1.19)$$

$$S_{11} = T_{in} = \frac{Z_{in} - Z_C}{Z_{in} + Z_C} \quad (1.20)$$

La condition d'ataption est

$$S_{11} = 0 \iff Z_{in} = Z_C \quad (1.21)$$

### 1.8.1.2 Bande passante et facteur de qualité

La bande passante d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne (ou de l'antenne vers le récepteur) est maximale. La bande passante peut être définie en fonction du coefficient de réflexion, à condition que le diagramme de rayonnement ne change pas sur cette bande. Il n'y a pas de critères précis pour la limite du coefficient de réflexion. Un critère typique d'avoir un coefficient de réflexion inférieure à -10 dB ou -15 dB sur la bande passante

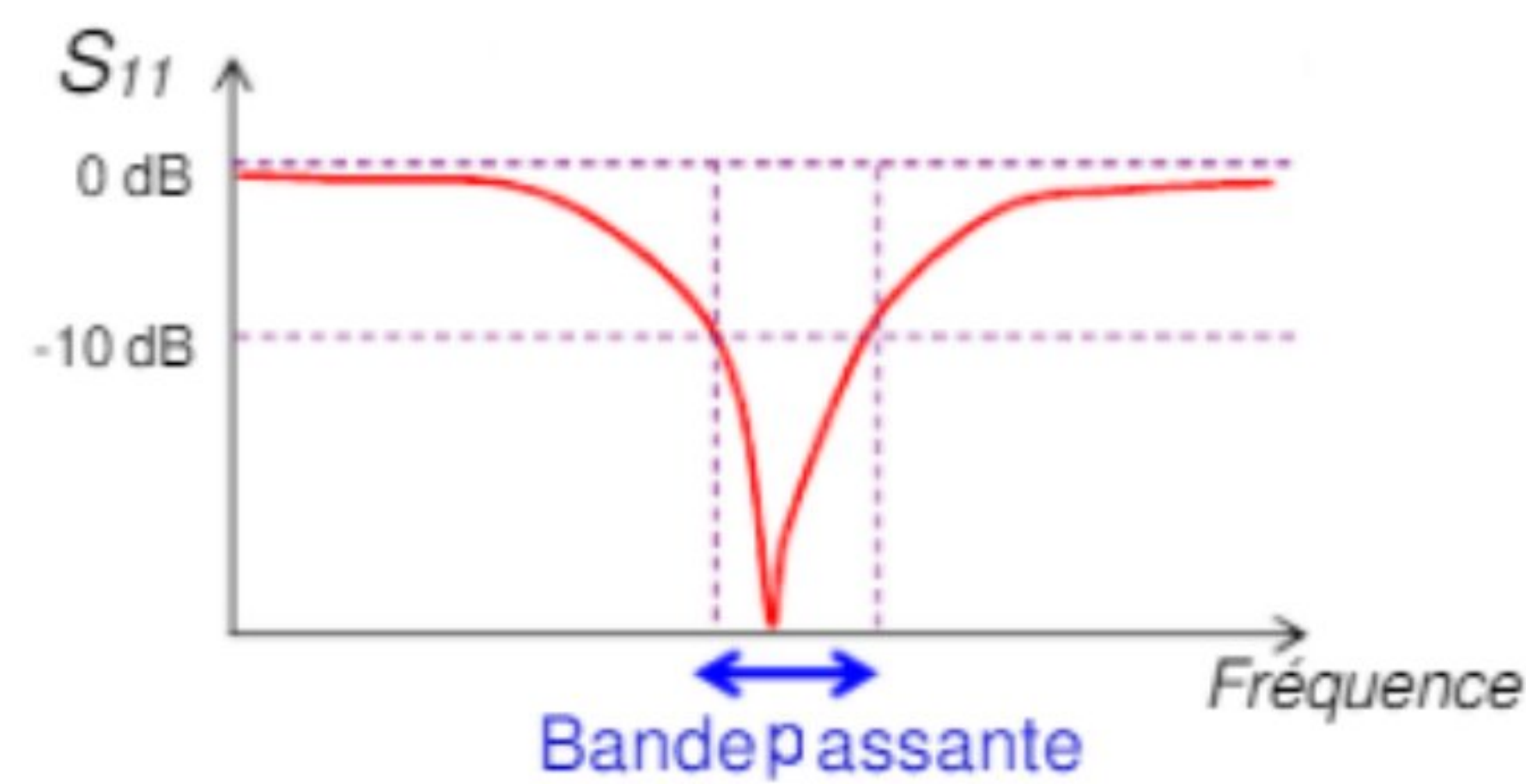


FIGURE 1.8. Bande passante et coefficient de réflexion

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

Le facteur de qualité représente la quantité de résistance présente lors de la résonance (pour un circuit résonant série

$$Q = \frac{f_{Res}}{BW} \quad (1.22)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{R_{ant}}{2\pi f_{Res} L_{ant}} \quad (1.23)$$

Tout signal émis ou reçu près des bornes de la bande de fréquence de fonctionnement sera atténué. Une antenne avec un faible facteur de qualité est large bande mais collecte le bruit présent sur la bande de fonctionnement, dégradant ainsi la qualité du signal reçu.

## 1.9 Types d'antennes

Une antenne est dite idéale si elle rayonne toute la puissance qu'elle lui a été délivrée à partir de la ligne de transmission, dans une ou plusieurs directions désirées. Dans la



pratique, ces performances idéales ne peuvent être réalisés mais peuvent être minutieusement approchées .une grande variété d'antennes existe et chaque type peut prendre une forme afin d'accomplir une caractéristique de rayonnement désirée pour une application donnée.

On va voir les grandes familles d'antennes à l'origine de l'ensemble des structures rayonnantes :

- Les antennes filaires (dipôle, monopôle, Yagi)
- Les antennes à fentes (demi ou quart d'onde)
- Les antennes patchs (planaires)
- Les antennes à ouverture (cornet)
- Les antennes à réflecteurs (paraboles)

### 1.9.1 Antennes filaires

C'est les plus familiers des antennes puisque vue partout : sur les toits, une grande variété de forme : rectiligne (dipôle), boucle circulaire rectangulaire ellipse, hélice... etc.

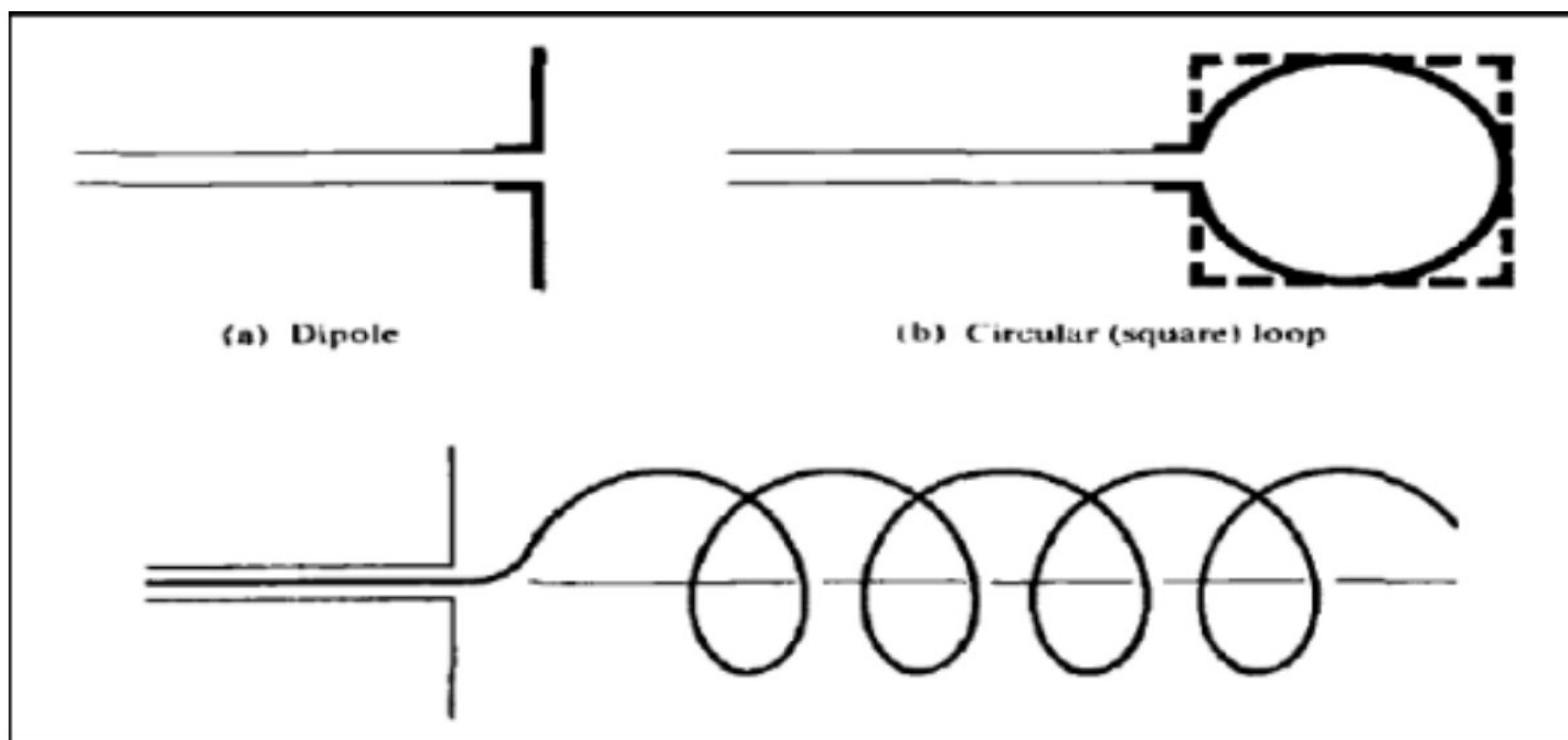


FIGURE 1.9. Antenne dipôle, circulaire, hélice

Le dipôle est l'antenne de référence en radiocommunication et elle est largement utilisée tel quel où en l'association avec d'autres conducteurs pour former une antenne Yagi. Le dipôle a une longueur totale d'une demi-longueur d'onde.



FIGURE 1.10. Dipôle a une longueur totale d'une demi-longueur d'onde

### 1.9.2 Antennes à fentes

Ce type d'antenne est très utilisé dans les avions ou les vaisseaux spatiaux car, ils peuvent être facilement montés sur leurs surfaces.

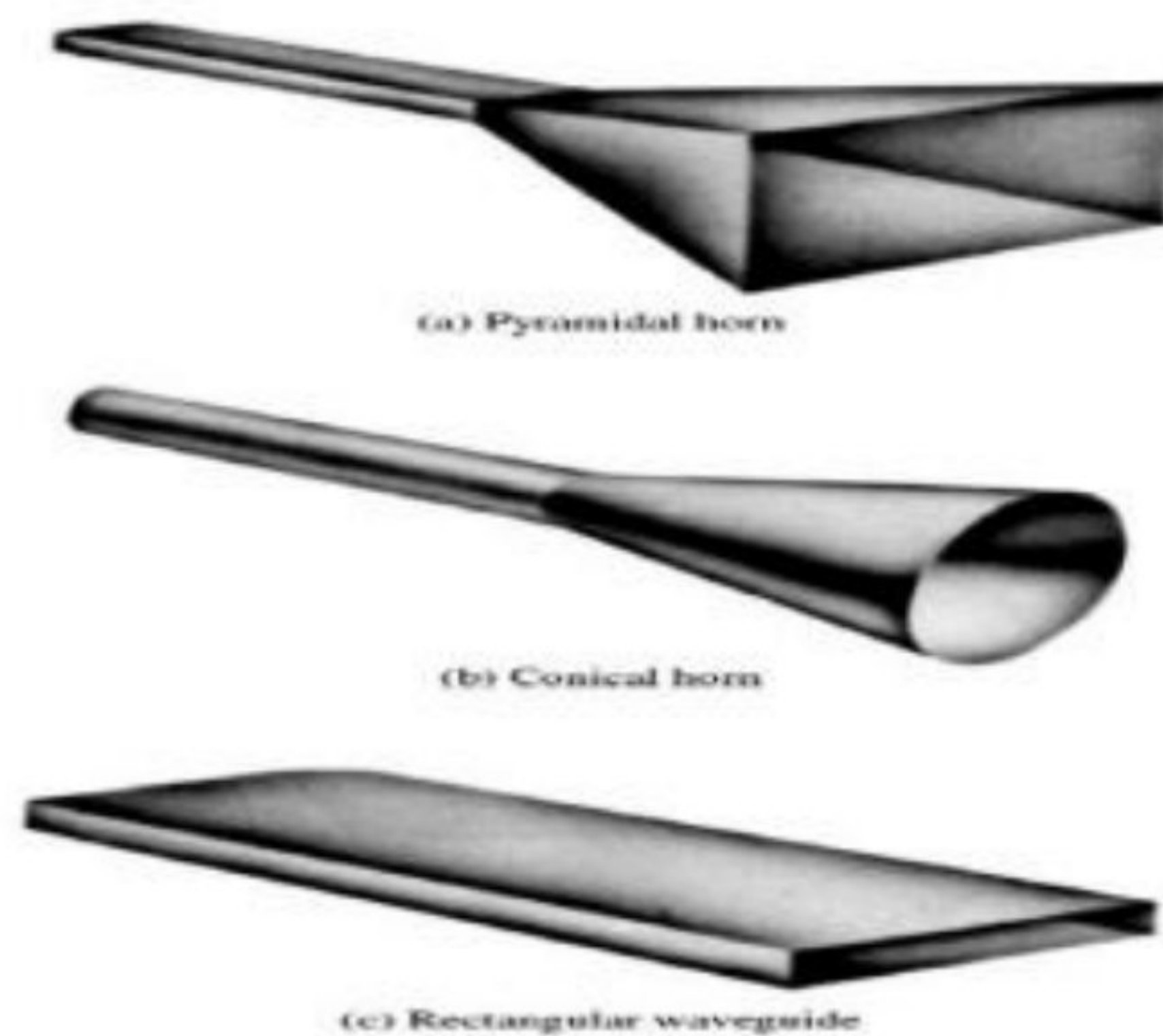


FIGURE 1.11. Antennes à fentes

### 1.9.3 Antennes microrubans

Elles sont devenues très populaires depuis les années 70. Au début, pour des applications spatiales puis, dans des applications commerciales. Ces antennes sont constituées par un patch métallique monté sur un substrat avec un plan de masse. Le patch peut prendre n'importe quelle forme comme les patches rectangulaires ou circulaires.

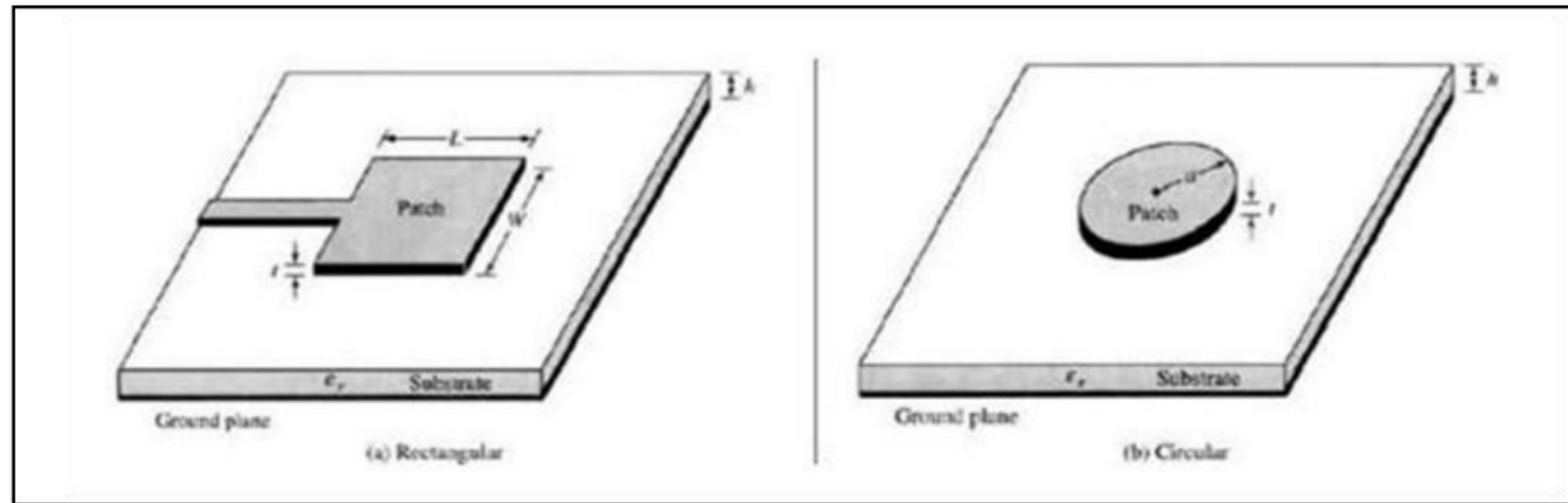


FIGURE 1.12. Formes rectangulaires et circulaires

### 1.9.4 Antennes réseaux

Beaucoup d'applications requies des rayonnements qui ne peuvent pas achevées par des éléments simples. Alors, il est possible de former un ensemble d'éléments rayonnants dans un arrangement électrique et géométrique pour avoir la caractéristique de rayonnement désirée. L'arrangement de ce réseau est tel que le rayonnement des éléments donne un rayonnement maximum dans une direction particulière, minimum dans une autre où autrement suivant les exigences des exemples typiques de réseaux sont représentés par la figure ???. En général, le terme réseau est réservé a un arrangement ou dans lequel les éléments rayonnants sont séparés. Toute fois, le même terme et aussi utilisé pour décrire un assemble d'éléments rayonnants sur une structure continue.

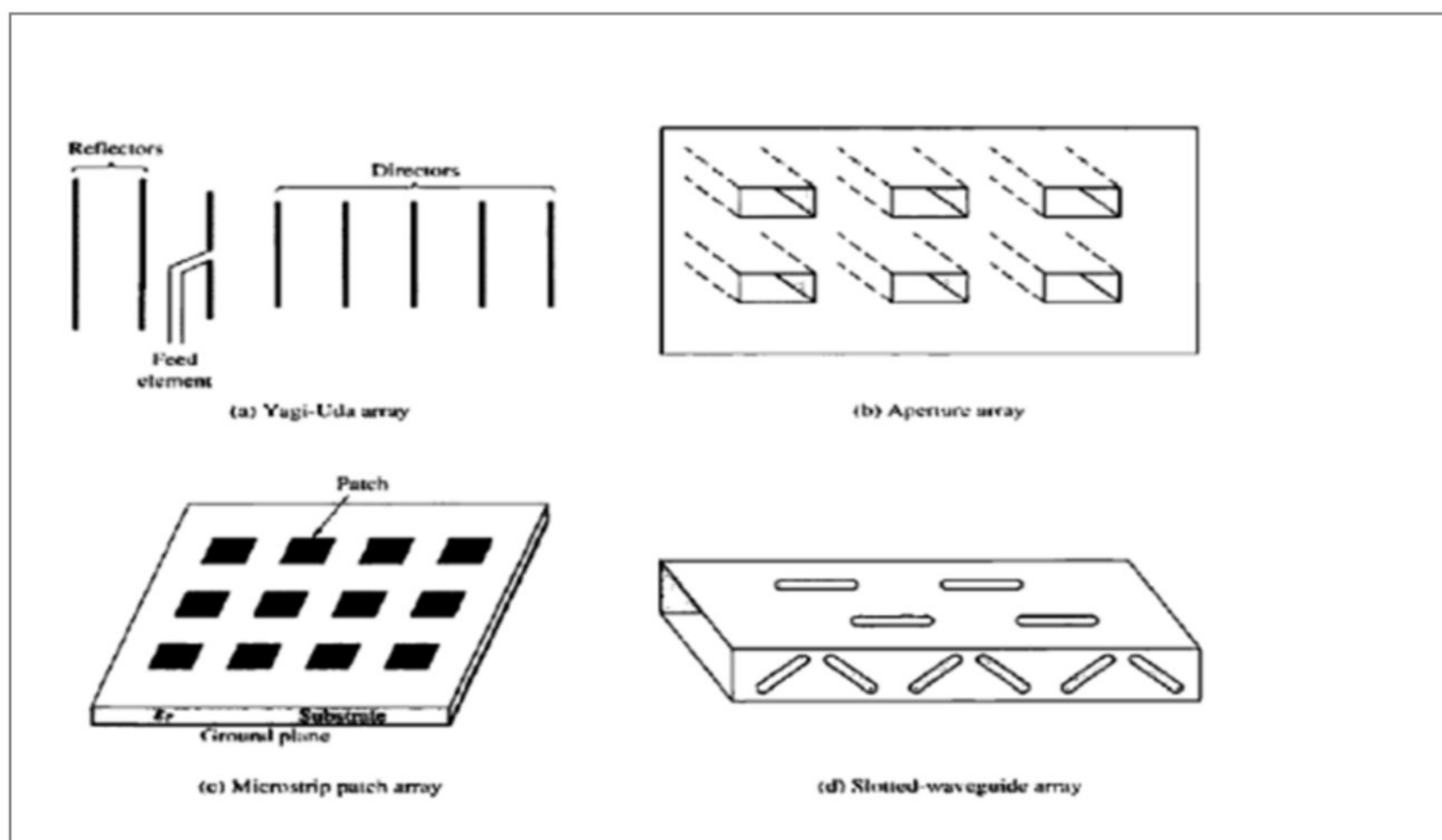


FIGURE 1.13. Exemples d'antennes réseaux.

### 1.9.5 Antennes réflecteurs

Le besoin de communiquer à des grandes distances a permis d'élaborer des formes d'antennes capables de transmettre et de recevoir des signaux qui devraient traverser des millions de kilomètres. Une forme courante pour de telles applications est le réflecteur parabolique avec des diamètres de plus de 305 m.

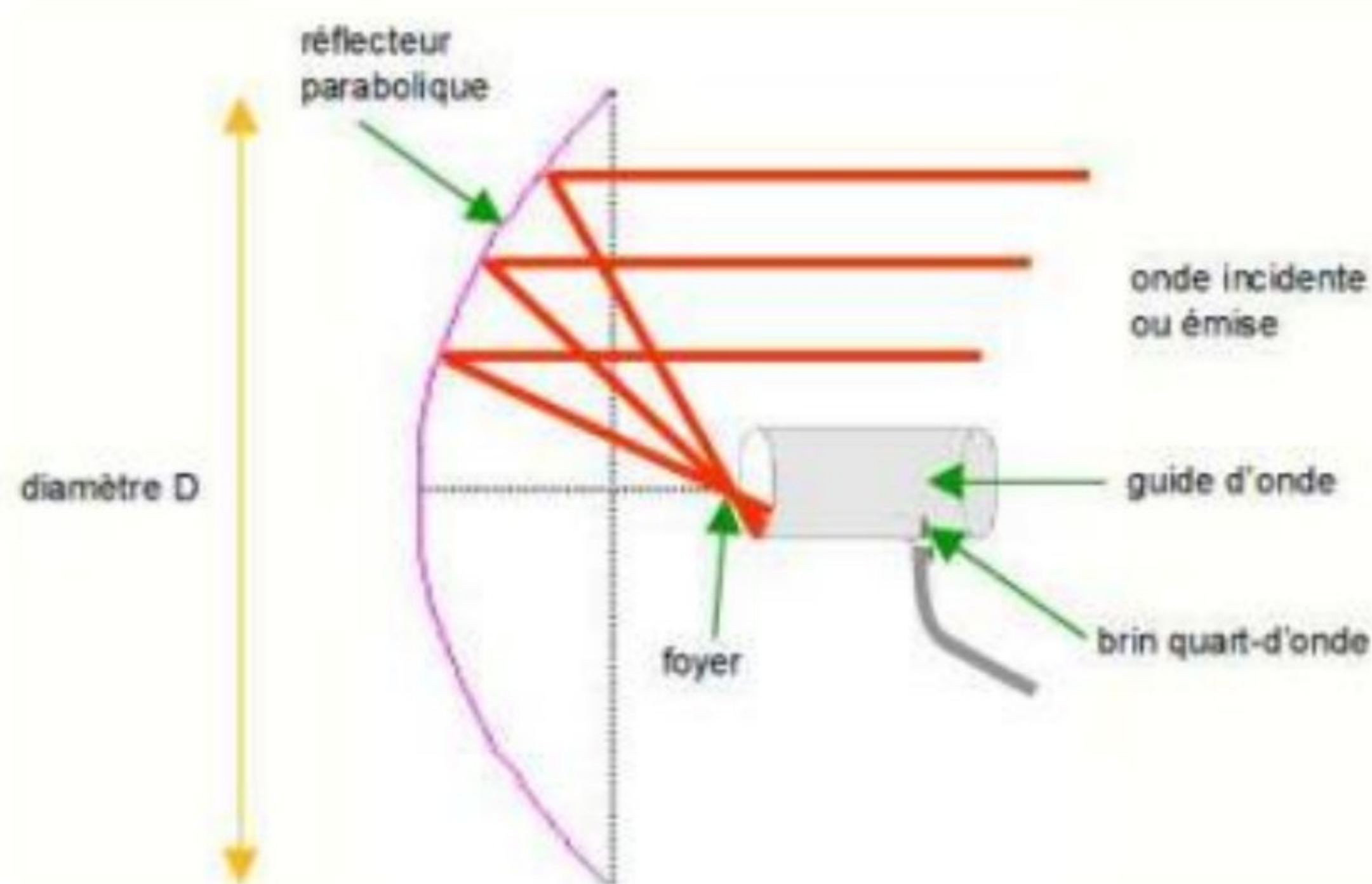


FIGURE 1.14. Schéma illustrant l'antenne parabolique

## 1.10 Polarisation d'une antenne – Perte de polarisation

### 1.10.1 Polarisation d'une antenne

La polarisation d'une onde dépend de la géométrie et de la polarisation électrique de l'antenne émettrice

En utilisant les propriétés de symétrie du champ électromagnétique :

- Le champ électrique est inscrit dans tout plan de symétrie, il est perpendiculaire à tout plan d'antisymétrie
- Le champ magnétique est inscrit dans tout plan d'antisymétrie, il est perpendiculaire à tout plan de symétrie
- Le champ électrique est nul en tout centre de symétrie, il est aligné le long de tout axe de symétrie



FIGURE 1.15. Plans de symétrie et d'antisymétrie

### 1.10.1.1 Perte de polarisation

Pour optimiser la réception d'un signal radioélectrique, la polarisation de l'onde électromagnétique et celle de l'antenne réceptrice doivent être . Dans le cas d'une liaison entre 2 antennes à polarisation rectiligne, la perte de polarisation dépend de l'angle  $\alpha$  entre les 2 antennes qui représente la différence d'alignement

$$L_{pol}(dB) = 20 \log(\cos \alpha) \tag{1.24}$$

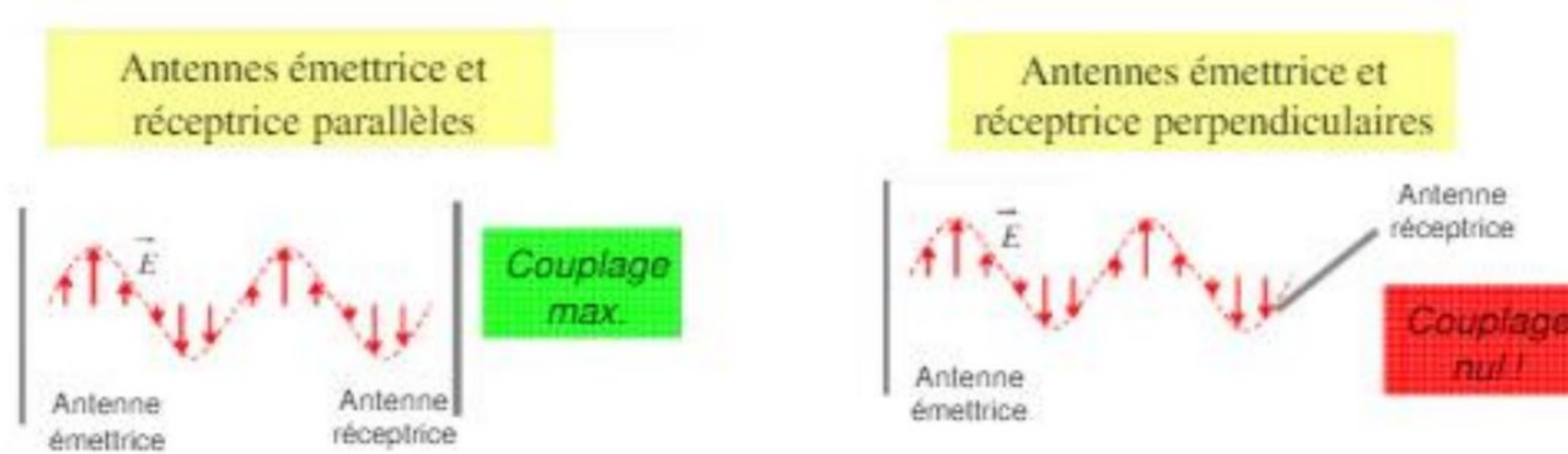


FIGURE 1.16. Pertes de polarisation

## 1.11 Technologie SIW

La technologie SIW est un aspirant émergent pour le progrès des antennes, des circuits et des composants permettant de créer un lien entre la technologie plane et non plane. La présente étude a pour objectif de fournir une impression et une exploitation de la conception d'antennes à base de guides d'ondes intégrés au substrat, soumises à différents structures, mécanismes d'alimentation et de performances.

## 1.12 Caractéristiques de propagation de la technologie SIW

Comme SIW hérite en grande partie des propriétés d'ondes métalliques, il existe une fréquence de coupure en dessous de laquelle il n'y a pas de propagation. Il peut être calculé pour le mode fondamental tel que décrit dans les équations ci-dessous qui traite des caractéristiques de dispersion de la structure de SIW [7].

$$f_{c10} = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}a_{eff}} = \frac{c}{2a} \quad (1.25)$$

Où

$$a_{eff} = \frac{a}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.26)$$

$$a_{eff} = a_{réel} - \frac{d^2}{0.95p} \quad (1.27)$$

Où

$$a_{réel} = a_{eff} + \frac{d^2}{0.95p} \quad (1.28)$$

Comme SIW hérite en grande partie des propriétés d'ondes métalliques, il existe une fréquence de coupure en dessous de laquelle il n'y a pas de propagation. Il peut être calculé pour le mode fondamental tel que décrit dans les équations ci-dessous qui traite des caractéristiques de dispersion de la structure de SIW.

$$a_{eff} = a_{réel} - 1.08 \frac{d^2}{p} + 0.1 \frac{d^2}{a_{réel}} \quad (1.29)$$

Pour concevoir une bonne structure SIW, il faut suivre quelques étapes de conception. Les paramètres nécessaires pour la conception du guide sont les suivants. Le diamètre  $D$  des vias, la distance  $b$  entre les vias. Les règles de conception sont :

$$D < \frac{\lambda_g}{5} \quad \text{et} \quad b \leq 2D$$

Où :  $\lambda_g$  est la longueur d'onde du guide

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{2\pi f^2 \epsilon_r}{c^2} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}} \quad (1.30)$$

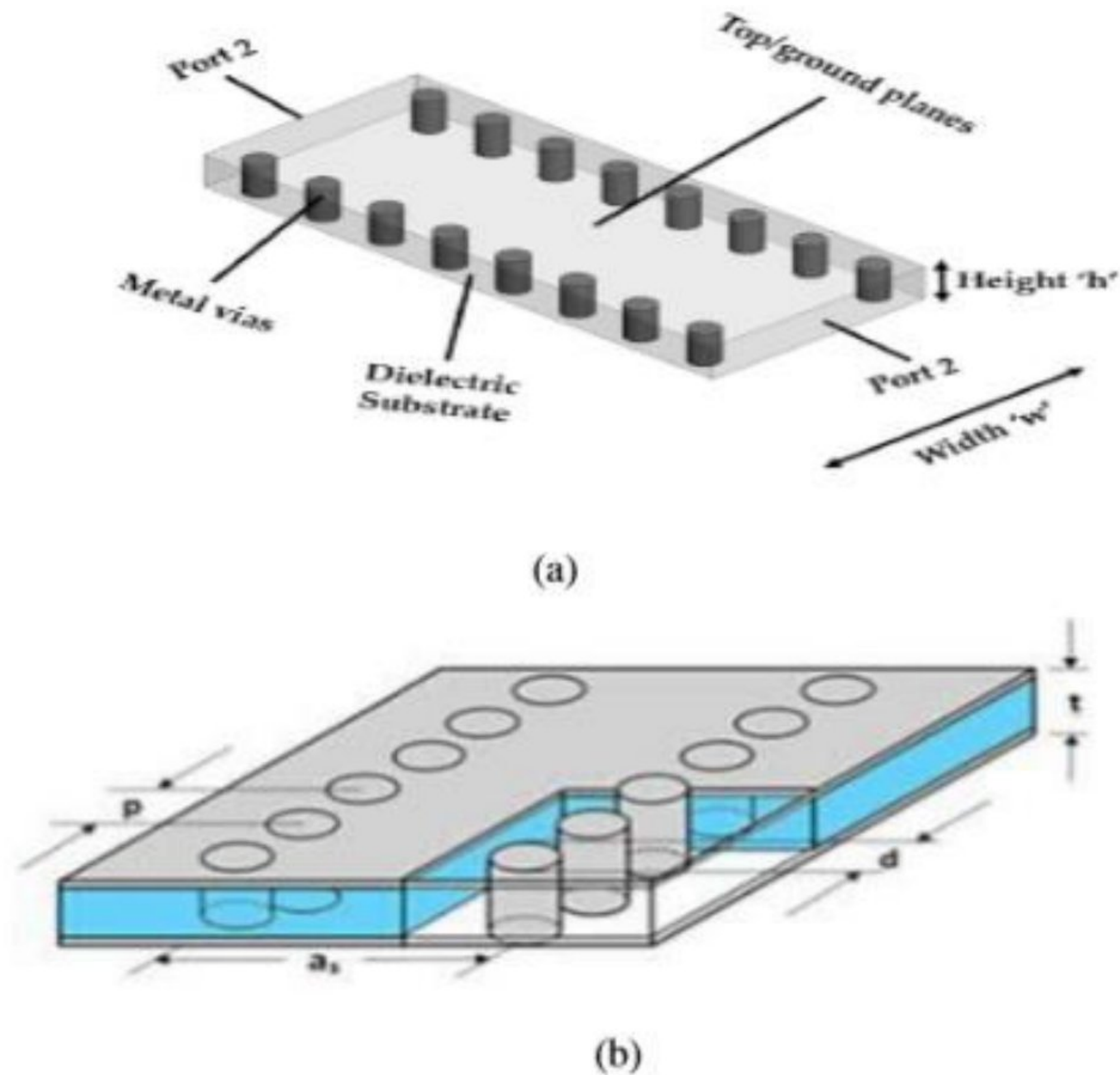


FIGURE 1.17. Structure d'un guide d'onde intégré au substrat

### 1.13 Domaines d'application

Application commerciales.

- Applications militaires.
- Pour les communications radiofréquences.
- Les communications micro-ondes.
- Les endroits fermés comme des tunnels.
- Domaine aéronautique.

### 1.14 Avantage et inconvénient

- Facile à construire.

- Moins cher que l'antenne V.
- Très simple, elle supporte une large bande.
- Comme un inconvénient, elle fournit des forts lobes mineurs.

## 1.15 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité les notions d'électromagnétisme et l'importance des équations de Maxwell pour la compréhension des phénomènes de propagation électromagnétique, les caractéristiques de base de toutes les antennes tel que l'impédance d'entrée, le diagramme de rayonnement, le gain, la polarisation... etc , qui devraient être acquises pour se lancer dans n'importe quel étude sur les antennes d'où leur importances, ces notions sont considérées comme fondamentales.

Une nouvelle technologie a été introduite en suivant, c'est la technologie SIW qui permet d'exploiter les propriétés de la propagation guidée pour transformer un substrat en un guide d'onde. De ce fait, il est important de comprendre le fondement théorique derrière ce phénomène physique.



# Antennes Multi-Input Multi-Output MIMO

## 2.1 Introduction

La communication sans fil de tous types a connu un grand essor durant ces dernières décennies. C'est le besoin de communiquer sur des distances de plus en plus importantes, avec une grande capacité de transfert des informations, qui a donné naissance aux nouvelles techniques de télécommunication dans lesquelles les antennes fixes sont regroupées en réseau.

L'antenne est un élément clé de la télécommunication terrestre et spatiale. C'est grâce à elle que l'énergie électrique se transforme en énergie électromagnétique rayonnée dans l'espace libre. Ainsi, la conception de l'antenne est différente d'un réseau à l'autre, elle se met en réseau afin d'avoir un gain plus élevé dans une direction privilégiée. La mise en réseau des antennes représente la solution pour de nombreuses applications qui exigent un diagramme de rayonnement particulier, comme le suivi des satellites et le balayage électronique. Pour une bonne compréhension du fonctionnement des antennes ainsi que les différentes mises en réseau, le deuxième chapitre aura pour but la présentation des caractéristiques radioélectriques et les différents réseaux d'antennes.

## 2.2 Réseau d'antennes

Le réseau d'antennes est la même antenne de base (antenne wireframes, cônes, patches...) ont la même orientation, selon la forme et la disposition données Excité par un système d'alimentation pour produire un rayonnement d'une forme spécifique. Le

rayonnement produit est la superposition de chaque rayonnement La puissance rayonnée est donc plus importante. Le diagramme de rayonnement de Le réseau d'antennes est plus étroit que l'antenne de base, sa directivité et son gain important aussi, c'est grâce à ces avantages que les systèmes de télécommunications récents Utiliser des réseaux d'antennes comme dispositifs d'émission et de réception [8, 9].

### 2.2.1 Facteur de réseau

Soit le réseau d'antennes à N éléments identiques et indépendants notés  $S_i$ , disposés sur une surface quelconque et espacés deux à deux avec une distance  $d$  appelée pas du réseau, tel que  $d$  est choisi de façon à éliminer le couplage électromagnétique entre eux

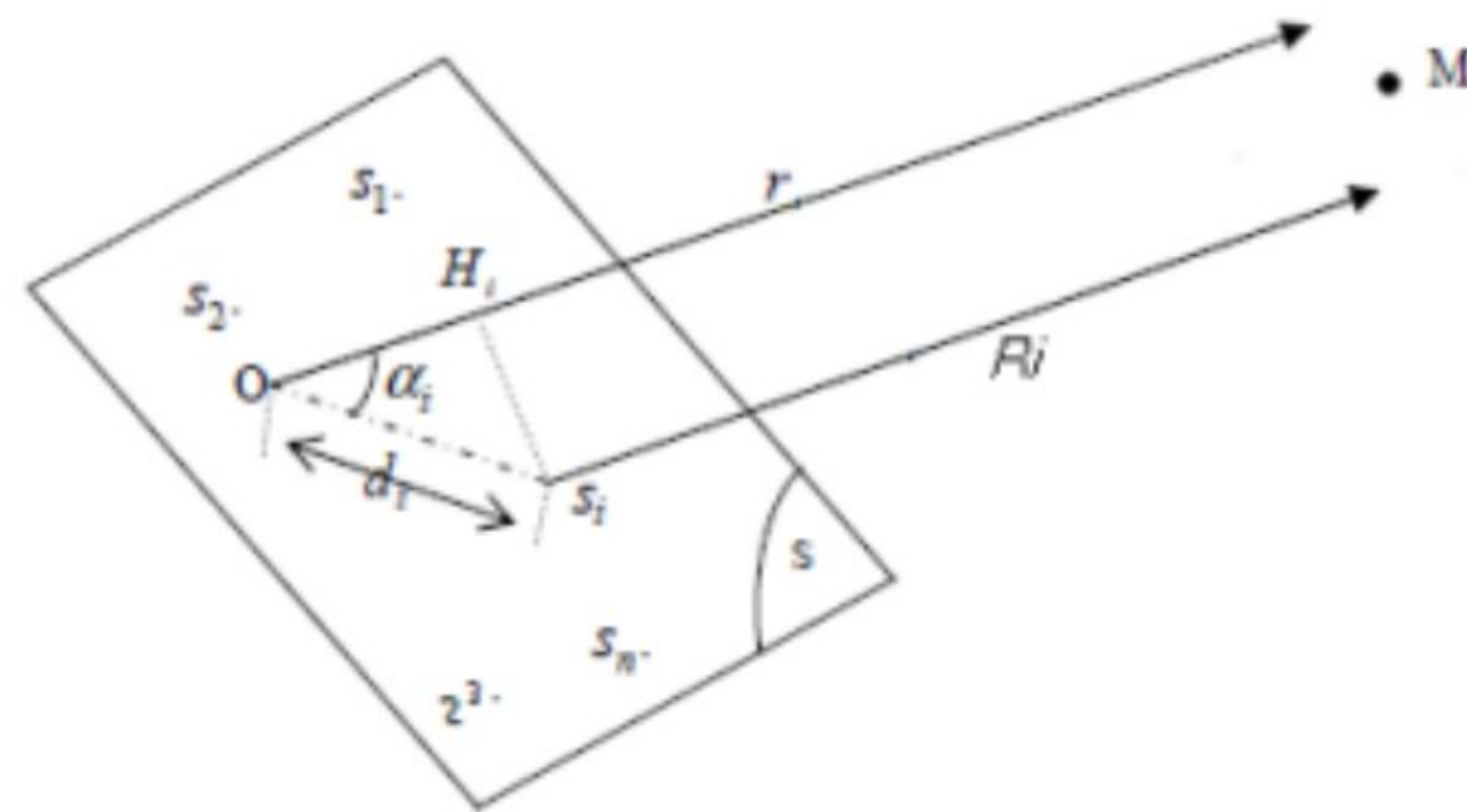


FIGURE 2.1. Géométrie d'un réseau d'antenne

où  $S_i$  est la source fondamentale d'ordre  $i$ .  $C_i e^{j\psi_i}$  Approvisionnement complexe des sources de commande Une génération  $i$ ,  $d_i$  entre l'origine et l'antenne  $i$ ,  $R_i$  La distance entre l'antenne  $i$  et le point M,  $r$  c'est-à-dire la distance entre l'origine et le point M,  $\alpha_i$  Angle d'élévation entre la surface  $R_i$  et l'orientation et  $f_i(\theta, \varphi)$

Le champ électrique créé par l'antenne  $i$  est donné par

$$E_i(r, \theta, \varphi) = f_i(\theta, \varphi) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (2.1)$$

Toutes les antennes sont physiquement identiques, elles ont le même diagramme vectoriel le rayonnement noté  $f(\theta, \varphi)$ . Ils ont une amplitude  $C_i$  et une phase  $\psi_i$ . La relation entre l'alimentation et le diagramme de rayonnement vectoriel est la suivante :

$$f_i(\theta, \varphi) = C_i e^{j\psi_i} e^{jk d_i U} f(\theta, \varphi) \quad (2.2)$$

Où :

- $k = 2\pi/\lambda$  est le nombre d'onde.
- $d_i$  est le vecteur position de la source  $i$  dans le repère.

Le champ total rayonné en un point M, éloigné dans l'espace, est la somme vectorielle des champs créés par chacune des antennes :

$$\begin{aligned}\vec{E}(r, \theta, \varphi) &= \sum_{i=1}^N \vec{E}_i(r, \theta, \varphi) \\ &= \sum_{i=1}^N \vec{f}_i(\theta, \varphi) \frac{e^{-jkR_i}}{4\pi R_i} \\ &= \sum_{i=1}^N C_i e^{j\psi_i} e^{jk\vec{d}_i \vec{U}} \frac{e^{-jkR_i}}{4\pi R_i} \vec{f}(\theta, \varphi)\end{aligned}\quad (2.3)$$

Le point M étant situé à grande distance, on peut écrire la relation entre les grandeurs géométriques comme suit :

$$R_i = r - \vec{d}_i \vec{U} \quad (2.4)$$

On remplace cette relation dans l'expression du champ électrique total :

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N C_i e^{j\psi_i} e^{jk\vec{d}_i \vec{U}} \frac{e^{-jk(r - \vec{d}_i \vec{U})}}{4\pi R_i} \vec{f}(\theta, \varphi) \quad (2.5)$$

Puisque la fonction  $1/R_i$  varie moins vite que la fonction  $e^{-jk(r - \vec{d}_i \vec{U})}$ , ceci nous permet d'écrire

$$\frac{e^{-jk(r - \vec{d}_i \vec{U})}}{4\pi R_i} = \frac{e^{-jk(r - \vec{d}_i \vec{U})}}{4\pi r} \quad (2.6)$$

l'expression du champ électrique total est

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi) = \frac{\vec{f}(\theta, \varphi)}{4\pi r} e^{-jkr} \sum_{i=1}^N C_i e^{j(\psi_i + k\vec{d}_i \vec{U})} \quad (2.7)$$

## 2.2.2 Champ électrique total

C'est le produit de deux facteurs :

- **Le facteur d'élément (noté EF)**; qui exprime la contribution d'un seul élément rayonnant, au diagramme de rayonnement. Habituellement le terme  $e^{-jkr}$  est éliminé parce que la description du diagramme de rayonnement s'effectue dans une sphère normalisée de rayon égal à l'unité.
- **Le facteur de réseau (noté AF)**; ce terme est fonction uniquement des coefficients d'alimentation et des positions des éléments rayonnants. Il traduit l'effet de la mise

en réseau de plusieurs antennes sur le diagramme de rayonnement total. En effet, les facteurs qui contribuent à la formation du diagramme de rayonnement du réseau sont l'espacement entre les sources ainsi que la phase et l'amplitude de l'excitation.

Le diagramme de rayonnement d'un réseau est alors le produit du diagramme de rayonnement d'un élément isolé par le facteur de réseau. La forme du facteur de réseau peut se simplifier par le choix du plan et de la configuration géométrique du réseau.

### 2.2.3 Types de réseaux d'antennes

Le gain et la directivité d'une antenne élémentaire telle que le dipôle ou les antennes imprimées sont assez faibles car le rayonnement est très peu directif, ces antennes ne répondent pas toujours aux exigences de certaines applications. Leur association crée un réseau dont la particularité est d'avoir un gain plus élevé dans une direction privilégiée puisque la taille électrique globale de l'antenne est augmentée. Les réseaux possèdent surtout l'avantage de pouvoir effectuer un balayage électronique du faisceau rayonné. On peut donc, par commande électronique, pointer successivement plusieurs directions ou modeler de manière dynamique le diagramme de rayonnement [10].

Il existe plusieurs configurations géométriques des réseaux d'antennes que l'on peut regrouper comme suit : réseau linéaire, réseau circulaire, réseau planaire (forme rectangulaire ou circulaire) et réseau volumique 2.2.

#### 2.2.3.1 Réseaux linéaires

Un réseau linéaire est un réseau où les sources sont alignées le long d'une ligne droite et espacées d'une distance constante  $d$  2.2(a). Dans ce cas, les propriétés de la mise en réseau apparaissent dans le plan contenant les sources et la normale aux sources élémentaires, soit pour  $\varphi = 0$  dans le repère choisi; l'étude se limite généralement à ce plan et l'expression du facteur de réseau se simplifie alors comme suit

$$\vec{d}_i \vec{U} = d_i \sin \theta \cos \varphi \quad (2.8)$$

$$\varphi = 0 \quad (2.9)$$

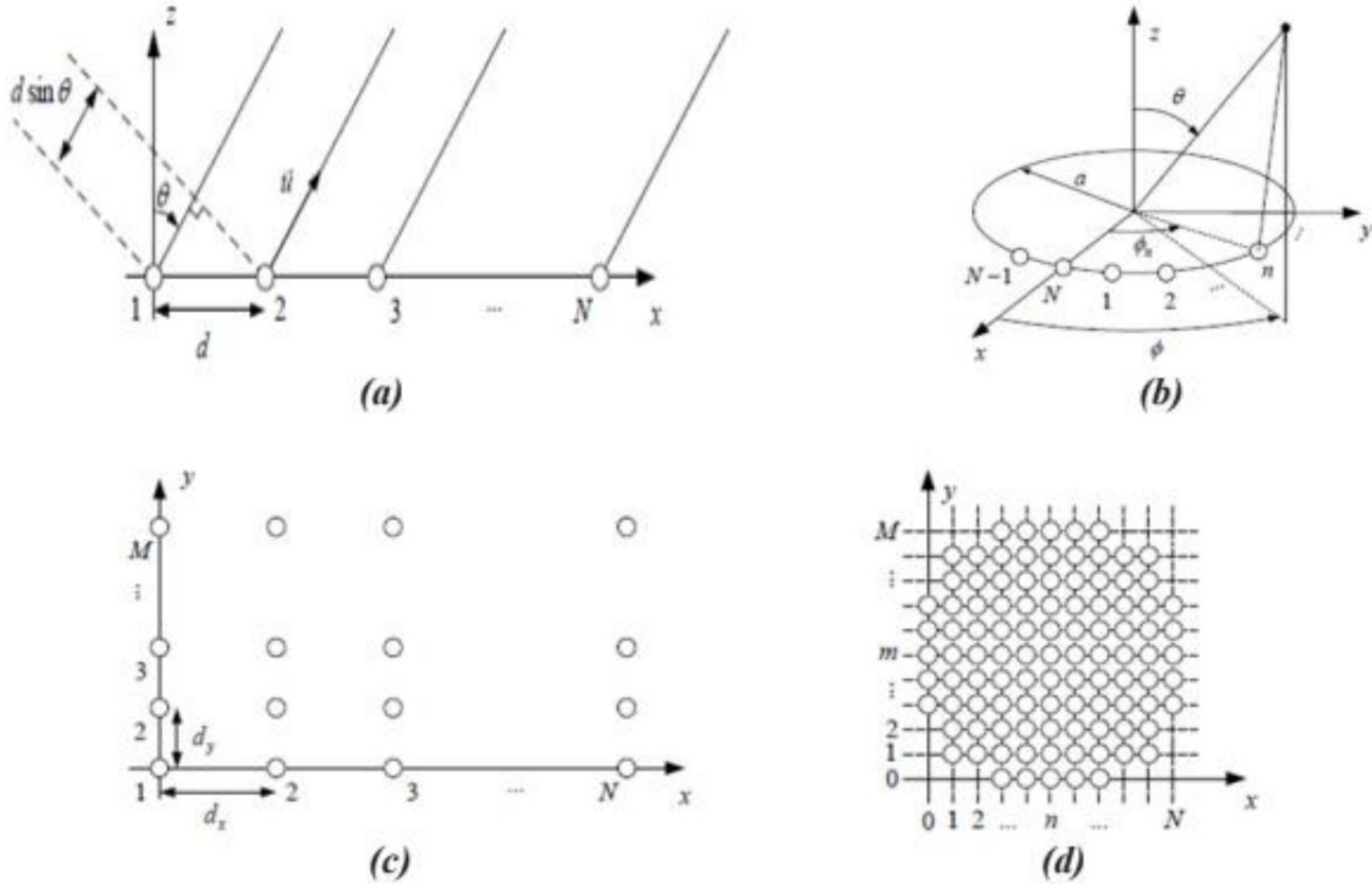


FIGURE 2.2. Géométries d'un réseau d'antennes. (a)-linéaire (b)-circulaire (c)-planaire (d)-volumique

$$d_i = (i - 1)d \quad (2.10)$$

$$\vec{d}_i \vec{U} = (i - 1)d \sin \theta \quad (2.11)$$

L'expression du facteur de réseau

$$AF(\theta) = \sum_{i=1}^N C_i e^{j(\psi_i + (i-1)kd \sin \theta)} \quad (2.12)$$

D'après la relation 2.12, le facteur de réseau est une somme de nombres complexes, il est donc maximal (en valeur absolue) dans une direction donnée lorsque tous les termes sont en phase dans cette direction, et peut être nul dans une autre direction ou les termes sont déphasés. Pour cela, une loi d'alimentation est utilisée pour alimenter le réseau d'antennes. La loi d'alimentation peut être soit une loi d'amplitude où les amplitudes des excitations suivent.

Le gain de réseau est l'un des critères les plus sensibles dans le choix de la loi d'alimentation. Plus généralement le gain de réseau peut s'écrire :

$$C_r(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left[ \frac{(\sum_{i=1}^N C_i)^2}{\sum_{i=1}^N C_i^2} \right] \quad (2.13)$$

La figure 2.3 nous montre la variation du gain de réseau en fonction du nombre d'éléments rayonnants pour une loi d'excitation uniforme et pour une loi d'excitation binomiale. Le gain de réseau est maximal pour le cas d'une excitation uniforme, on constate une baisse du gain pour l'excitation binomiale

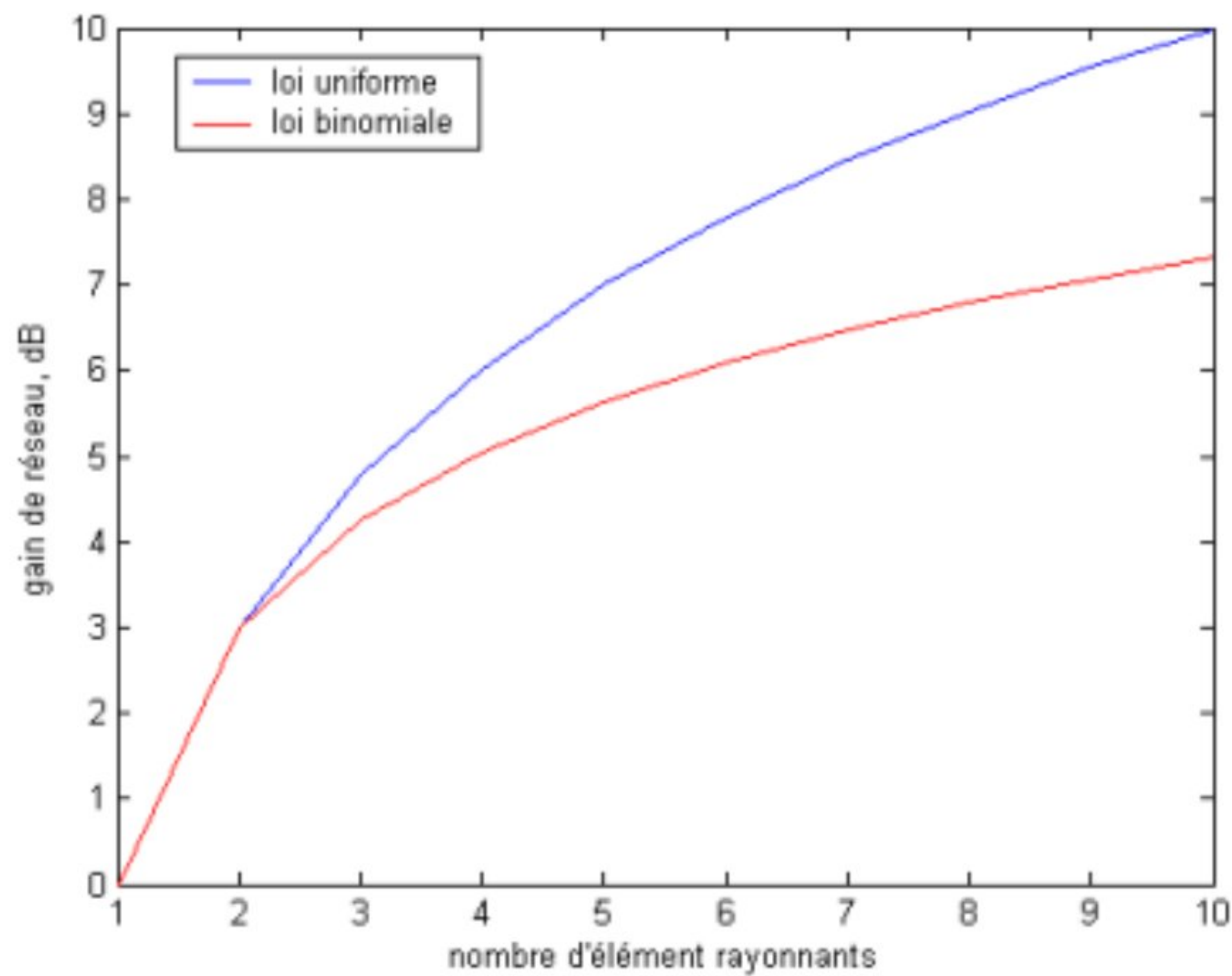


FIGURE 2.3. Gain de réseau en fonction du nombre d'éléments rayonnants

### 2.2.3.2 Réseaux circulaires

Un réseau avec un réseau circulaire et un réseau d'éléments rayonnants répartis sur l'ensemble du réseau Circonférentielle et équidistante 2.2(b). Le plan où se trouve l'analyse de réseau limite est le plan horizontal, qui est caractérisé par des coordonnées polaires. Allons-y Suivez une approche de type réseau linéaire pour trouver la forme des facteurs réseau [11, 12].

Deux éléments rayonnants consécutifs  $i$  et  $i + 1$  du réseau sont séparés par la même distance, où les positions angulaires sont éléments rayonnants  $i$  et  $i + 1$ . Car quel que soit  $i$ , où  $a$  est le rayon du cercle, le produit scalaire s'écrit dans un plan caractérisé par un angle d'azimut de la forme

$$\vec{d}_i \cdot \vec{U} = a \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_i) \quad (2.14)$$

L'expression générale du facteur de réseau devient alors

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N C_i e^{j(\psi_i + ka \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_i))} \quad (2.15)$$

Le lobe principal du diagramme de rayonnement du réseau peut être focalisé dans la direction souhaitée de la phase  $(\theta_0, \varphi_0)$  en appliquant la puissance à chaque source est :

$$\psi_i = -ka \sin \theta_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_i) \quad (2.16)$$

### 2.2.3.3 Réseaux planaires

Un réseau planaire est un arrangement d'antennes dans un plan. Il existe deux formes Réseau plat [13, 14] : Le réseau plan rectangulaire est une généralisation du plan du réseau linéaire. Le cas le plus simple à mettre en équation correspond à un réseau selon une grille rectangulaire d'éléments rayonnants. Il en va de même pour l'espacement des réseaux rectangulaires Les résultats obtenus peuvent être différents selon les deux axes principaux du réseau, comme le montre la figure 2.2(c). Le facteur de réseau s'écrit

$$f(u, v) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M C_n m e^{j\psi_{nm}} e^{j(k(n-1)d_x u + k(m-1)d_y v)} \quad (2.17)$$

Un réseau planaire de forme circulaire est une configuration intéressante car il permet la distribution azimutale des lobes secondaires, réduisant ainsi le niveau. au contraire, La formule pour ces réseaux est un peu plus compliquée car il n'est plus possible de séparer les deux axes comme dans une configuration rectangulaire. en cas de grille rectangle,

### 2.2.3.4 Autres types de réseau d'antennes

Outre les réseaux d'antennes présentés précédemment il existe d'autres configurations de réseaux d'antennes qui sont généralement développées à partir de la structure planaire. L'objectif de ces configurations est souvent de réduire les niveaux des lobes secondaires et/ou l'amélioration du lobe principal (une bonne focalisation), ainsi que

l'amélioration de la couverture de l'espace entouré. Parmi ces configurations, on trouve les réseaux multisurfaces dans lesquels un polyèdre est couvert par des réseaux d'antennes planaires. Le polyèdre peut être un parallélépipède, un cylindre, une hémisphère ou une pyramide. Les dimensions des réseaux planaires multisurfaces sont généralement grandes et les lois d'alimentations nécessitent parfois des processus d'optimisation pour réduire les interférences entre les lobes, ce qui limite l'utilisation de ces réseaux aux secteurs spatial et militaire .

#### 2.2.4 Alimentation d'un réseau d'antennes

La synthèse d'un réseau consiste à trouver les bons coefficients de pondération en amplitude et/ou en phase qui permettent d'approcher au mieux le besoin. Pour cela, l'alimentation d'un réseau d'antennes s'effectue à travers un réseau d'alimentation qui assure la répartition d'énergie sur différentes antennes élémentaires. Selon le besoin, le réseau d'excitation peut avoir des architectures différentes. Dans le cas d'un réseau d'antennes patch, le principe de la répartition d'énergie se fait par des lignes microrubans, où les déphaseurs, les diviseurs et les combineurs de puissance sont réalisés par des lignes microruban. Nous montrons sur la figure II.16 deux types d'alimentations d'un réseau d'antennes.

- **Alimentation série** : les éléments rayonnants sont excités en série à travers une ligne de transmission. Entre deux éléments rayonnants consécutifs il y a un déphaseur qui permet d'imposer la loi de phase appropriée 2.4(a).
- **Alimentation parallèle** : le circuit d'alimentation possède une entrée et plusieurs sorties égales aux nombres des éléments rayonnants. La synthèse du réseau permet de déterminer les coefficients de pondération et les déphasages des signaux à affecter à chaque élément 2.4(b).

Le problème de synthèse doit répondre aux contraintes de rayonnement, surtout la réduction des lobes secondaires et l'amélioration du lobe principal. Pour cela, il existe diverses lois d'alimentation en amplitude d'un réseau d'antennes, telles que celles données par :



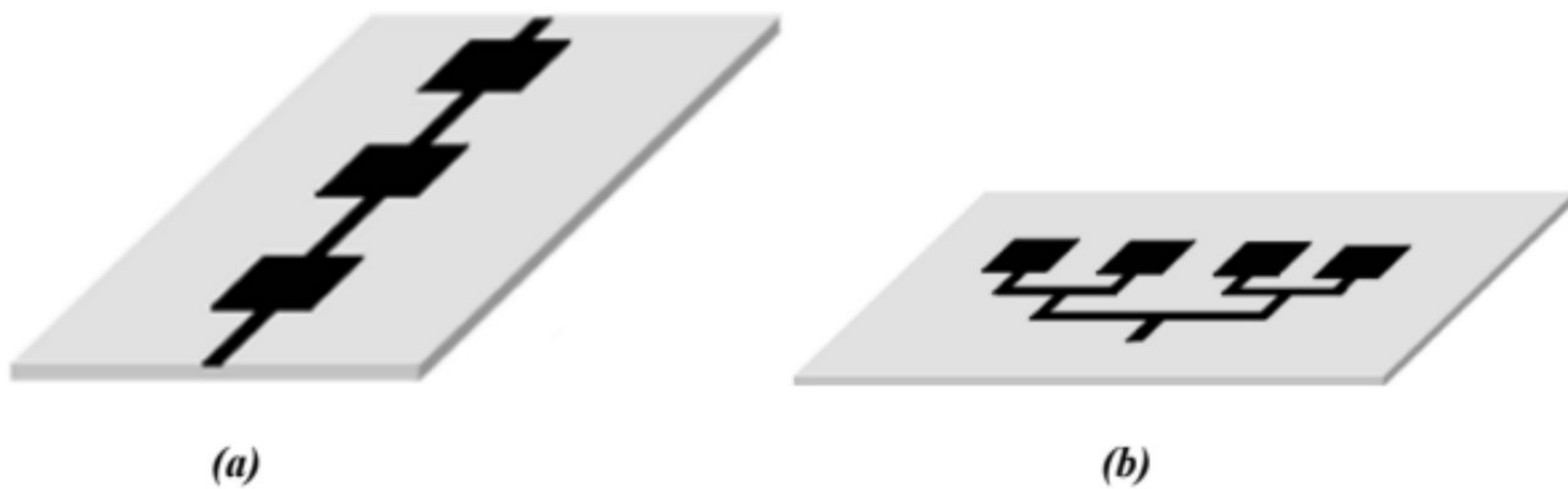


FIGURE 2.4. Alimentation d'un réseau d'antennes patch (a)-série (b)-parallèle

## 2.3 Domaines d'applications des réseaux d'antennes

Pour que la communication entre deux points distants puisse être effectuée et pour que le récepteur puisse distinguer le signal émis du bruit, les réseaux d'antennes, et grâce à leur robustesse par rapport à une antenne élémentaire, sont utilisés dans plusieurs applications [15, 16] :

- Télécommunication :
  - Téléphonie mobile (terminaux portatifs GSM, DCS, PCS, etc.)
  - Antennes sur stations de bases
- Satellites :
  - Télévision directe domestique ou embarquée sur véhicules.
  - Réseaux à faisceaux commutés à couverture reconfigurable.
  - Systèmes de radiolocalisation par GPS, Galileo, Glonass
- Aéronautique :
  - Communication, navigation, altimètres, systèmes d'atterrissages.
  - Radars de poursuite monopulse ou synchrone.

### 2.3.1 Systèmes MIMO

Chaque jour, la plupart des objets de communication sans fil sont utilisés dans l'environnement dans lequel la station de base est éloignée de l'unité mobile. Cette situation conduit, par conséquent, à différents types de transmissions soumis à l'environnement à trajets multiples. Moyens de lutte contre le phénomène d'évanouissement du signal Cela permet

d'améliorer les performances dans ces environnements multi-trajets Les liaisons sans fil dans des environnements difficiles utilisent les techniques MIMO et de diversité spatiale. Dans cette partie nous verrons mieux l'intérêt des systèmes et techniques MIMO diversité spatiale

Système MIMO basé sur la multiplication d'antennes Contrairement aux systèmes de réception et SISO (il y a une antenne à chaque extrémité du lien RF), SIMO (une antenne d'émission, plusieurs antennes de réception) et MISO (plusieurs Une antenne d'émission, une antenne de réception. Les systèmes MIMO introduisent une nouvelle forme de diversité appelée Diversité spatiale. La technologie est conçue pour exploiter le phénomène de décoloration et les trajets multiples, longtemps considérés comme un obstacle. En effet, le récepteur Recevez et combinez plusieurs copies du même signal envoyé à partir de plusieurs Antenne et expérience de décoloration indépendante. Par conséquent, le récepteur Prendre la bonne décision pour reconstituer correctement le message original. exister En résumé, l'utilisation de plusieurs antennes dans un système MIMO peut être utilisée pour Améliorer la fiabilité de la transmission en réduisant la probabilité d'erreur Et augmenter le débit de transmission (gain de multiplexage) .

L'idée de base du système MIMO est relativement simple : dans une bande de fréquence Pour une fréquence donnée, les informations sont transmises simultanément à l'aide de plusieurs antennes Concernant l'émission et la réception. En première approximation, le débit transmis dans cette bande de fréquence est multiplié par le nombre d'antennes d'émission. Cette En revanche, la mise en œuvre spécifique pose des problèmes complexes : en effet, tout Le signal de transmission se mélange et doit pouvoir séparer les éléments du mélange. Ensuite, nous devons faire appel à des traitements sophistiqués du côté du receveur Signal

### 2.3.2 Principe de l'antenne MIMO

Signal radiofréquence , à c entreprendre le chemin entre l'émetteur et le récepteur peut Diverses formes d'interférences (évanouissement ou évanouissement, décalage temporel ou de fréquence) sont rencontrées en raison des trajets multiples. Contrairement aux systèmes traditionnels, les systèmes de diversité tirent parti de ces types de spreads pour améliorer les performances du système.

Dans la transmission radiofréquence, la diversité est utilisée pour lutter contre la perte de propagation des ondes (évanouissement) dans le canal de propagation. Pour ce faire,

plusieurs copies du même signal sont envoyées indépendamment au récepteur, Réduisant ainsi la possibilité d'atténuation simultanée du signal de transmission. Il permet de lutter contre les évanouissements et les interférences du signal références entre canaux transmission augmentant ainsi l'efficacité de la liaison radio. nous pouvons distinguer Quatre formes de diversité

### 2.3.2.1 Diversité spatiale

Il consiste à envoyer simultanément et indépendamment le même message à Via plusieurs antennes sur l'émetteur. Nous cherchons à minimiser la corrélation entre les signaux transmis pour introduire des phénomènes de chemin de nombreux. Les antennes doivent respecter la distance de cohérence pour réduire la corrélation entre les signaux et profiter des phénomènes de diversité spatiale

### 2.3.2.2 Diversité de polarisation

Semblable à la diversité spatiale, le même signal est transmis à l'aide de plusieurs antennes de polarisations différentes, principalement des polarisations verticales et horizontales

### 2.3.2.3 Diversité temporelle

Il fonctionne avec des canaux de sélection de temps. Il comprend l'émission de plusieurs Signaux dupliqués (ou versions redondantes) au moins espacés Soustrayez le temps de cohérence du canal  $T_c$ . Habituellement, la diversité temporelle est utilisée Avec entrelacement et codage de correction d'erreurs. L'inconvénient de la diversité temporelle est évidemment le retard causé par la diversité, qui réduit le débit de transmission.

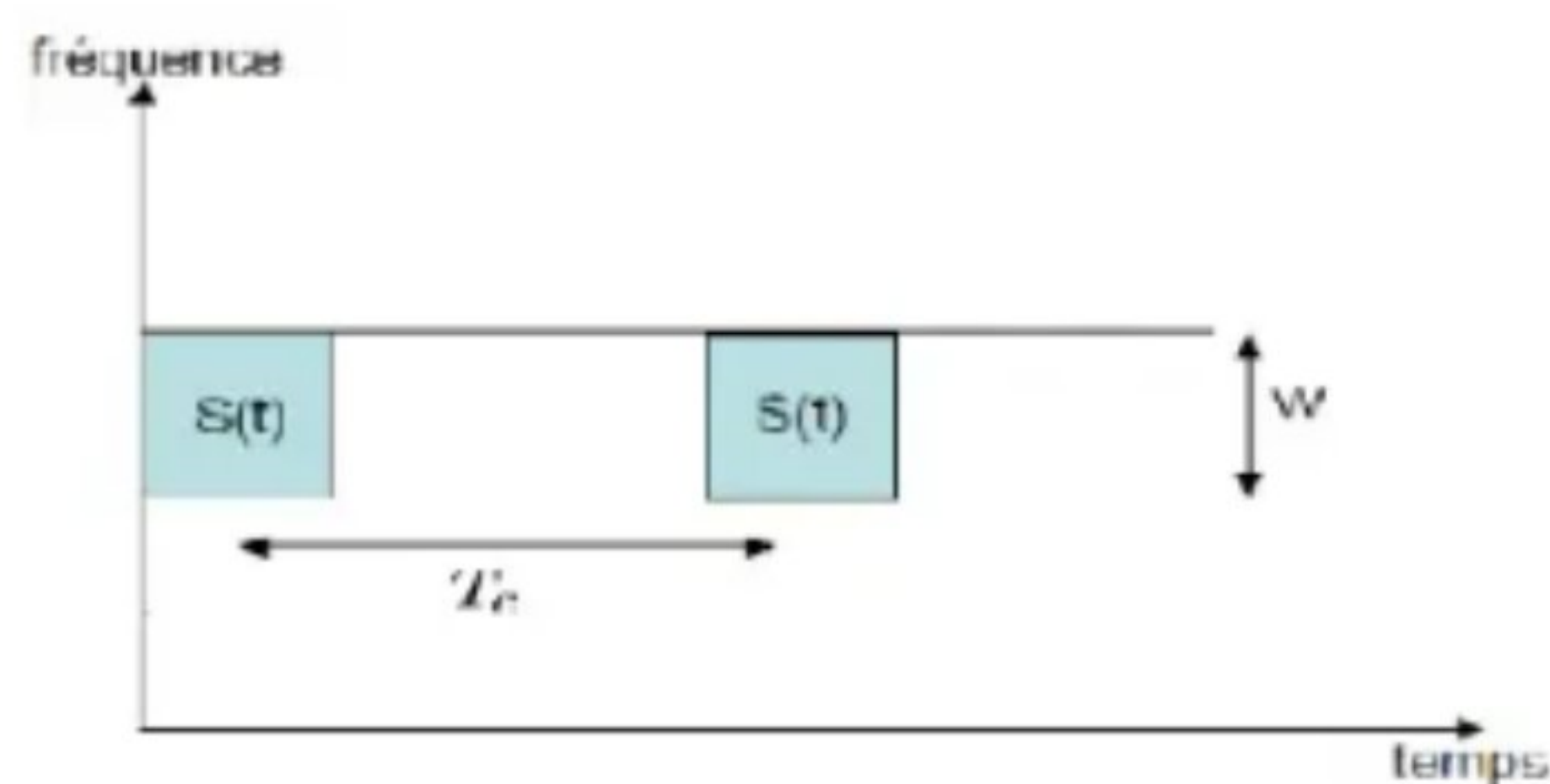


FIGURE 2.5. Diversité temporelle

### 2.3.2.4 Diversité de fréquence

Il peut être obtenu lorsque le canal est sélectif en fréquence. Pour ça, l'émetteur transmet le même signal (version redondante) sur plusieurs fréquences porteuses séparées par au moins la bande de fréquence cohérente  $B_c$  du canal [18].



FIGURE 2.6. Diversité fréquentielle

## 2.3.3 Différentes catégories de MIMO

Trois types de MIMO peuvent être considérés [17] :

### 2.3.3.1 Diversité spatiale MIMO :

Aussi connu sous le nom de diversité d'antenne, y compris l'envoi du même message sur différentes antennes simultanément pour afficher. Les signaux reçus au niveau de chaque antenne de réception sont alors remis en phase et sommés de manière cohérente. Cela augmente le rapport Le rapport signal sur bruit de la transmission (en raison du gain de diversité). Pour que cette technique soit efficace, les sous-canaux MIMO doivent être décorrélés entre eux.

### 2.3.3.2 Multiplexage Spatial MIMO :

Chaque message est découpé en sous-messages. Différents sous-messages sont transmis simultanément sur chaque antenne d'émission. Les signaux reçus à l'antenne de réception sont recombinaés pour reconstruire le message d'origine. Comme pour la diversité MIMO, les sous-canaux de propagation doivent être décorrélés. Le multiplexage MIMO permet d'augmenter le débit de transmission (grâce au gain de multiplexage). Les techniques de diversité et de multiplexage MIMO peuvent être appliquées ensemble. Par

exemple, pour un système MIMO 5 x 5 (c'est-à-dire 5 antennes d'émission et 5 antennes de réception), vous pouvez configurer un sous-système MIMO 2 x 2 pour le multiplexage et un sous-système MIMO 3 x 3 pour la diversité MIMO.

### 2.3.3.3 MIMO - Beamforming :

Les réseaux d'antennes MIMO sont utilisés pour orienter et orienter les faisceaux radio. La technologie Beamforming peut à la fois étendre la couverture radio (comme à partir des stations de base ou des points d'accès) et limiter les interférences entre les utilisateurs et la pollution électromagnétique environnante (en ciblant un récepteur cible)

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les antennes, en nous concentrant sur les antennes imprimées et leurs réseaux. Nous nous sommes d'abord penchés sur les caractéristiques radio de l'antenne, qui jouent un rôle très important dans le choix de celle qui répond aux besoins. Ensuite, pour la deuxième fois, nous avons vu les antennes patch, leur construction, leur fonctionnement, leurs avantages et leurs inconvénients. Grâce à l'analyse d'une antenne patch rectangulaire fonctionnant à 2,45GHz, nous montrons la relation entre les caractéristiques radio et la géométrie de l'antenne et l'emplacement du point d'excitation. Nous avons constaté que la combinaison d'antennes dans le réseau améliorerait considérablement les caractéristiques de rayonnement. Nous avons également remarqué que l'on peut répartir l'énergie rayonnée vers une direction privilégiée par le choix approprié d'une loi d'alimentation en amplitude et/ou en phase.

## Conception et Simulation d'antennes SIW

### 3.1 Introduction

Ce chapitre nous allons le consacrer uniquement pour la présentation du logiciel HFSS (High Fréquence Structure Simulator), ses fonctionnalités et présenter de façon générale le rôle de chaque fonction que nous allons utiliser pour réaliser nos simulations. Et aussi s'accrocher sur les étapes à suivre pour créer un projet; vu que leur hiérarchie est très importante pour obtenir des résultats.

### 3.2 Logiciel de simulation HFSS

Le logiciel HFSS (High Fréquences Structure Simulator) est un outil performant à onde électromagnétique Commercial qui fait la simulation du champ d'un model arbitraires en 3D. Il intègre la simulation, visualisation, modélisation des solides, et l'automatisation dans un environnement facile à utiliser où les solutions des problèmes EM 3D sont obtenues rapidement et avec précision. HFSS emploie la méthode des éléments finis (FEM), Ansoft HFSS peut être utilisé pour calculer des paramètres tels que Paramètres S, fréquence de résonance, et des champs électriques et magnétiques En champ proche comme en champ lointain. Qu'est ce que nous donne HFSS? Prototypes virtuel et rapide Structures Arbitraire en 3D Plusieurs ports / Modes multiples Supporte tous les matériaux à micro-ondes Calcul des paramètres S, Y, Z

### 3.2.1 Description générale des outils HFSS

La figure 3.1 illustre l'interface principale du logiciel HFSS. Elle regroupe toutes les fonctionnalités de ce logiciel pour l'insertion des structures, sa configuration, son analyse et le rapport des résultats demandés.

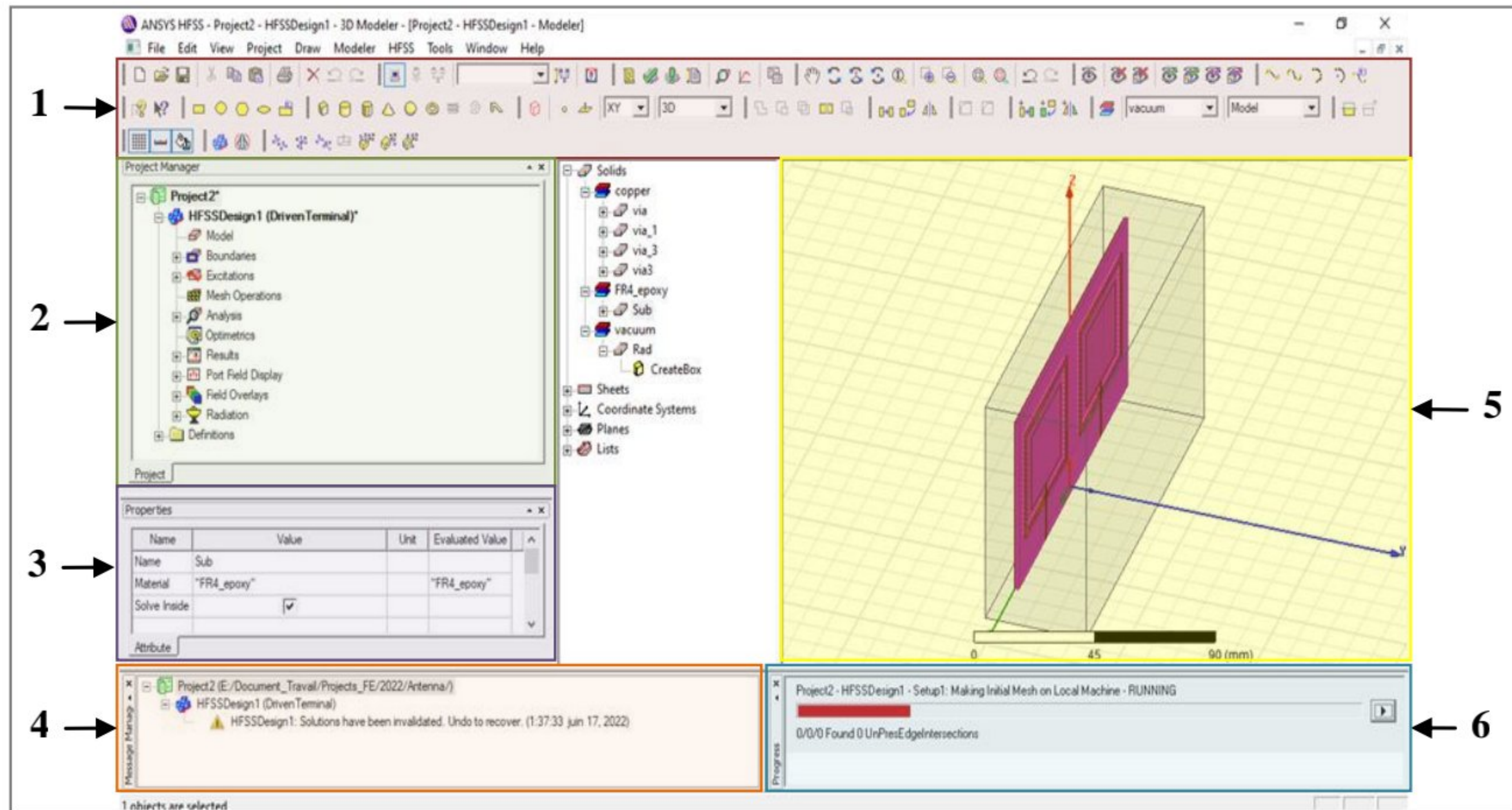


FIGURE 3.1. fenetre 3D

Cette interface (Figure 3.1) comporte les fenêtres suivantes :

- Barre des outils (1) : regroupe tous les outils pour créer une structure.
  - Insertion du dessin.
  - 3D Modeler Draw et View.
  - Rotation et zoom du model..etc.
- Gestion du projet (2) : une arborescence pour configurer le projet, en manipulant :
  - Les boundaries et les excitations
  - L'analyse
  - Les resultats ..etc.
- Propriétés (3) : changer les paramètres des objets dans une structure.
- Gestion du message (4) : afficher les messages relatifs à l'analyse et aux erreurs commises lors de la conception d'une structure.







FIGURE 3.3. Choix du type de la solution

- **Driven Terminal** : calcule des paramètres S de ports multiconducteurs de la ligne de transmission. Les solutions de la matrice S seront exprimées en termes de tensions et des courants.
- **Eignemode** : calcule des modes propres, ou de résonances d'une structure. La solution des modes propre retourne les fréquences de résonance de la structure et les champs à ses fréquences de résonance.

### 3.2.2.3 Boxe de radiation

L'insertion d'une boxe de radiation joue un rôle très important. Cela permet au logiciel d'étudier la propagation électromagnétique dans un espace bien déterminé. Généralement, tous les éléments intervenant à la radiation EM doivent être à l'intérieure de l'espace de radiation. La figure 3.4 montre un exemple d'une boxe de radiation.

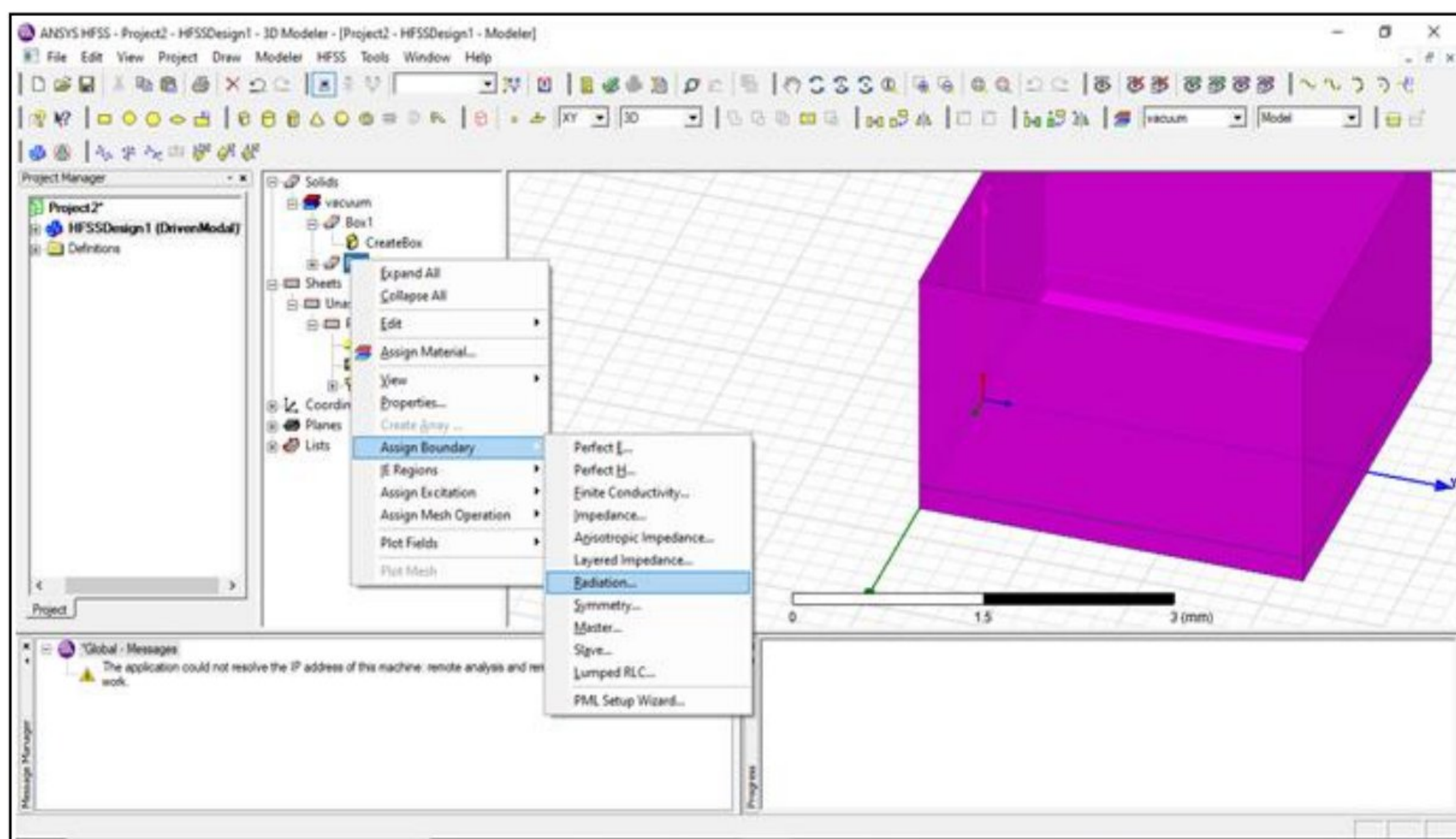


FIGURE 3.4. Boxe de radiation

### 3.2.2.4 Assignement des excitations

Pour commencer l'analyse de la structure selon la solution demandée, nous devons configurer une source d'excitation (configuration du port). Le HFSS incorpore trois types d'excitation : Wave port; Lumped port et Floquet port. Dans notre travail nous avons utilisé un Lumped port (Figure 3.5).

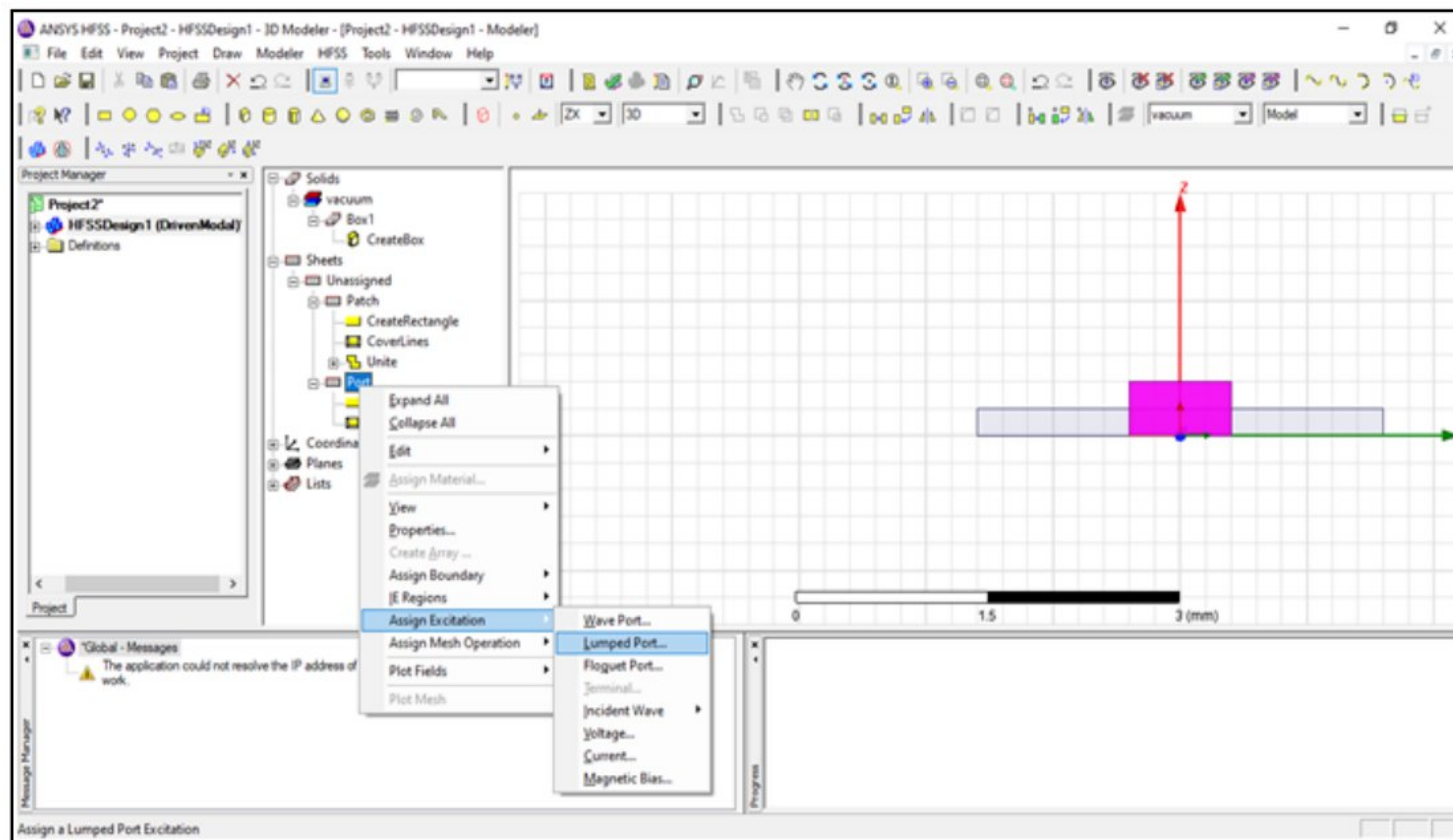


FIGURE 3.5. Configuration d'excitation

### 3.2.3 Validation de la conception

Pour vérifier que la structure proposée ne contient pas d'erreurs de conception, une étape de validation est nécessaire. Cette opération est effectuée grâce à la commande "**HFSS/Validation Check**". La figure 3.6 illustre l'étape de validation de la structure.

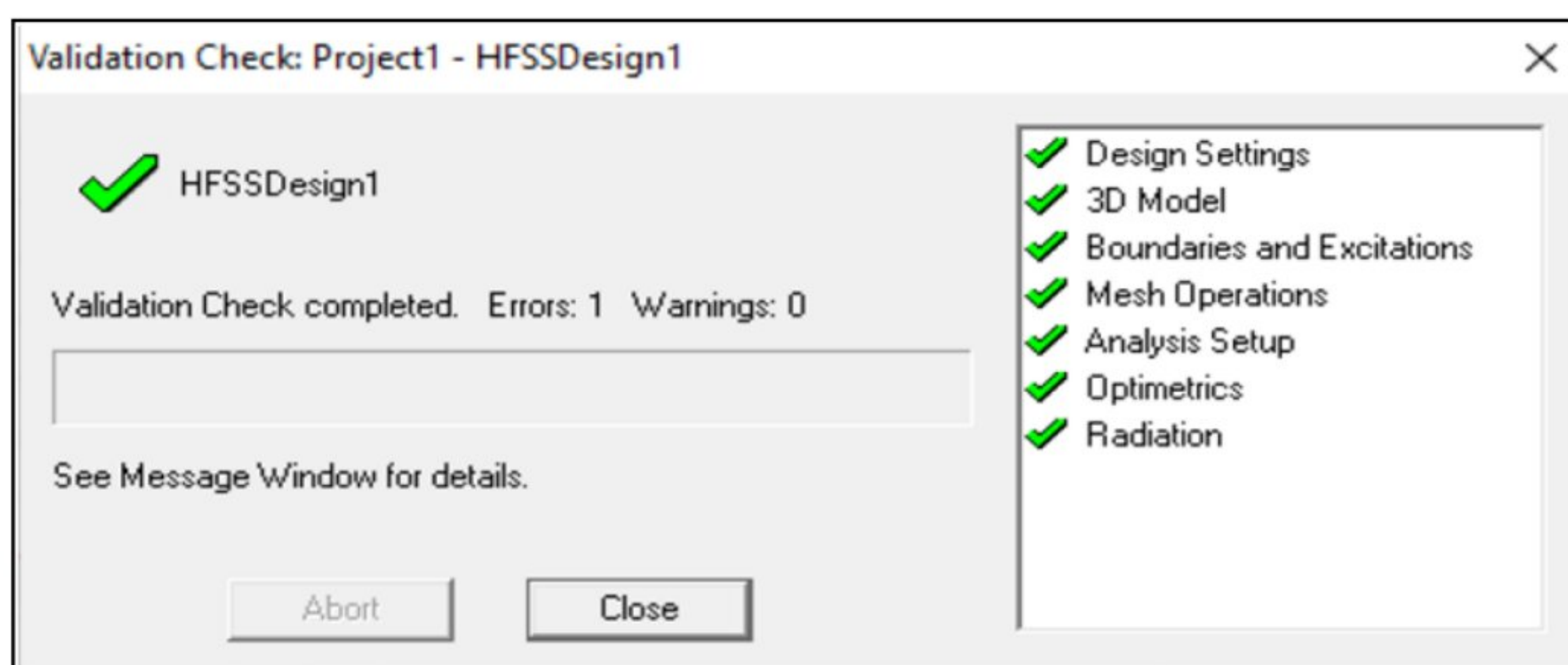


FIGURE 3.6. Validation d'une structure

### 3.2.4 Analyse de la conception

Si l'étape de validation est effectuée sans erreurs, une étape d'analyse sera nécessaire. Cette étape permet de mesurer le comportement électromagnétique de la structure proposée. Elle est effectuée en exécutant la commande "**HFSS/Analyze ALL**". Pour que la solution converge, l'analyse prend un temps important en fonction du matériel utilisé. A la fin de cette étape, il est possible de créer le rapport des résultats pour mesurer le comportement de la structure. Dans notre cas, nous avons obtenu pour mesurer : le paramètre S, le diagramme de rayonnement, la distribution du champ électrique, le gain et la directivité de l'antenne.

### 3.2.5 Etapes de simulation d'antenne sous HFSS

Nous avons utilisé le logiciel HFSS pour concevoir notre antenne. Cette antenne est dédiée pour les applications MIMO multibande. Trois structures sont implémentées et analysées pour fonctionner dans une bande de fréquences [2 – 5GHz]. La figure 3.7 illustre l'antenne de base avec un seul élément sous HFSS.

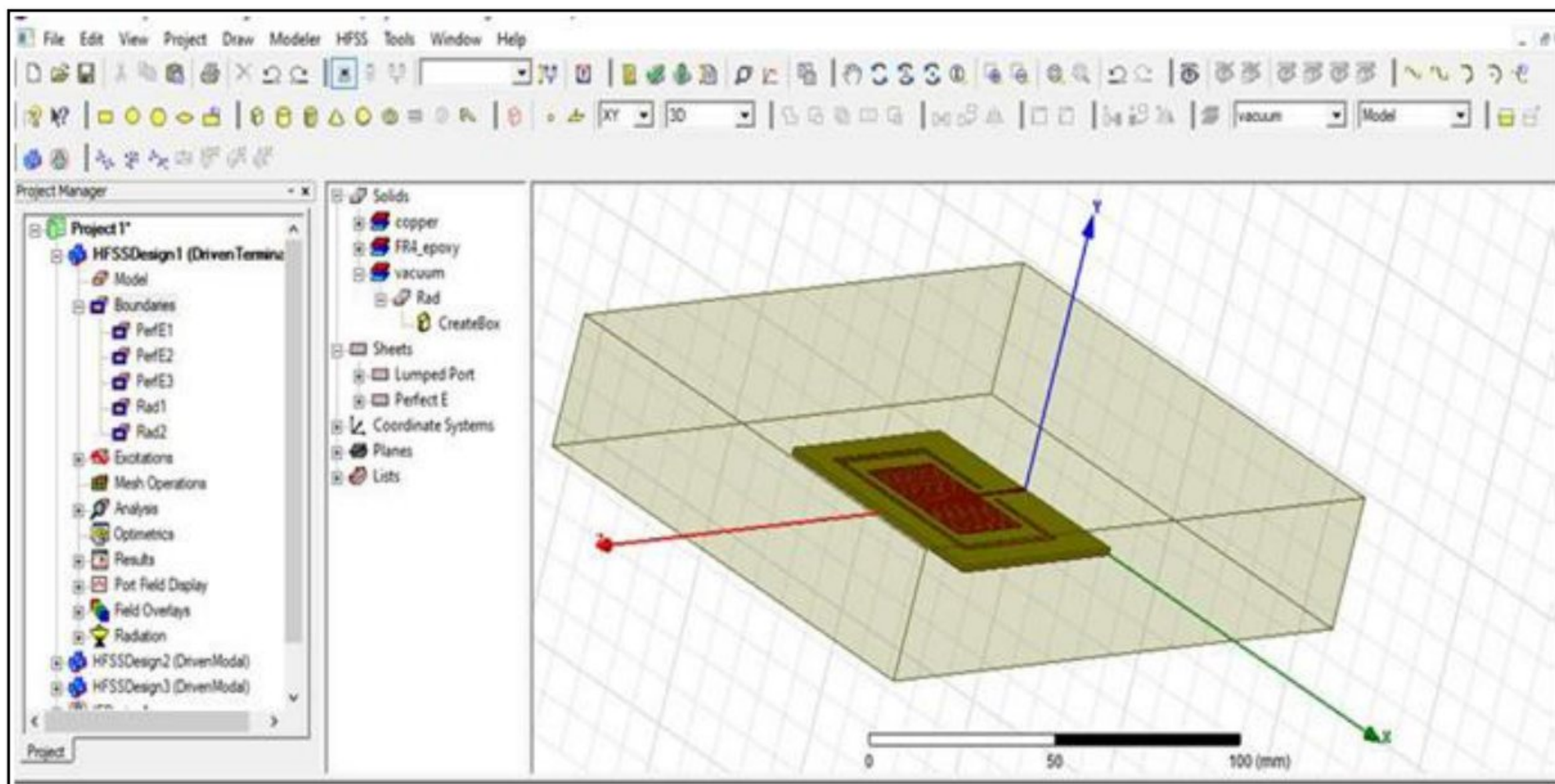


FIGURE 3.7. Antenne de base sous HFSS

#### 3.2.5.1 Configuration des solutions

Pour commencer l'analyse il faut insérer la fréquence de travail et la plage de fréquence. La figure 3.8 (A) illustre l'étape de la configuration de la fréquence. Celle-ci est fixée à 2.45GHz.

Les simulations sont effectuées dans une plage de fréquences [2 – 5GHz]. La figure 3.8 (B) montre la procédure de choisir la bande de fréquence de 2GHz à 5GHz avec un pas de 0.01GHz.

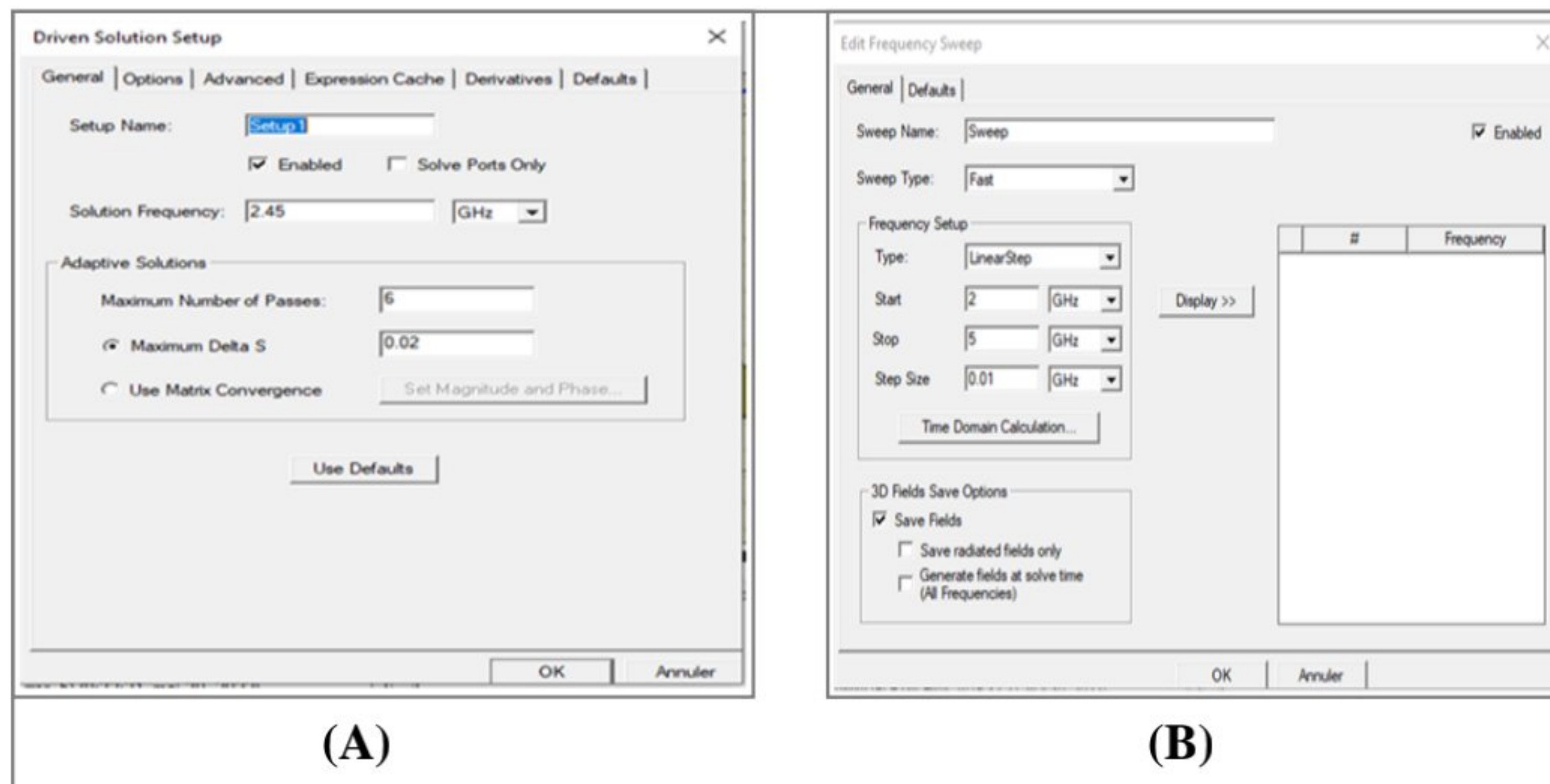


FIGURE 3.8. Fréquence de travail

### 3.2.5.2 Créer les rapports

Après la compilation et l'analyse, on va créer des rapports pour afficher chacun des graphes de la fréquence de résonance et du diagramme de rayonnement.

Clique droit sur **Results/Create modal solution data Reports**. La figure 3.9 montre l'étape de la création du rapport pour afficher les résultats demandés (dans ce cas le paramètre  $S_{11}$ ).

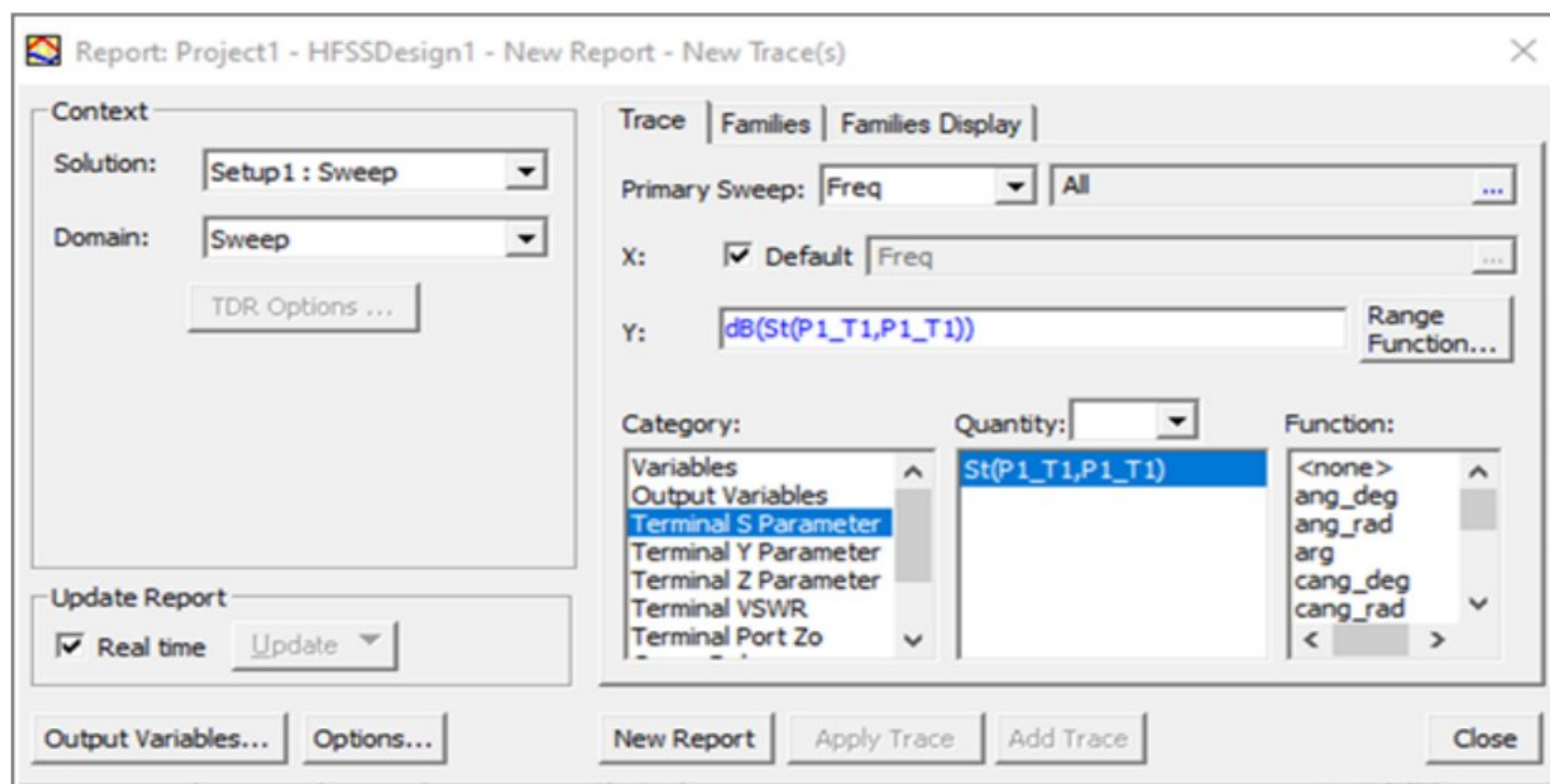


FIGURE 3.9. Création du rapport

### 3.3 Simulation d'antennes proposées

Les trois structures sont implémentées sous un substrat FR4\_Epoxy de permittivité relative  $\epsilon = 4.4$  et d'épaisseur  $h = 1.6mm$ .

#### 3.3.1 Antenne patch SIW (structure 1)

L'élément de base est de forme rectangulaire, et ses paramètres dimensionnels sont calculés pour une fréquence de résonance  $f_r = 2.45GHz$ . La figure 3.10 montre la structure d'une antenne patch en technologie siw.

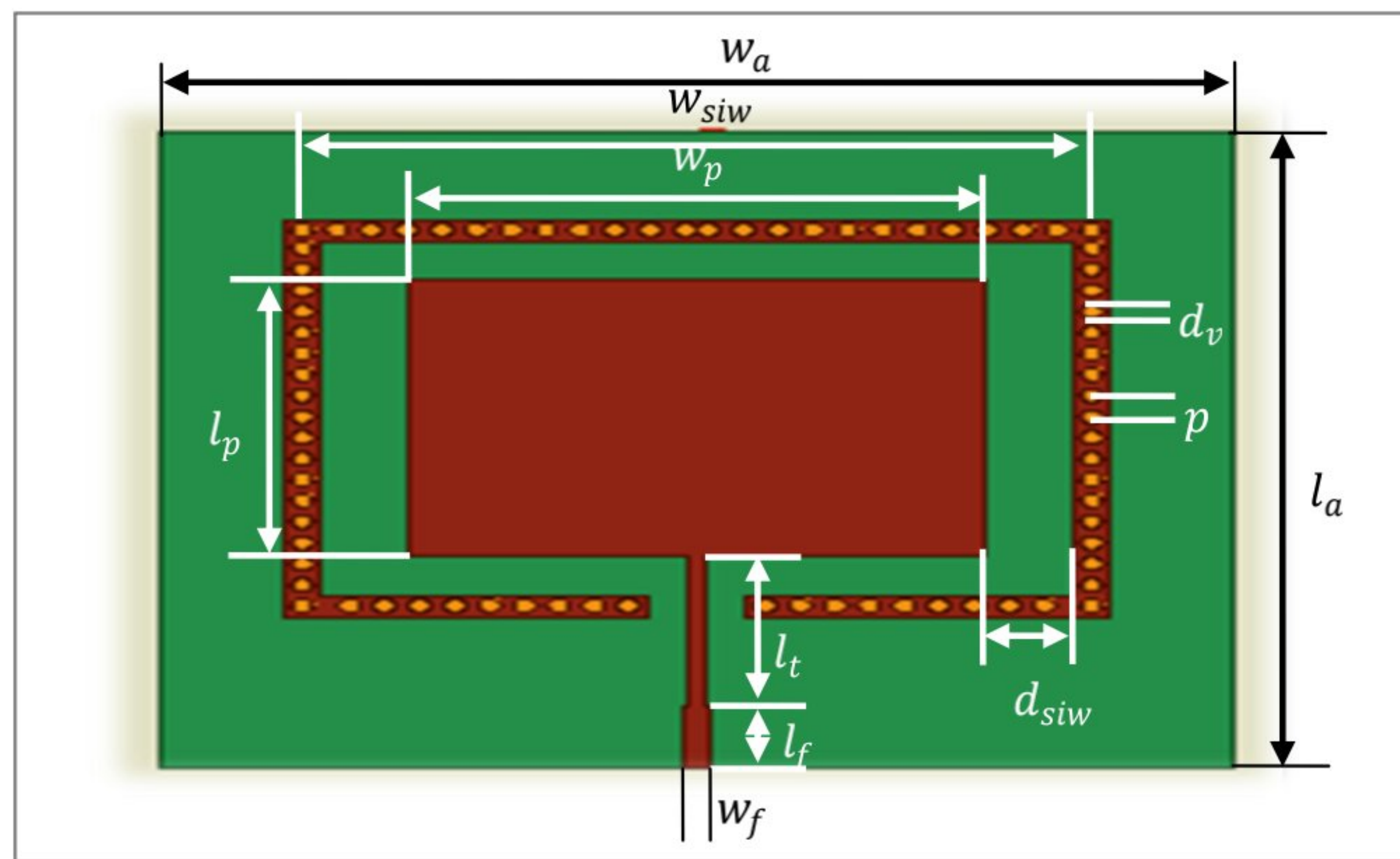


FIGURE 3.10. Antenne patch SIW

Le tableau 3.1 montre les différents paramètres de l'antenne. Ces paramètres sont calculés en fonction de la fréquence 2.45GHz.

TABLEAU 3.1. Antenne patch SIW

Paramètres	Description	Dimension
$w_a$	Largeur de l'antenne	64.8
$l_a$	Longueur de l'antenne	64.3
$w_{siw}$	Longueur du guide SIW	47.6
$w_p$	Largeur du patch	34.8
$l_p$	Longueur du patch	27.6
$w_f$	Largeur du feed	1.53
$l_f$	Longueur du feed	6
$l_t$	Longueur du tapie	15
$d_v$	Diamètre du via	1
$p$	Distance entre adjacentes vias	2

Le figure 3.11 représente le coefficients de réflexion  $S_{11}$  de l'antenne proposée dans la fréquence 2.45GHz simulé sous HFSS. Ces résultats montrent l'apparition de deux fréquences de résonance : 2.5GHz avec une adaptation de  $-23.82dB$  et 4.02GHz avec une adaptation de  $-18.22dB$ . Alors on constate que la meilleure adaptation de l'antenne est dans la fréquence 2.5GHz.

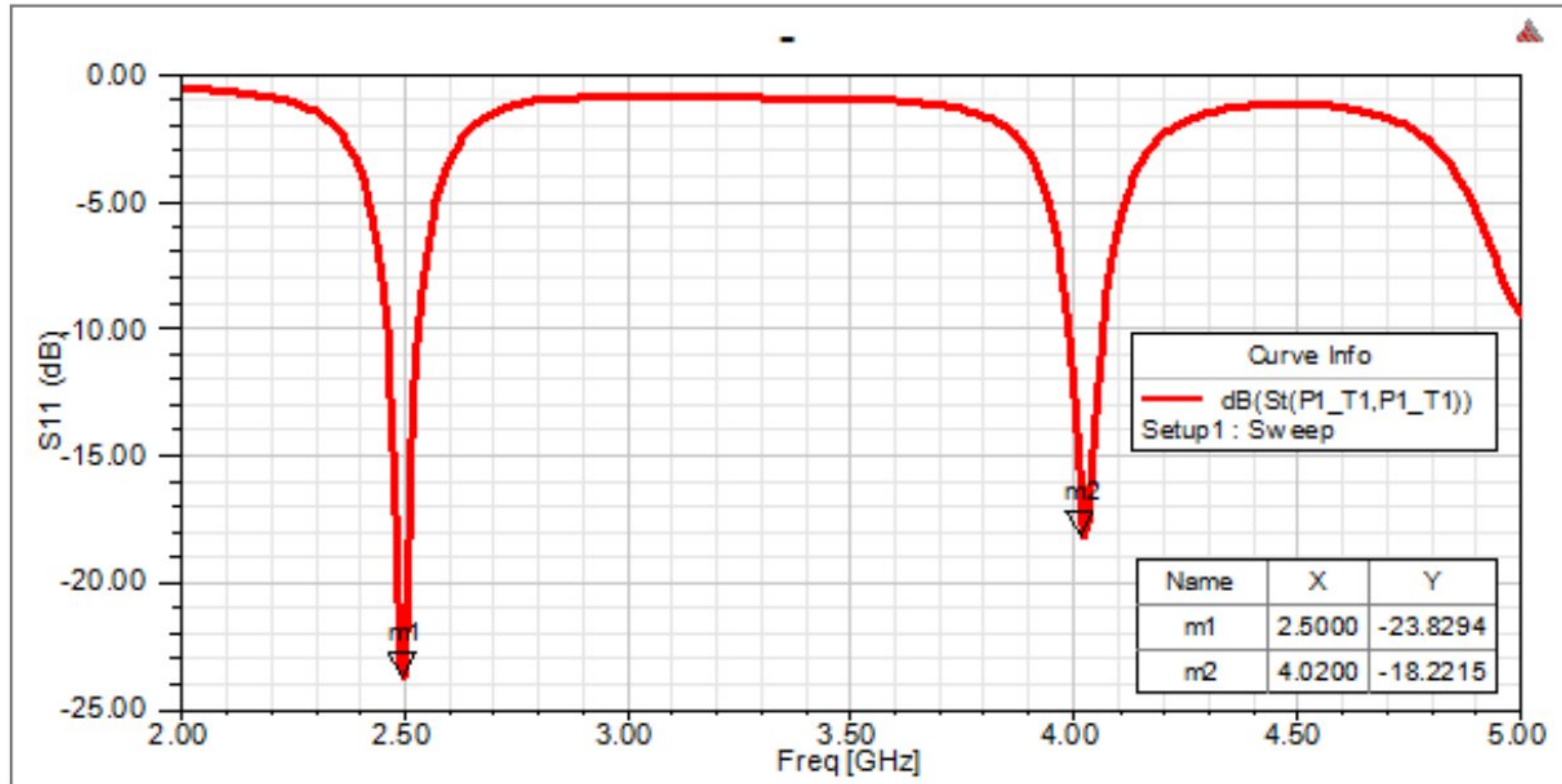


FIGURE 3.11. Coefficient de reflexion (Antenne 1)

Le diagramme de rayonnement de cette antenne est donné par la figure 3.12 (A) en 2D et (B) en 3D. On remarque que l'antenne dans le plan H se rayonne dans une seule direction avec un lobe principale.

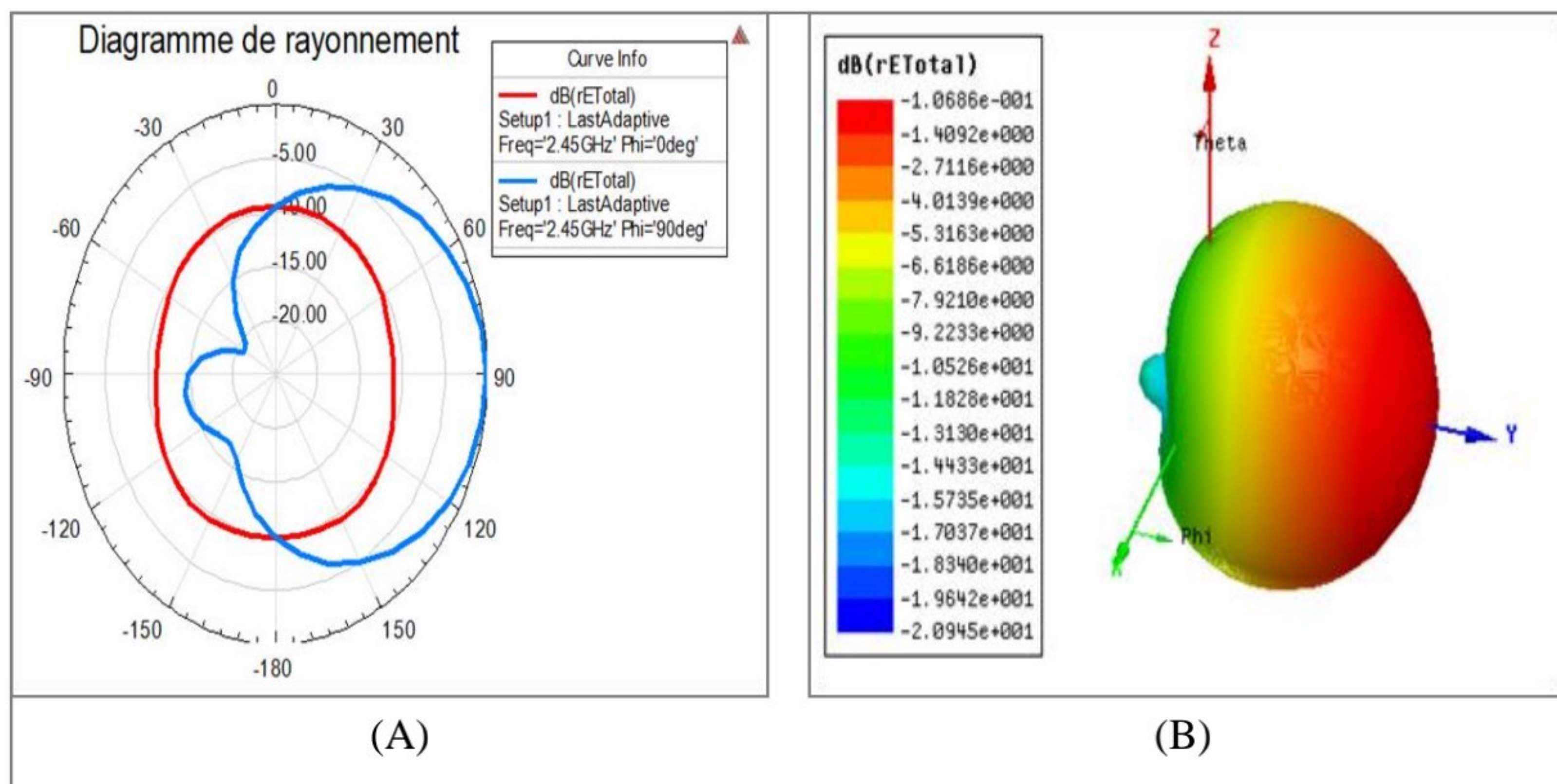


FIGURE 3.12. Diagramme de rayonnement (Antenne 1)

La figure 3.13 illustre la distribution du champ électrique le long de surface de l'antenne 1.

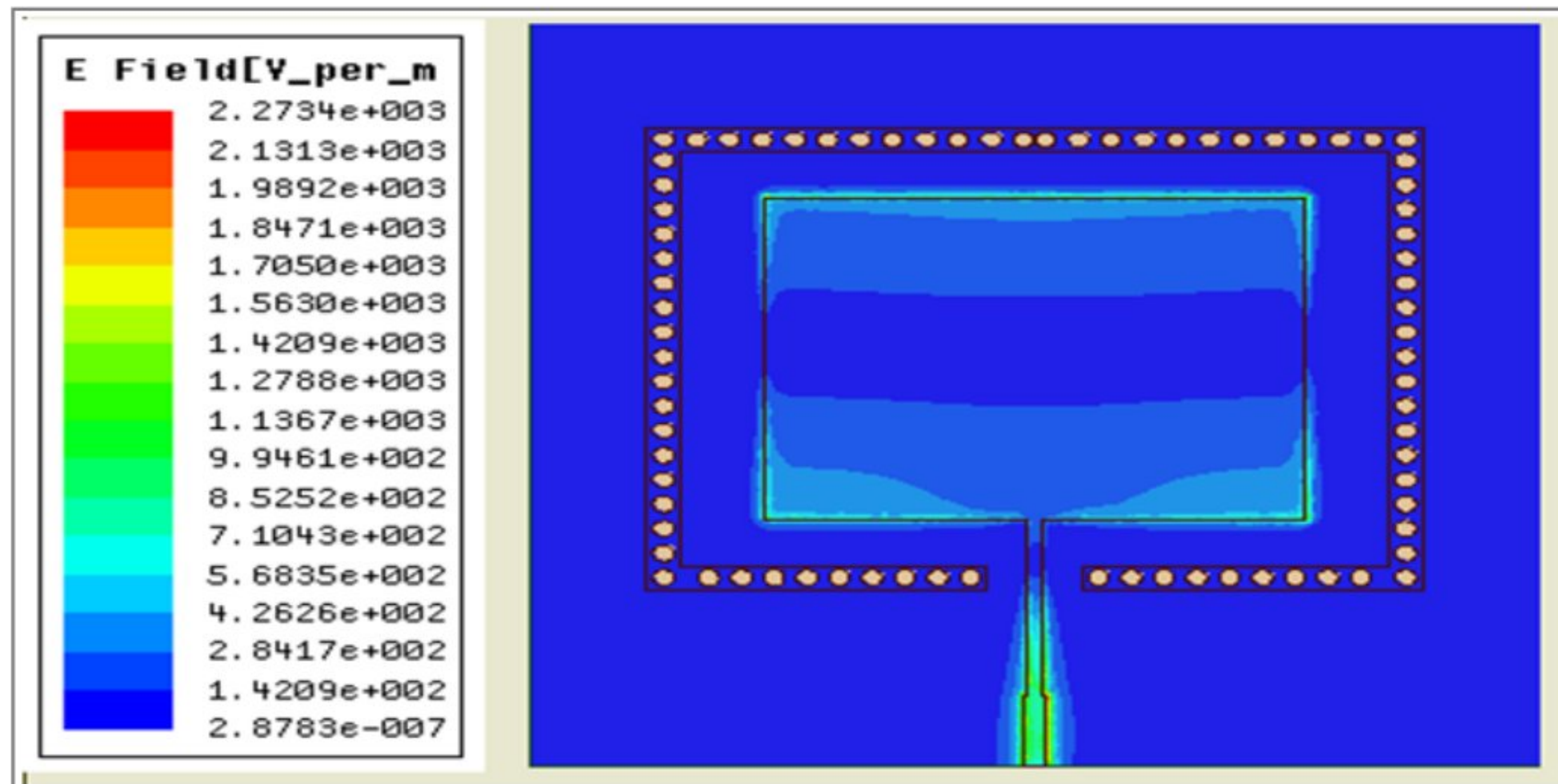


FIGURE 3.13. Distribution du champ électrique (Antenne 1)

### 3.3.2 Antenne patch MIMO\_SIW (structure 2)

On utilise la même géométrie d'antenne patch fonctionnant dans la même bande de fréquence [2 – 5GHz] pour une fréquence de coupure de 2.5GHz. Afin de construire une configuration MIMO à deux antennes de même type en technologie siw, ces deux antennes sont positionnées sur le même plan de masse. Le tout est imprimé sur le même substrat FR4\_Epoxy avec :  $\epsilon_r = 4.4$ ,  $h = 1.6mm$ ). Cette structure est illustrée dans la figure 3.14.

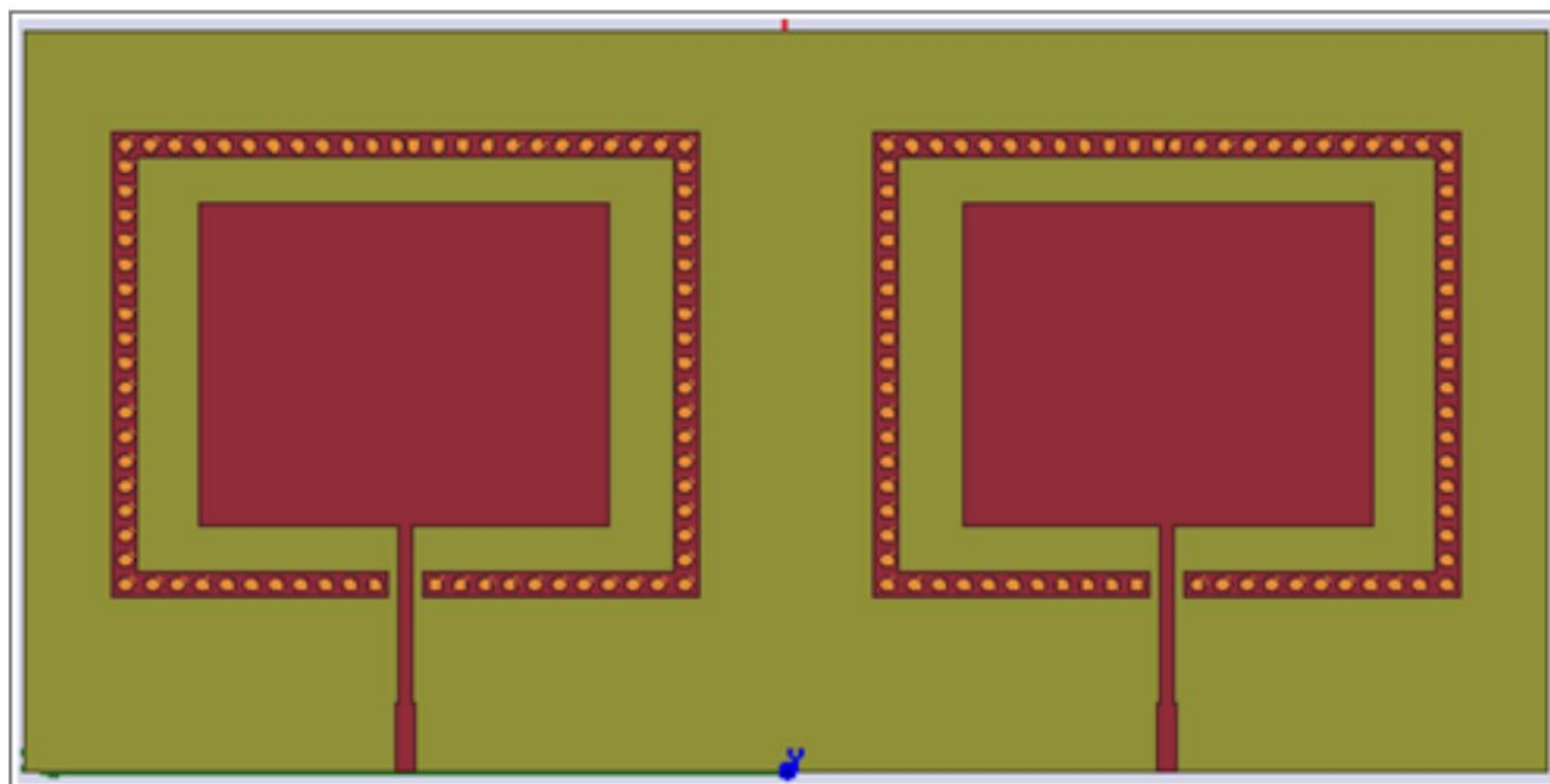


FIGURE 3.14. Antenne patch en technologie siw (Antenne 2)

La simulation de cette antenne à l'aide du logiciel HFSS, permet de mesurer le coefficient de réflexion  $S_{11}$ . La figure 3.15 illustre ce paramètre en fonction de la fréquence.

Elle montre bien que l'antenne simulée l'apparition de deux fréquences de résonance 2.5GHz avec une adaptation de  $-31.40dB$  et 4.03GHz avec une adaptation de  $-19.44dB$ . Alors on constate que la meilleure adaptation de l'antenne est dans la fréquence 2.5GHz. est mal adaptée dans la bande de fréquence [2 – 5GHz].

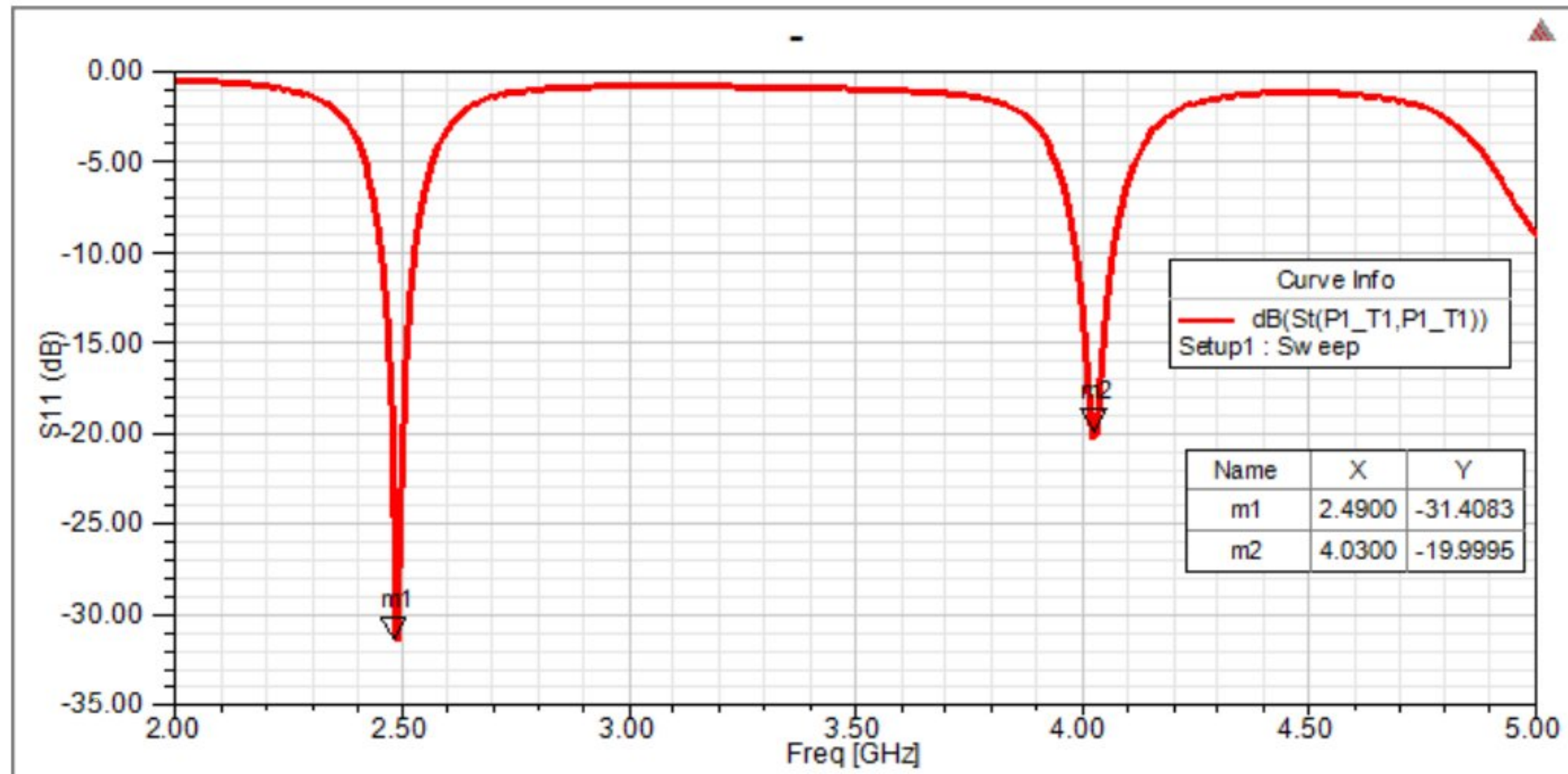


FIGURE 3.15. Coefficient de reflexion (Antenne 2)

La figure 3.16 représente le coefficient de transmission  $S_{21}$  de l'antenne MIMO en technologie SIW (Antenne 2). On Remarque qu'il y a une faible transmission entre les deux e l'antenne a fair une bonne de transmission pour  $f = 2.5GHz$

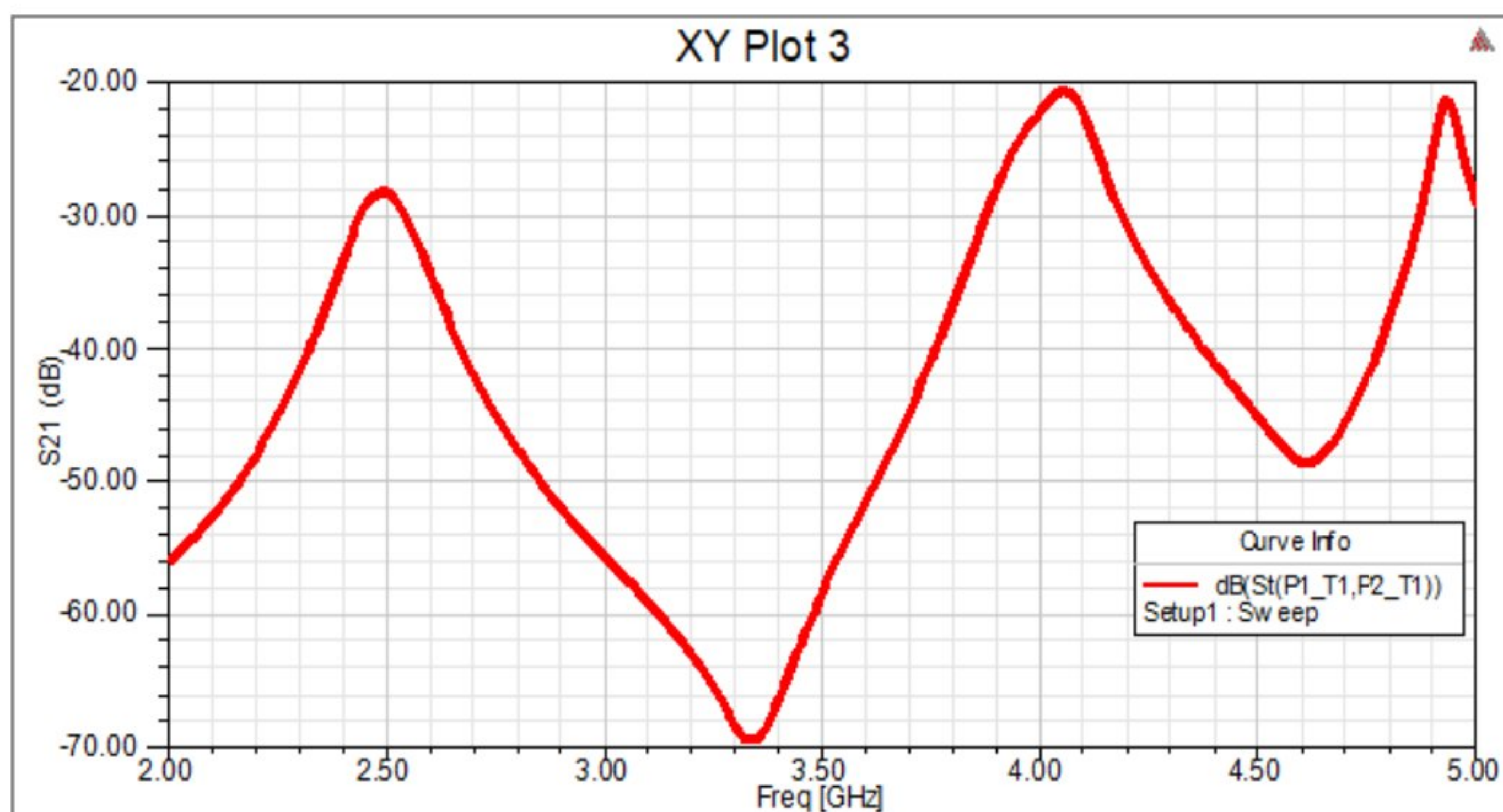


FIGURE 3.16. Coefficient de transmission (Antenne 2))



Le diagramme de rayonnement de cette antenne est donné par la figure 3.17(A) en 2D et (B) en 3D. Le diagramme de rayonnement de l'antenne simulée dans le plan E ( $\phi = 0^\circ$ ) et le plan H ( $\phi = 90^\circ$ ) On remarque que l'antenne se rayonne dans deux directions avec des lobes principales .

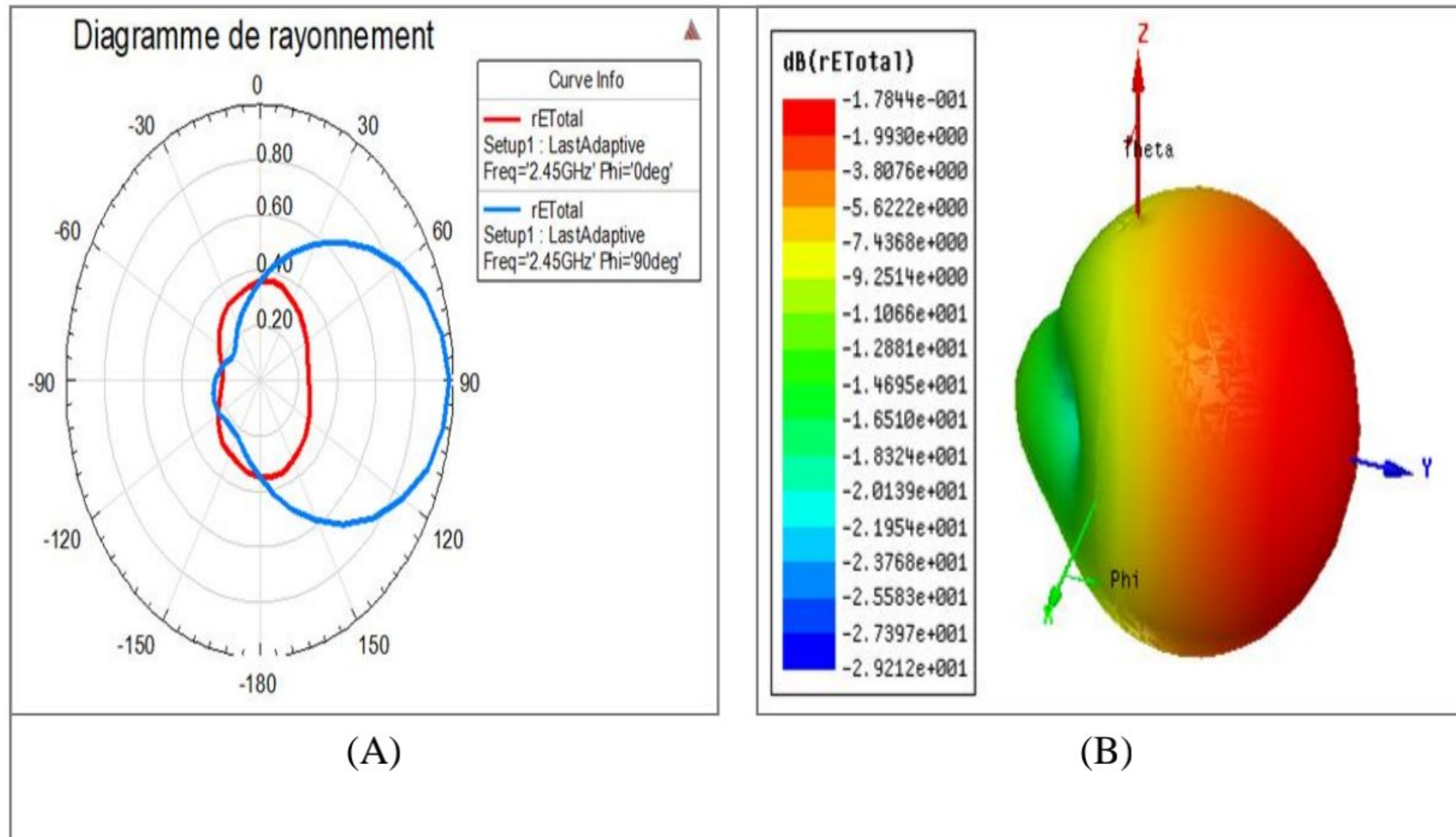


FIGURE 3.17. Diagramme de rayonnement (Antenne 2)

La figure 3.18 illustre la distribution du champ électrique . On remarque que exister d'isolation entre les deux élément d'antennes, qui appelé le couplage mutuel

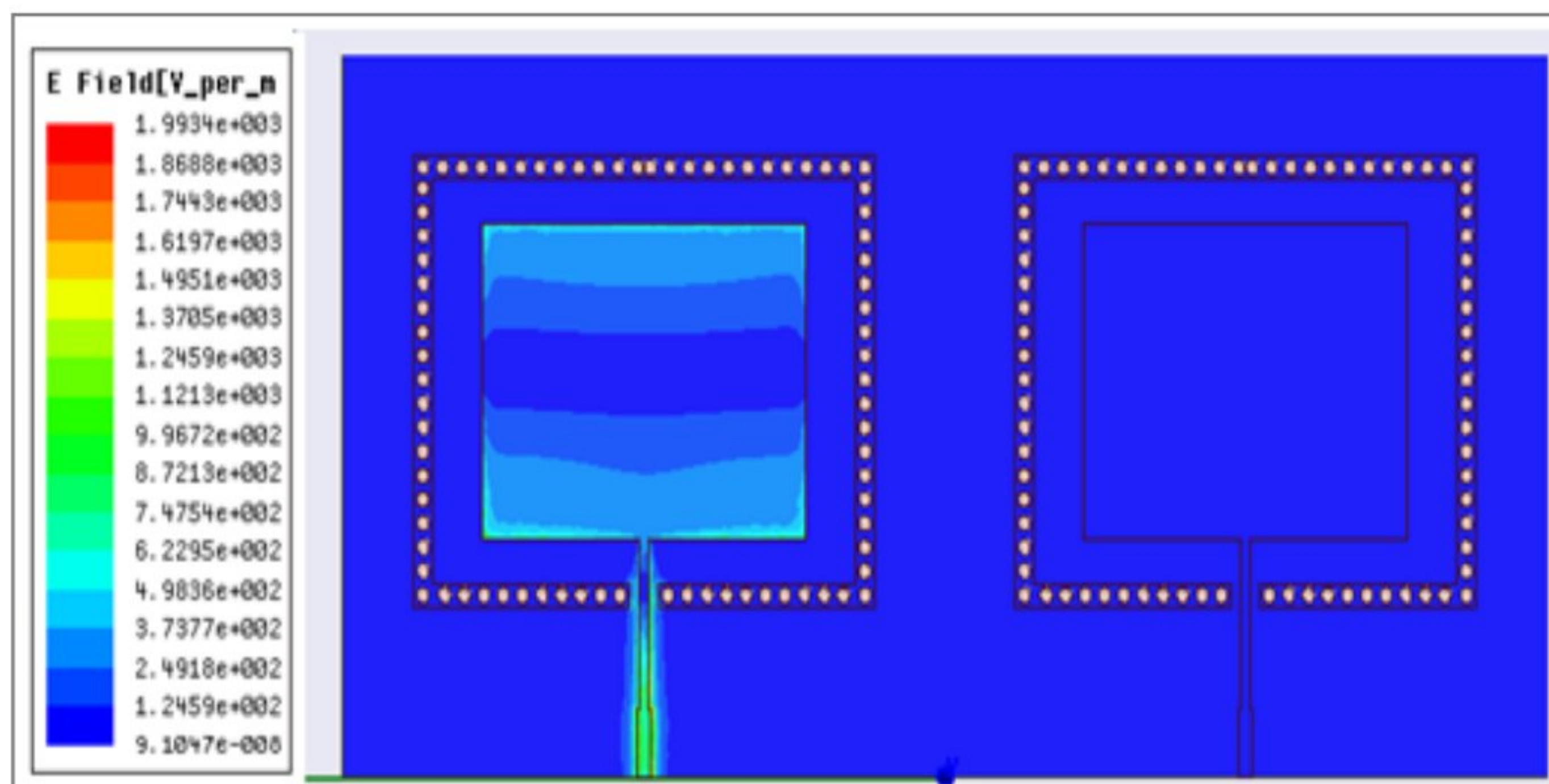


FIGURE 3.18. Distribution du champ électrique (Antenne 2)

### 3.3.3 Antenne patch MIMO\_SIW (structure 3)

éché de résultat nous avons inséré des vias métallique sous forme cylindrique à la structure d'antenne MIMO patch. Comme mentionné précédemment, cette technique est connue sous le nom SIW. La figure 3.19 montre la structure d'une antenne patch en technologie siw.

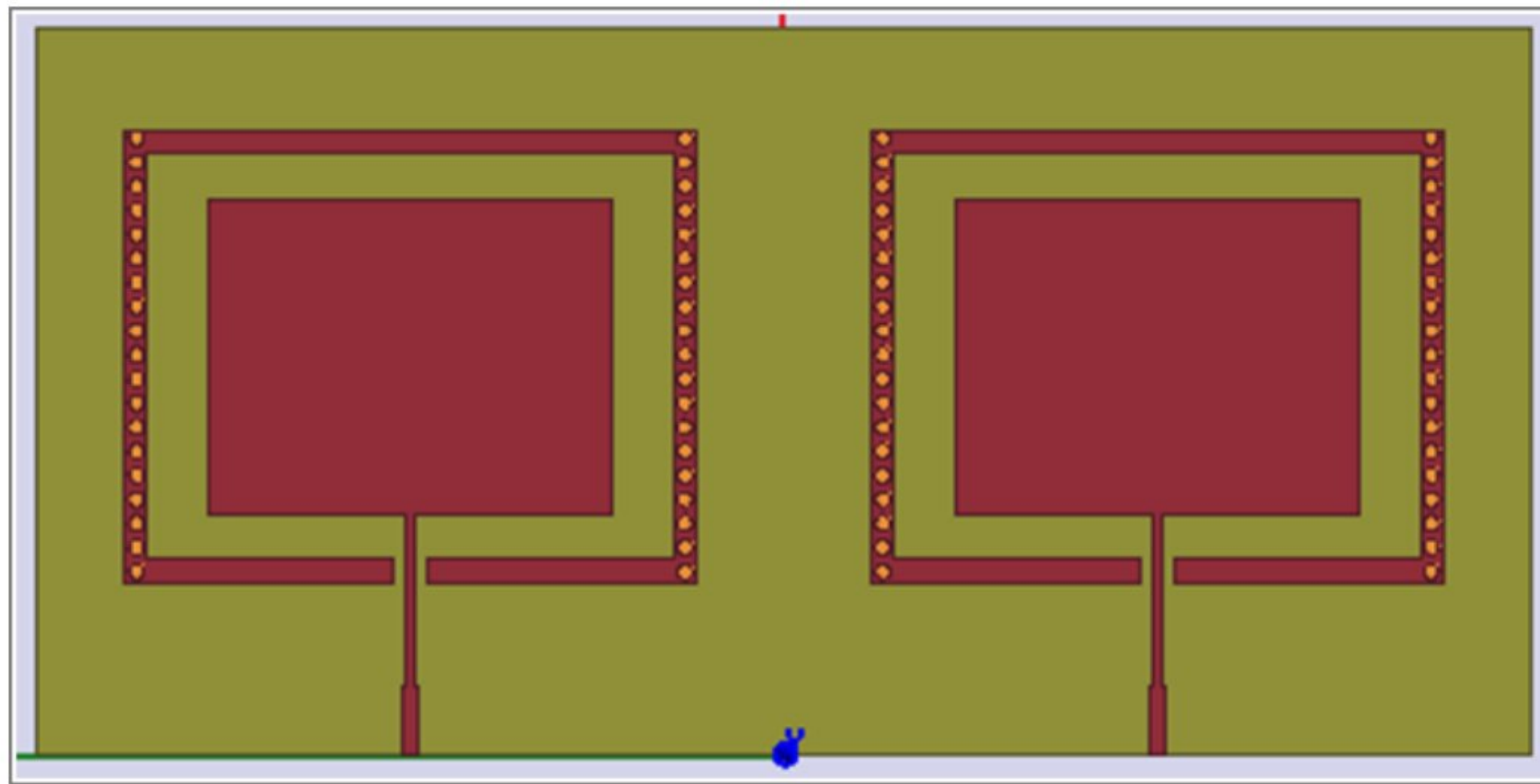


FIGURE 3.19. Antenne patch MIMO\_SIW 3

Les résultats des paramètres  $S_{11}$  de l'antenne sont illustrés sur la figure 3.20 dans une bande de fréquence [2 – 5GHz]. on remarque deux pics en fréquence  $f_1 = 2.5\text{GHz}$  et  $f_2 = 4.02\text{GHz}$  avec  $-36.91\text{dB}$  et  $-19.17\text{dB}$  avec une bonne adaptation de  $f_1 = 2.5\text{GHz}$

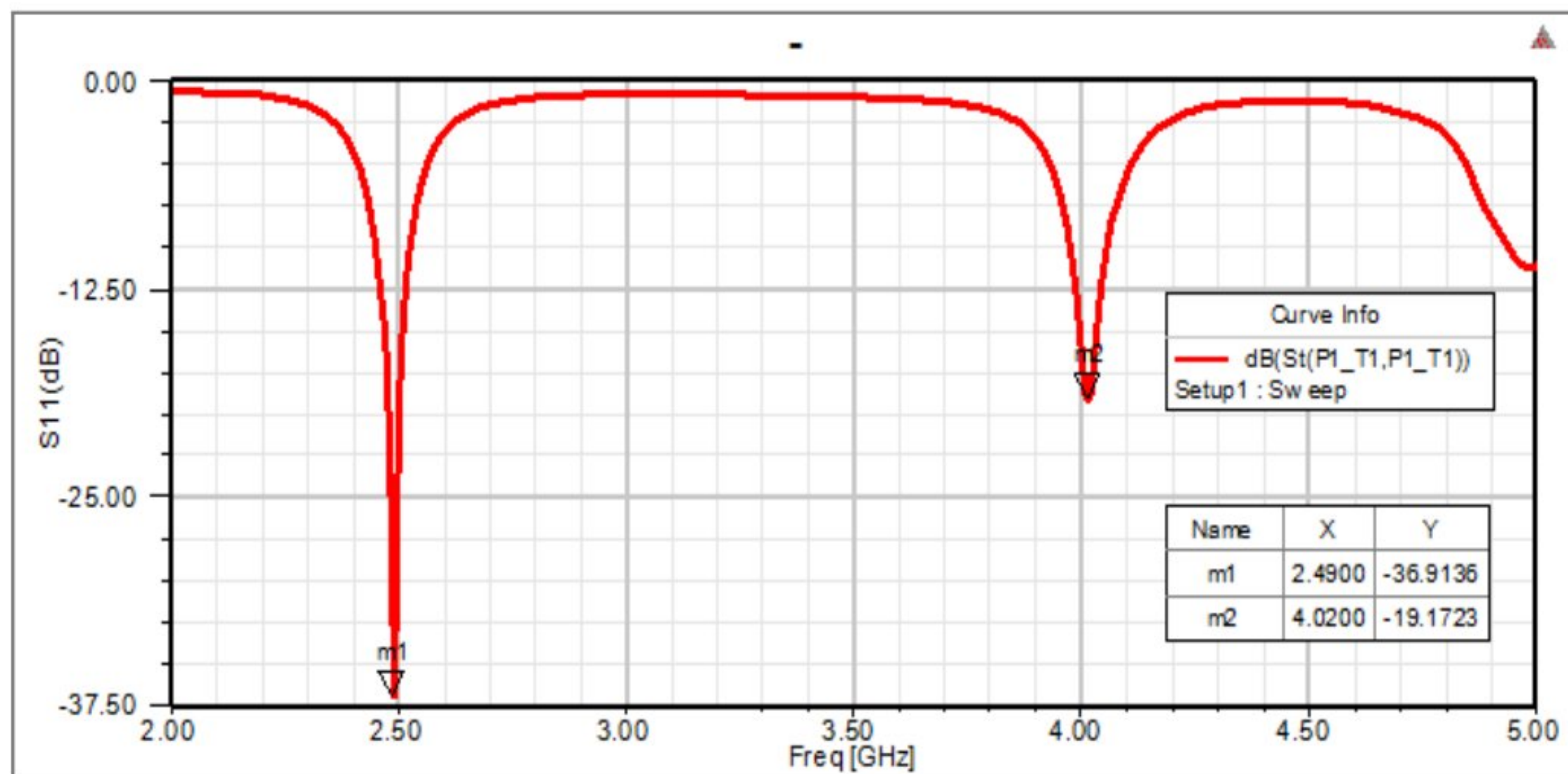


FIGURE 3.20. Coefficient de reflexion (Antenne 3)

Pour le coefficient de transmission  $S_{21}$  on remarque qu'il existe 2 pics de transmission  $f = 2.5\text{GHz}$  et  $f = 4\text{GHz}$  et bonne transmission pour  $f = 2.5\text{GHz}$

Le diagramme de rayonnement de l'antenne simulée dans le plan E ( $\phi = 0^\circ$ ) et le plan H( $\phi = 90^\circ$ ) est donné par la figure 3.21. On remarque que l'antenne se rayonne dans deux directions avec des lobes principales .

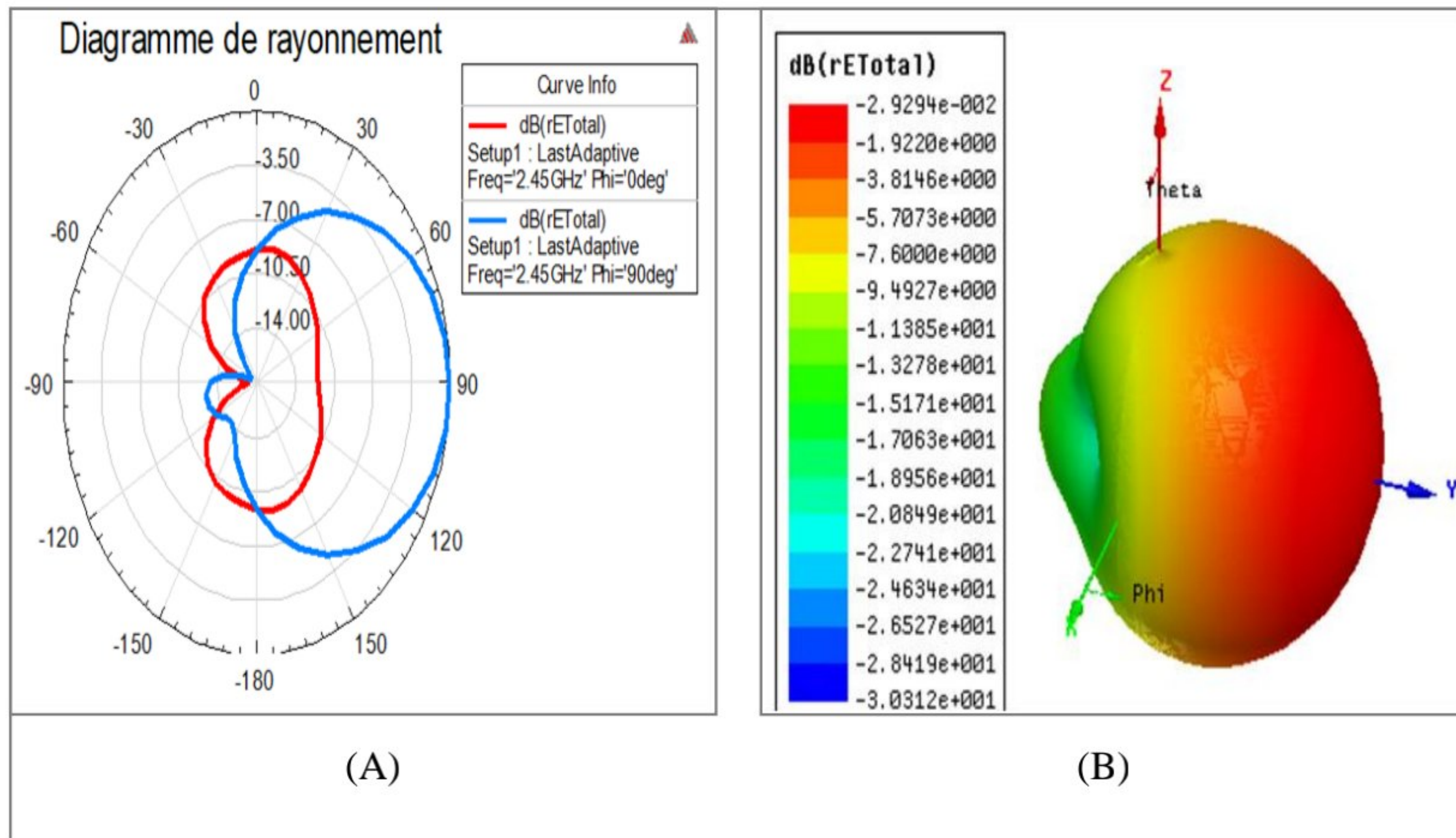


FIGURE 3.21. Diagramme de rayonnement (Antenne 3)

La figure 3.22 représente la distribution de la charge au niveau de l'antenne MIMO SIW. Cette distribution montre clairement la réduction du couplage mutuel entre les différents éléments d'antenne MIMO SIW. Ceci prouve l'importance de la technologie SIW pour la conception de ce type d'antenne.

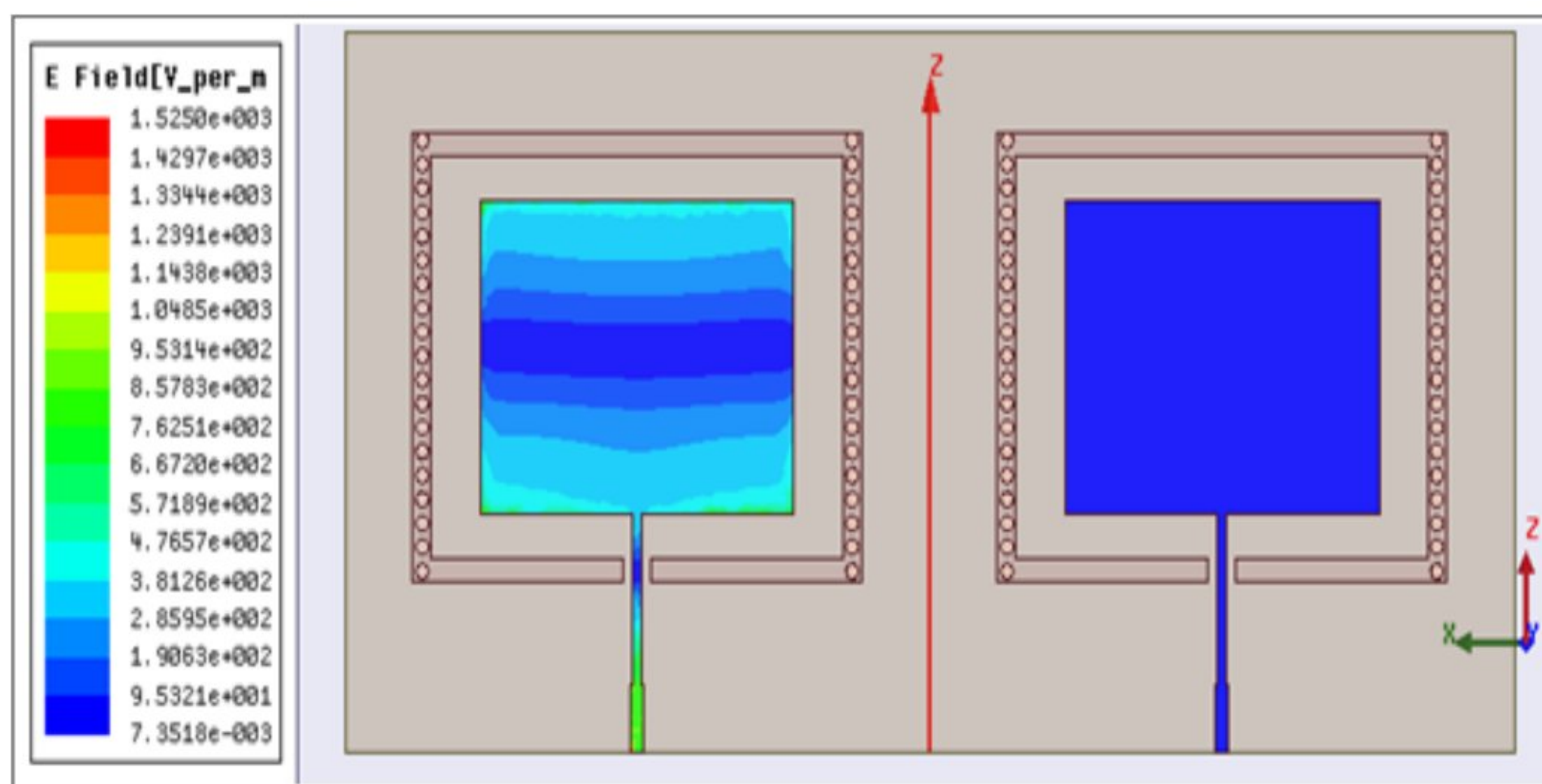


FIGURE 3.22. Distribution du champ électrique (Antenne 3)

La figure 3.23 illustre le gain de l'antenne conçue. On Remarque que l'antenne a un gain de 3dB pour  $f = 2.5GHz$

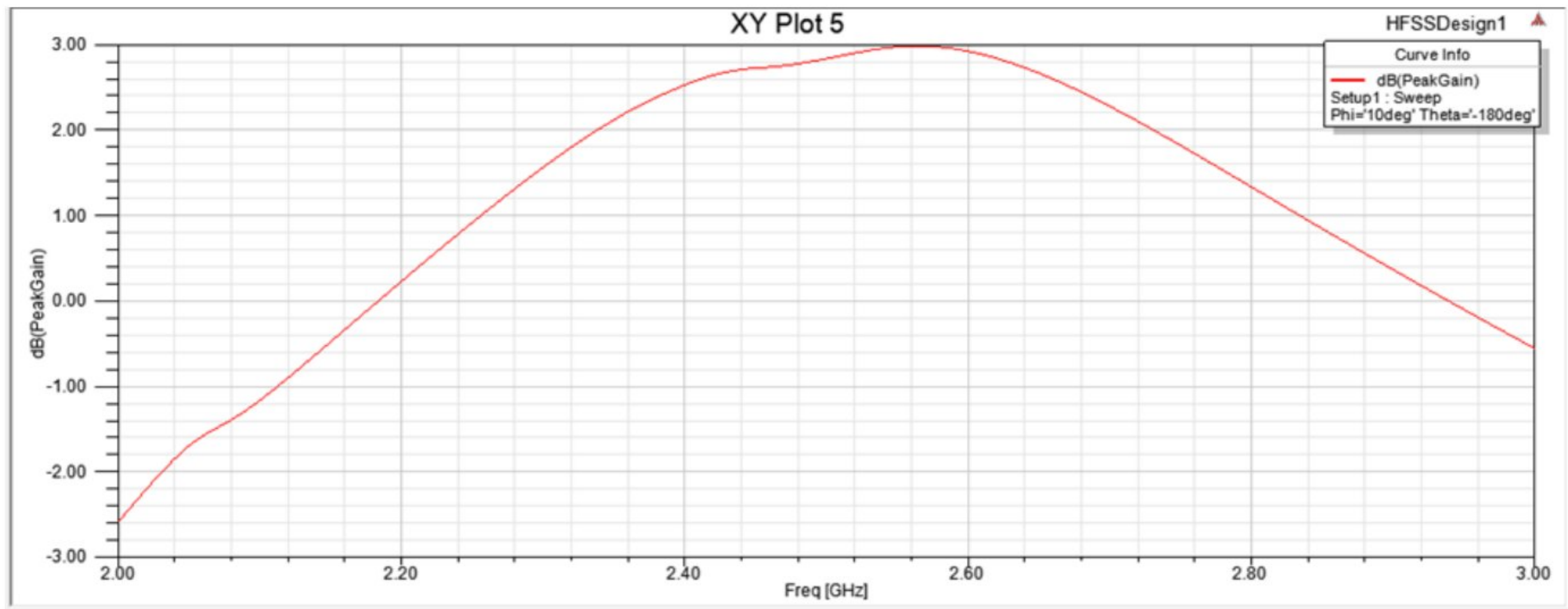


FIGURE 3.23. Gain de l'antenne 3

### 3.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté nos résultats de simulation des antennes en utilisant le logiciel de simulation HFSS. Ces résultats regroupent le coefficient de réflexion, le coefficient de transmission, le diagramme de rayonnement et la distribution du champ électrique. Nous avons finalisé notre étude par la fabrication de l'antenne MIMO en technologie SIW

# Conclusion générale

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

Porté par un intérêt accru envers la cinquième génération (5G) en tant que technologie prometteuse pour les télécommunications mobile, la communauté scientifique cherche toujours à atteindre des meilleures performances. Cependant, garantir une bonne qualité tout en alliant les limitations de complexité, temps de latence, cout, gain ... etc, reste un défi qui occupe les chercheurs. Dans le premier chapitre de ce mémoire, les généralités sur la 5G avec ses technologies clés ont été présentées d'une manière générale afin de se familiariser avec le concept de base de ces notions. Nous avons ensuite présenté les antennes imprimées et les réseaux d'antennes étant donné qu'ils constituent une bonne solution qui a pu améliorer les performances du système.

Nous avons décrit les notions sur les guides d'ondes avec les différents types de technologies tels que les guides d'ondes classiques et la technologie SIW. Cette technologie a été incorporée dans plusieurs systèmes de communications. On note les filtres, les guides d'ondes et les antennes.

Dans ce travail nous avons exploité cette technologie pour la conception d'antennes appliquées aux systèmes MIMO.

# Bibliographie

- [1] Alexander Bayer, "*Cours antenne*", Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 4<sup>ème</sup> année informatique et réseau, Oct 2011
- [2] P. F. Combes, "*Circuits Passifs, Propagation, Antennes*," Micro-ondes Tome 2, Dunod, 1997.
- [3] Yijun Zhou; Chi-Chih Chen; Volakis, IL., "*Single-fed Circularly Polarized Antenna Element With Reduced Coupling for GPS Arrays*," IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol.56,no.5,pp.1469-1472, May 2008
- [4] Keit.R.Caver and James.W.Mink , "*Microstrip antenna Technology*", IEEE.1981.
- [5] Stalling, D, Zockler, M; Hege, H-C : "*Fast display of illuminated field lines Visualization and computer Graphics* ", IEEE transaction on .Vol.3, Issue2, pp.118-128, June 1997.
- [6] Airza Karemipour, "*Contribution à l'étude du couplage entre antennes, application à la compatibilité électromagnétique et à la conception d'antenne et de réseaux d'antennes*", Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des télécommunications, spécialité communication et électronique, juin 2002
- [7] Frederic Parment, "*High performance multilayer Substrate Integrated Waveguide (SIW) technics for low-cost millimeter-wave circuits*", thèse de doctorat en optique et radiofréquence, Grenoble.
- [8] R.J.Mailloux, "*Phased Array Antenna Handbook*", Second Edition Artech House, Inc, 2005.
- [9] W.K. CHEN, "*The Electrical Engineering Handbook*", Elsevier Inc, 2004
- [10] L. Josefsson, P. Persson, "*Conformal Array Antenna Theory and Design*", IEEE antenna and propagation society, Wiley-Interscience 2006.
- [11] D. E. N. Davies, "*Circular Arrays : Their Properties and Potential Applications*", IEE Second International Conference on Antennas and Propagation, pp. 1–10, April 1981.
- [12] T. Y. Lo, H. C. Hsuan, "*An Equivalence Theorem between Elliptical and Circular Arrays*", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-13, pp. 247–256, Mars 1965.

- 
- [13] O. A. Civil, P. H. Pathak, P. Janpugdee' and B. A. Mu, " *Surface Waves On A Finite Planar Dipole Array In Free Space*", IEEE Trans. Antenna Propogate pp 78-81, 2002.
- [14] S.K. Rao, " *Parametric Design and Analysis of Multiple-Beam Reflector Antennas for Satellite Communications*", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 45, No. 4, pp. 26-34, Août 2003.
- [15] J.Q. Howell, " *Microstrip Antennas*", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. 23, Issue 1, p. 90-93, janvier 1975
- [16] G. Kossiavas, A. Papiernik, R. Staraj, C. Luxey, " *Antennes imprimées - Bases et principes*", Dossier E 3310, Antenne, Techniques de l'Ingénieur, 2012
- [17] E. T. Bendimerad et Col., " *MIMO et accès multiples avancés pour les réseaux sans fil*", CERIST, Tlemcen, 2011-2013.
- [18] S. Bouaziz, " *Réduction du PAPR du système OFDM-MIMO en 4G*", Université de Setif 1, Setif, 2015.