

Université Kasdi Merbah Ouargla
Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
Département d'Electronique et Des Télécommunications



Mémoire

MASTER 2 ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Télécommunication

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Présenté par :

Boughaba Hanane

et

Hafiane Sabrina

Thème

**Etude et conception d'une antenne pour la récupération
d'énergie dans la bande Wi-Fi 2.45 GHz**

Devant le jury composé de :

Mr. MEKIMAH Boualem	MCA	Président	UKM Ouargla
Mr. BELHEDRI Abdelkrim	MAA	Encadrant	UKM Ouargla
Meme. LOUAZENE Hassiba	MCA	Examineur	UKM Ouargla
Meme. HAMIDI Amira	PhD	Invitée	UKM Ouargla

Année universitaire : 2024/2025

Remercîment

*A Dieu, le tout puissant, nous rendons grâce
pour nous avoir donné santé, patience,
volonté et surtout raison. Un merci spécial
à notre famille qui nous a soutenu dans
notre cheminement, à tous nos amis et à tous
ceux qui nous ont soutenus, en
particulier le professeur*

M. BELHEDRI abdelkarim *que nous
remercions pour ses conseils et ses
orientations.*

Et Nous remercions aussi les membres du jury.

Dédicaces

*À ceux dont les prières ont été pour moi un appui et une
lumière sur mon chemin,*

À mes chers parents,

*Toute ma gratitude, mon amour et mes remerciements
les plus sincères, car vous êtes la source de ma réussite
et la raison de mon accomplissement.*

*À mes frères et sœurs, vous êtes ma deuxième âme, mes
compagnons fidèles à chaque étape,
Merci d'avoir toujours été là pour moi.*

*À mes chers amis, ceux qui ont partagé les veilles et les
efforts,
Votre présence et votre sincérité m'ont toujours été
précieuses.*

*À mes professeurs respectés, phares du savoir et guides
de la connaissance,
Je vous adresse mes plus profonds remerciements pour
votre dévouement, votre enseignement et votre soutien.*

*À vous tous, je dédie ce mémoire, en signe d'amour et
de reconnaissance.*

Hanane

Dédicaces

À mon père et ma mère

*À ma chère sœur Aïcha et mes frères Fares,
Youssef et Mohamed*

À mon fiancé Hamza,

À mes cousines Basma, Marwa, Aïcha et Amira

À mon cousin préféré Kadi,

*Et à tous les membres de ma famille Hafiane
et Mezouar, Et plus encore*

Particulièrement à tous mes amis et collègues

*À mes professeurs respectés, phares du savoir
et guides de la connaissance.*

Sabrina

Résumé

La récolte d'énergie électromagnétique est une technologie émergente qui vise à convertir les ondes électromagnétiques ambiantes, telles que les signaux radio et Wi-Fi, en énergie électrique utilisable.

Dans ce travail, nous avons conçu une antenne conventionnelle de forme rectangulaire pour couvrir la bande Wi-Fi dans le but de récolter l'énergie propagée dans l'espace libre. Une adaptation avec des tronçons de lignes quart-d'onde a permis d'améliorer le rendement de notre antenne, qui est passée de 50% à 90%, comme première phase de conception. Par la suite, notre antenne a été optimisée pour couvrir toute la bande Wi-Fi 2.45GHz. Un circuit d'adaptation entre l'antenne et le circuit redresseur a été étudié et calculé pour déterminer les valeurs d'élément discret.

Mots clés: Récolte d'énergie, antenne patch, adaptation d'impédance, redresseur.

Abstract

Electromagnetic energy harvesting is an emerging technology that aims to convert ambient electromagnetic waves, such as radio and Wi-Fi signals, into usable electrical energy.

In this work, we designed a conventional rectangular antenna to cover the Wi-Fi band with the aim of harvesting energy propagated in free space. An adaptation using quarter-wave line segments allowed us to improve the efficiency of our antenna, which increased from 50% to 90% as the first phase of design. Subsequently, our antenna was optimized to cover the entire 2.45 GHz Wi-Fi band. An impedance matching circuit between the antenna and the rectifier circuit was studied and calculated to determine the values of discrete elements.

Keywords: Energy harvesting, patch antenna, impedance matching, rectifier.

ملخص

جمع الطاقة الكهرومغناطيسية هو تقنية ناشئة تهدف إلى تحويل الموجات الكهرومغناطيسية المحيطة، مثل إشارات الراديو والواي فاي، إلى طاقة كهربائية قابلة للاستخدام. في هذا العمل، قمنا بتصميم هوائي تقليدي على شكل مستطيل لتغطية نطاق الواي فاي بهدف جمع الطاقة المنتشرة في الفضاء الحر. وقد سمحت التكيفات باستخدام قطع من خطوط ربع الموجة بتحسين كفاءة هوائنا، التي ارتفعت من 50% إلى 90% كمرحلة أولى من التصميم. Subsequently, our antenna was optimized to cover the entire 2.45 GHz Wi-Fi band. An impedance matching circuit between the antenna and the rectifier circuit was studied and calculated to determine the values of discrete elements.

إلى 90% كمرحلة أولى من التصميم. بعد ذلك، تم تحسين هوائنا لتغطية كامل نطاق الواي فاي عند تردد 2.45 جيجاهرتز. كما تم دراسة وحساب دائرة التكيف بين الهوائي ودائرة التقويم لتحديد قيم العناصر المكونة.

الكلمات المفتاحية: جمع الطاقة، هوائي باتش، تكيف المعاوقة، مقوم.

Liste des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Dédicace	III
Résumé	IV
Liste de manières	V
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XI
Liste des abréviations	XII
Introduction Générale	2

Chapitre 1: Généralités sur les Antennes imprimées

1.Introduction	5
2.Historique des antennes imprimées	5
3.Structure d'une antenne imprimée	6
3.1.Le plan de masse	6
3.2.Le substrat diélectrique	6
3.3.L'élément rayonnant (patch)	6
4.Caractéristiques des antennes	7
4.1. Les coefficients réflexions S11	7
4.2.Bande passante	8
4.3.Impédance d'entrée	8
4.4.Rapport d'Onde Stationnaire (ROS)	8
4.5.Diagramme de rayonnement	9
4.6.Polarisation	9
4.7.Le rendement	10
4.8.Directivité	10
4.9.Gain	11
5.Techniques d'alimentation	11
5.1.Alimentation par contact	11
5.2.Alimentation sans contact	12

Liste des matières

6. Avantages et inconvénients des antennes imprimées	13
6.1. Avantages	13
6.2. Inconvénients	14
7. Les applications des antennes imprimées	14
9. Conclusion	15

Chapitre II: La rectenna

1. Introduction	20
2. La récolte d'énergie	20
3. Transmission d'énergie sans fil	20
3.1 Historique de la transmission d'énergie sans fil (TESF)	20
3.2. Définition	21
3.3 Principe	22
4. La Rectenna	23
4.1. Historique	23
4.2. Définition	23
4.3. Antenne de réception	24
4.4. Circuit de conversion RF-DC.	25
4.4.1. Structure et principe de fonctionnement du redresseur	25
4.4.2. Elemennt redresseur «diode schottky»	26
4.4.3. etude de l'impédance d'entrée du redresseur	27
4.5. Filtre de sortie DC	29
5. Techniques d'adaptation des antenne imprimeés	29
5.1. L'adaptation par quart d'onde	29
5.2. L'adaptation par STUB	30
5.3. L'adaptation avec encouche	30
6. Conclusion	31

Chapitre 3: Résultats et dicusion

1. Intoduction	35
2. Conception et simulation d'une antenne patch rectangulaire classique	35
2.1. Résultats de simulation de antenne patch	36

Liste des matières

2.1.1.Coefficient de réflexion	36
2.1.2.Diagramme de rayonnement	37
2.1.3.Gain et Directivité	39
3.L'antenne adaptée	39
3.1.Géométrie de 'antenne	40
3.1.1.Coefficient de réflexion	41
3.1.2.Diagramme de rayonnement	41
3.1.3.Gain et Directivité	43
4.Augmentation de l'épaisseur du substrat	44
4.1.Coefficient de réflexion	44
4.2.Diagramme de rayonnement	44
4.3.Gain et Directivité	46
5.Circuit d'adaptation	47
6.Conclusion	49
Conclusion Générale	52
Perspectives	52

Chapitre 1

Figure 1 : Structure de base d'une antenne micro ruban	6
Figure 2 : Divers types d'éléments rayonnants	7
Figure 3 : Bande passante et coefficient de réflexion.	8
Figure 4 : Exemples de polarisation.	10
Figure 5 : Antenne micro ruban alimentée par ligne micro ruban.	12
Figure 6 : Antenne micro ruban alimentée par sonde coaxial.	12
Figure 7 : Antenne micro ruban alimentée par fente.	13
Figure 8 : Alimentation du patch par couplage de proximité	13

Chapitre 2

Figure 1 : Transmission d'énergie sans fil.	22
Figure 2 : Principe d'un système de transmission d'énergie sans fil	22
Figure 3 : Schéma synoptique d'une chaîne de récupération d'énergie à base de rectenna	24
Figure 4 : Redresseur simple alternance.	26
Figure 5 : Redresseur double alternance	26
Figure 6 : Caractéristique diode normal contre diode schottky.	27
Figure 7: Impédance d'entrée du redresseur.	28
Figure 8: Diode Schottky non linéaire	28
Figure 9 : Abatteuse d'énergie complète avec sur scène le multiplicateur Dickson	29
Figure 10 : Adaptation par ligne quart d'onde.	30
Figure 11 : Stub en circuit ouvert.	30
Figure 12: Patch rectangulaire(a), L'équivalence en circuit(b), Patch adapté par encoches De Longueur (c).	30

Chapitre 3

Figure 1: Structure de l'antenne proposée (a) Vue de dessus (b) Vue de dessous.	36
Figure 2: Coefficient de réflexion de l'antenne patch rectangulaire	37
Figure 3 : Diagramme de rayonnement à 2.45 GHz (a) polaire ($\phi=0$) (b) plan polaire	38

Liste des figures

Figure 4 : Gain et directivité en fonction de la fréquence.	39
Figure 5 : Transformateur quart-d'onde	40
Figure 6 : Structure de l'antenne adaptée	41
Figure 7 : Coefficient de réflexion	41
Figure 8 : Diagramme de rayonnement à 2.45 GHz (a) polaire ($\phi=0$) (b) plan polaire ($\phi=90$) (c) plan 3D.	42
Figure 9 : Gain et directivité en fonction de la fréquence.	43
Figure 10 : Coefficient de réflexion	44
Figure 11 : Diagramme de rayonnement à 2.45 GHz (a) polaire ($\phi=0$) (b) plan polaire ($\phi=90$) (c) plan 3D	45
Figure 12 : Gain et directivité en fonction de la fréquence.	46
Figure 13: Détermination du circuit d'adaptation.	48
Figure 14 : circuit d'adaptation reliant l'antenne au redresseur.	48

Chapitre 3

Tableau 1 : Les équations d'antenne patch rectangulaire	35
Tableau 2 : Résumé des résultats de l'antenne.	39
Tableau 3 : Résumé des résultats de l'antenne.	43
Tableau 4 : Résumé des résultats de l'antenne	46

Liste des abréviations

CST : Computer Simulation Technology

TESF : Transmission d'Energie Sans Fil

GPS : Global Position System

DC: Direct Current

Wi-Fi: Wireless Fidelity

RF-DC : Régime alternatif -continue.

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans les applications de récupération d'énergie, les antennes redresseuses sont cruciales grâce à leur faculté de transformer le rayonnement électromagnétique en énergie électrique exploitable. Ces antennes sont essentielles pour optimiser l'efficacité des procédés de transformation d'énergie. Les antennes redresseuses, en garantissant une correspondance d'impédance optimale entre l'antenne et le redresseur, permettent de transformer une portion considérable de l'énergie recueillie en électricité exploitable [1]. Cette amélioration de la conversion énergétique est vitale pour optimiser les performances globales de la récupération d'énergie.

Un des principaux atouts des antennes redresseuses est leur aptitude à faciliter la transmission d'énergie sans fil. Ces antennes, exploitant le rayonnement électromagnétique comme les ondes radio ou les micro-ondes, facilitent l'alimentation à distance d'appareils sans besoin de connexions matérielles ou de batteries [2]. Cette compétence est d'une grande valeur dans les applications où changer ou maintenir les batteries est complexe ou peu fonctionnel, tels que les capteurs éloignés, les appareils portables ou les objets connectés (IoT). Les antennes de redressement offrent une méthode de transfert d'énergie sans fil efficace et commode pour la fourniture d'énergie aux dispositifs électroniques..

Une autre caractéristique essentielle des antennes redresseuses est leur capacité à collecter l'énergie ambiante issue de différentes sources. Ces dispositifs sont capables de capter et de transformer l'énergie perdue provenant des signaux radiofréquences (RF), des réseaux sans fil, des réseaux mobiles et d'autres émissions électromagnétiques présentes dans leur environnement. En exploitant ces ressources énergétiques aisément disponibles, les antennes redresseuses peuvent fournir de l'énergie à des appareils électroniques peu gourmands en énergie et participent ainsi à l'amélioration de l'efficacité énergétique et aux initiatives de durabilité [3]. L'aptitude à tirer parti de l'énergie disponible dans l'environnement ouvre des possibilités significatives pour diminuer la dépendance vis-à-vis des sources d'énergie traditionnelles et encourager le recours à des énergies non polluantes et renouvelables.

L'emploi d'antennes redresseuses ne se limite pas à apporter des bénéfices à certains domaines industriels, il participe aussi à des solutions énergétiques vertes au niveau mondial. Grâce à une récupération efficace de l'énergie ambiante, ces antennes constituent une substitution aux sources d'énergie conventionnelles, diminuant ainsi l'impact environnemental

Introduction Générale

associé à la destruction et au renouvellement des batteries. Ces dernières favorisent l'implémentation de solutions énergétiques durables, conformément aux buts d'efficacité énergétique et de sauvegarde de l'environnement [4].

La mémoire est organisée en trois chapitres principaux. Le premier chapitre présente les notions de base associées aux antennes, avec une focalisation particulière sur les antennes patch. Il traite de leur configuration initiale, de leurs spécificités, des diverses techniques d'approvisionnement, des technologies mises en œuvre, des méthodes d'étude, ainsi que de leurs points forts et faibles et des principaux secteurs d'utilisation.

Dans le deuxième chapitre, nous avons débuté par la définition de la récolte d'énergie, suivi d'une plongée dans l'histoire du transfert d'énergie sans fil. Nous avons ensuite exposé le concept de récupération d'énergie électromagnétique, puis discuté du rectenna, incluant une description détaillée de son schéma initial et de chaque composant. Nous avons abordé le sujet de l'adaptation à la fin de ce chapitre.

Enfin, le troisième chapitre est dédié à la conception et à la réalisation pratique d'une antenne redresseuse (rectenna) conçue spécifiquement pour la récupération d'énergie électromagnétique dans la bande de fréquence de 2.45 GHz. Le but de cette section est de démontrer la faisabilité de la récupération d'énergie ambiante à partir de sources Wi-Fi et autres dispositifs fonctionnant à cette fréquence. Les résultats de cette étude pourraient ouvrir la voie à une alimentation sans fil de capteurs et de dispositifs électroniques de faible puissance.

Chapitre I:

Généralités sur les antennes imprimées

Chapitre I

Généralités sur les Antennes imprimées

1. Introduction :

Les antennes imprimées, aussi appelées antennes planaires ou antennes à patchs ou antennes microbandes, sont des dispositifs électromagnétiques conçus pour émettre et recevoir des signaux radiofréquences constitués d'un patch métallique rayonnant placé sur une couche diélectrique, appelée substrat au-dessous de laquelle, se trouve une autre couche métallique agissant comme un plan de masse. Ces antennes sont appréciées pour leur petite taille, leur légèreté et leur simplicité de production, leur faible coût, leur poids léger et leur facilité d'intégration dans les appareils électroniques contemporains. Elles sont idéales pour des applications telles que les communications sans fil, les systèmes GPS, le radar ou l'Internet des objets (IoT).

Dans ce chapitre, nous suggérons quelques caractéristiques des antennes patchs, technologies d'antennes patchs, ainsi que différents types d'alimentation pour ces antennes et quelques avantages, les inconvénients et domaines d'utilisation.

2. Historique des antennes imprimées :

L'idée des antennes micro rubans a été initialement suggérée en 1953 par Deschamps aux États-Unis et en 1955 en France par Guttan et Baissimot [5]. Lewin a observé et analysé plus tard le phénomène de rayonnement issu des discontinuités dans les lignes de bandes en 1960 [5]. Dans les premières années 1970, Byron illustre une trajectoire rayonnante conductrice gravée sur un substrat diélectrique ($\epsilon_r < 10$), qui se fonde sur un plan de masse [6]. Par la suite, Howell a publié les caractéristiques des patchs rectangulaires micro-rubans. De son côté, Weinschel a élaboré diverses géométries de patchs micro-ruban pour une utilisation dans un réseau cylindrique [6]. Des recherches supplémentaires sur les composants fondamentaux du micro-ruban ont été publiées en 1975. Le travail de Nunson sur le développement des antennes micro rubans a démontré que c'était une idée utile qui s'applique à d'autres problèmes liés à différents systèmes d'antennes. Le modèle mathématique d'un micro-ruban simple a été initialement élaboré en utilisant l'analogie avec les lignes de transmission pour des patchs rectangulaires basiques. Corver a étudié le diagramme de rayonnement d'un patch circulaire et a publié ses résultats. En 1977, Lo et al. ont publié la

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

première étude mathématique concernant une large gamme de patches de micro-ruban. Vers la fin des années 70, l'utilisation des antennes micro-ruban s'est répandue dans différents systèmes de communication. Actuellement, on les retrouve fréquemment dans les téléphones, les ordinateurs mobiles ainsi que dans les systèmes intégrés (missiles, fusées, satellites, etc.).

3. Structure d'une antenne imprimée :

L'assemblage le plus basique d'une antenne microbande comprend un plan de masse, un substrat diélectrique défini à la fois par une permittivité électrique et une perméabilité magnétique, ainsi qu'un composant rayonnant de forme indifférente connu sous le nom de patch [7].

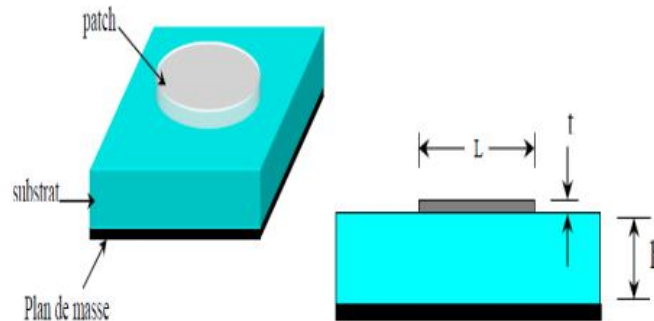


Figure 1 : Structure de base d'une antenne micro ruban

3.1. Le plan de masse :

C'est une surface conductrice en cuivre recouvrant la partie inférieure du Substrat. Elle permet de faire rayonner l'énergie vers l'espace libre à travers ce dernier, il est théoriquement de dimensions infinies, pratiquement de $3 \text{ à } 4 \lambda$ [8].

3.2. Le substrat diélectrique:

Le substrat diélectrique est une surface isolante d'épaisseur généralement inférieure à la longueur d'onde. Et de permittivité relative ($2,2 < \epsilon_r < 12$) Parfois, pour atteindre une efficacité élevée et large bande passante, il est préférable d'utiliser un substrat diélectrique de grande épaisseur et faible permittivité [9-10].

3.3. L'élément rayonnant (patch) :

L'élément rayonnant est une plaque métallique conductrice de forme quelconque appelée l'élément rayonnant, déposé sur la face supérieure du Substrat diélectrique. Les formes

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

régulières (rectangle, cercle, triangle, Anneaux) Sont les plus couramment utilisées à cause de leur facilité d'analyse [9-10].

Les divers types d'éléments rayonnants les plus simples sont indiqués sur la figure suivante :

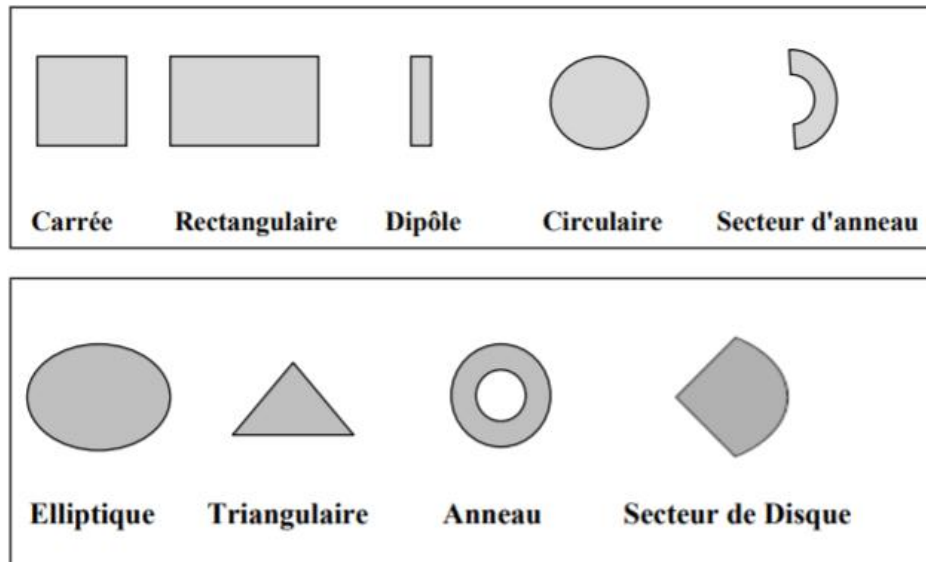


Figure 2: Divers types d'éléments rayonnants

Certaines formes peuvent être plus complexes et ardues à décortiquer, car elles résultent fréquemment de l'union de deux formes basiques. On les utilise généralement dans des applications particulières. La sélection de la configuration de l'antenne est liée à l'application ciblée et aux critères que nous cherchons à améliorer : la bande passante, le rendement et minimiser les intensités des lobes secondaires.

4. Caractéristiques des antennes:

Dans le domaine des communications sans fil, chaque application a des exigences particulières : les caractéristiques de l'antenne. En général, une antenne conçue pour une application particulière ne peut pas être utilisée dans d'autres applications, car chaque antenne est conçue pour répondre aux exigences uniques de l'application spécifique. Les caractéristiques de l'antenne sont déterminées par [11] :

4.1. Les coefficients réflexions S11 :

Le coefficient réflexion est un paramètre qui exprime une quantité d'énergie perdue par la charge et non réfléchi [12]. Le coefficient de réflexion est donné par :

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

$$S_{11} = \frac{V_r}{V_i} = \frac{z_{in}-z_s}{z_{in}+z_s} \quad (1)$$

v_r : Onde réfléchie.

v_i : Onde incidente.

z_{in} : Impédance d'entrée de l'antenne.

z_s : Impédance caractéristique.

4.2. Bande passante :

La bande passante d'une antenne désigne la gamme de fréquence sur laquelle l'antenne peut fonctionner correctement. Elle représente le nombre Hz pour lesquels l'antenne représente un taux inférieur à 2 (ce qui équivaut à presque -10dB de la courbe des coefficients de réflexion) [13].

$$BW\% = \frac{\text{fréquence supérieure} - \text{fréquence inférieure}}{\text{fréquence de résonance}} \times 100 = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100 \quad (2)$$

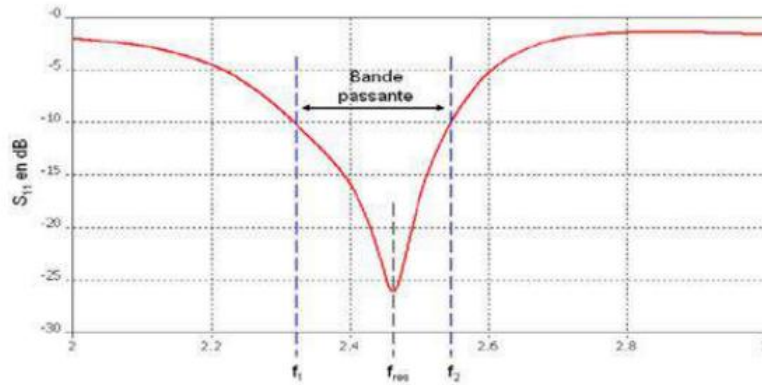


Figure 3 : Bande passante et coefficient de réflexion.

4.3. Impédance d'entrée de l'antenne [14]:

L'impédance d'entrée est l'impédance vue du côté de la ligne d'alimentation.

Cette impédance est donnée par l'équation:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{(1+S_{11})}{(1-S_{11})} \quad (3)$$

z_0 = impédance caractéristique de la ligne d'alimentation.

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

4.4. Rapport d'Onde Stationnaire (ROS) [11] :

La Relation entre les amplitudes maximales et minimales du motif d'ondes stationnaires le long d'une ligne de transmission où une charge est branchée. Le ROS peut prendre des valeurs allant de un (pour une charge appariée) à l'infini, en cas de court-circuit ou de circuit ouvert. Pour la majorité des antennes, le ROS maximal toléré est de deux. La relation entre le ROS et le coefficient de réflexion Γ est la suivante :

$$ROS = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (4)$$

4.5. Diagramme de rayonnement :

La puissance émise par unité d'angle solide dans les diverses orientations spatiales s'appelle diagramme de rayonnement de l'antenne. Il existe souvent une orientation de rayonnement maximale où se concentre la majorité de la puissance émise, ainsi que des orientations secondaires où se diffuse le reste de cette puissance.

L'antenne, grâce à sa fonction caractéristique de rayonnement $F(\theta, \Phi)$, offre une perspective complète du rayonnement. Elle est définie comme le quotient de la puissance transmise dans une direction spécifique $P(\theta, \Phi)$ par rapport à la puissance maximale P_{max} de la direction où le rayonnement atteint son maximum [12].

$$P_0(\theta, \phi) = \frac{P_{\alpha}}{4\pi} \quad (5)$$

4.6. Polarisation:

La polarisation d'une antenne se réfère, par convention, à la direction du champ électrique $\vec{E}$. Si la direction reste stable au fil du temps, on parle alors de polarisation linéaire. Toutefois, des antennes émettent un champ électrique dont l'orientation change au fil du temps. Ainsi, si l'on représente de manière schématique les positions successives de E à un instant donné, l'extrémité du vecteur représentatif trace un cercle ou une ellipse. On parle alors de champ émis à polarisation circulaire ou elliptique. Cela inclut notamment les antennes utilisées dans le radar et les télécommunications spatiales.

C'est le cas de la plupart des antennes composées d'éléments rayonnants linéaires, en particulier les antennes à dipôles, couramment utilisées dans les bandes des ondes métriques et décimétriques .

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

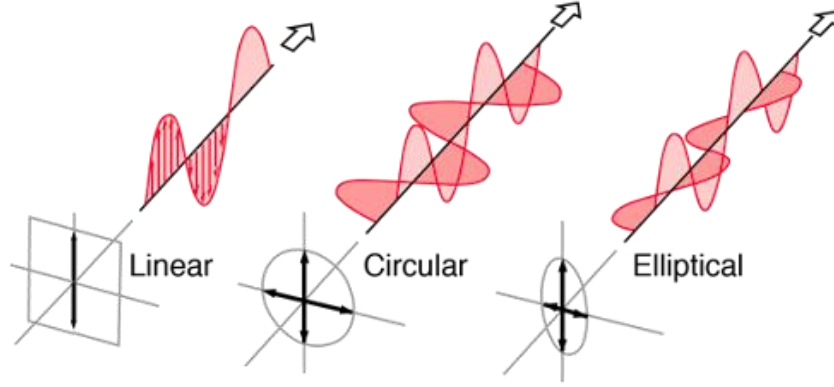


Figure 4 : Exemples de polarisation.

4.7. Le rendement :

Le rendement d'une antenne correspond au rapport entre l'énergie qu'elle rayonne et l'énergie fournie par son système d'alimentation. Il s'exprime selon la relation suivante [15]:

$$\eta = \frac{R_r}{(R_r + R_p)} \quad (6)$$

R_r : la résistance de rayonnement.

R_p : la résistance de perte. θ

Il est aussi exprimé par :

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} \quad (7)$$

P_r : Puissance rayonnée.

P_a : Puissance fournie à l'antenne.

4.8. Directivité :

On qualifie une antenne de plus ou moins directive selon sa capacité à concentrer l'énergie rayonnée dans une direction donnée. Pour quantifier cette propriété, on introduit la notion de directivité. La directivité $D(\theta, \phi)$ d'une antenne, dans la direction (θ, ϕ) , est définie comme le rapport entre la puissance rayonnée dans cette direction, $P(\theta, \phi)$, et la puissance qu'émettrait une antenne isotrope dans cette même direction [16]

$$D(\theta, \phi) = \frac{U_{max}}{U_{moy}} = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{P_{ray}}{4\pi}} \quad (8)$$

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

θ et φ représentent respectivement l'angle d'élévation et l'angle d'azimut.

4.9. Gain :

L'un des paramètres majeurs d'une antenne directionnelle est le gain ; l'énergie est moins importante dans certaines directions, tandis qu'elle l'est davantage dans d'autres. L'évaluation du gain d'une antenne se fait en comparant la puissance qu'elle émet avec celle qui lui est transmise. Les deux antennes, qui sont alimentées en omnidirectionnelle, sont désignées par ϕ [12].

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_t / 4\pi R^2} = 4\pi R^2 \frac{P(\theta, \varphi)}{\iint P(\theta, \varphi)} \quad (9)$$

P : Densité de puissance rayonnée par l'antenne directive (W/m²).

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

P_0 : Densité de puissance rayonnée par l'antenne isotrope (W/m²).

5. Techniques d'alimentation :

L'alimentation des antennes patches constitue un aspect essentiel dans la démarche de conception. Dans ce contexte, diverses approches ont été considérées. On peut les classer en deux catégories majeures :

- Les alimentations par contact (par sonde ou ligne micro ruban).
- Les alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente) [16].

5.1. Alimentation par contact :

❖ Alimentation par ligne micro-ruban :

Dans cette approche de fourniture d'énergie, la ligne micro-ruban est connectée directement à l'élément rayonnant. Bien que cette ligne soit généralement de taille réduite comparée à l'antenne patch, elle possède le mérite d'être gravée sur le substrat, offrant ainsi des surfaces planes. Assurément, cette méthode est la moins onéreuse, extrêmement simple à mettre en œuvre, et la modélisation est envisageable [16].

C'est l'une des méthodes employées dans les antennes imprimées. Son atout réside dans sa facilité de fabrication et sa simplicité d'adaptation à la résonance. Cependant, elle a pour désavantage de générer une radiation indésirable [18].

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

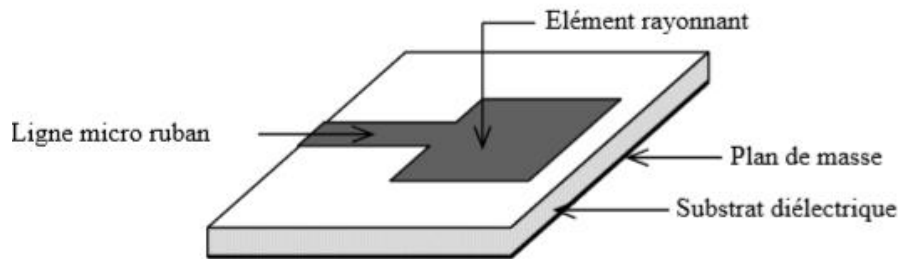


Figure 5 : Antenne micro ruban alimentée par ligne micro ruban.

❖ Alimentation par sonde coaxial :

La sonde coaxiale est conçue en établissant un contact direct entre l'élément rayonnant du conducteur central et le substrat ainsi que le plan de masse (Figure6). Ce genre de nutrition est aisé à mettre en œuvre, il offre l'option d'implanter la sonde coaxiale à n'importe quel endroit. Cependant, il propose une bande passante limitée. [19]

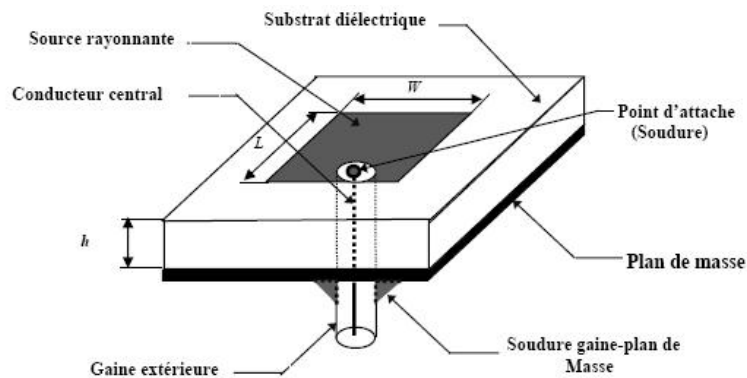


Figure 6 : Antenne micro ruban alimentée par sonde coaxial.

5.2. Alimentation sans contact :

❖ Alimentation couplée par fente (ouverture) :

Dans ce mode d'alimentation, le patch micro-ruban et la ligne d'alimentation sont séparés par le plan de masse comme indiqué sur (Fig7). L'interconnexion entre le patch et la ligne d'alimentation s'effectue via une ouverture ou un trou dans le plan de masse. Habituellement, on se sert de matériaux à haute permittivité pour le substrat inférieur, tandis que les matériaux à faible constante diélectrique sont favorisés pour le substrat supérieur dans le but d'optimiser l'émission du patch [20].

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

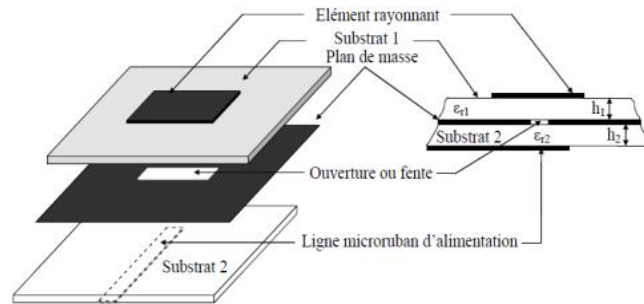


Figure 7 : Antenne micro ruban alimentée par fente

❖ Alimentation couplée par proximité :

Ce mode d'alimentation, illustré à la **Figure 8**, utilise deux substrats diélectriques : la ligne d'alimentation est insérée entre les deux substrats, tandis que le patch rayonnant est placé sur le substrat supérieur [21]. Ce type de configuration permet d'obtenir une bande passante optimale. Cependant, son principal inconvénient réside dans la complexité de sa mise en œuvre [22].

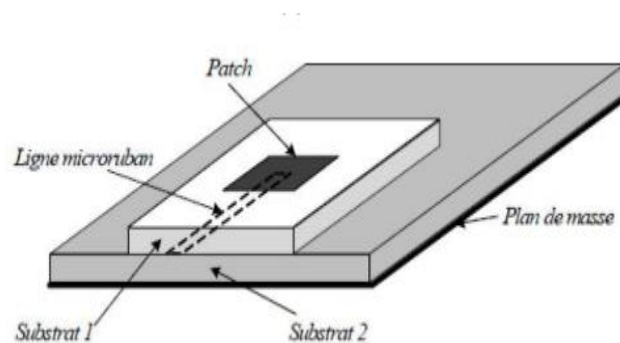


Figure 8 : Alimentation du patch par couplage de proximité.

6. Avantages et inconvénients des antennes imprimées :

6.1. Avantages:

- Les antennes patch sont plus petites, légères et ont un profil bas, ce qui les rend adaptées aux appareils et applications compacts.
- Facilité de fabrication : Ils peuvent être facilement gravés sur les circuits imprimés, ce qui permet une fabrication et un dépannage simples pendant la conception et le développement. Le motif de microbandes visible facilite la fabrication et l'intégration avec d'autres composants.

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

- Rentable : Les antennes patch ont des coûts de fabrication inférieurs, ce qui permet une production de masse et un déploiement rentable.
- Bandes de fréquences et polarisation : Ils peuvent prendre en charge plusieurs bandes de fréquences, des opérations à double et triple fréquence, et des types de polarisation linéaire et circulaire.
- Les antennes patch s'intègrent aisément aux circuits intégrés micro-ondes (MIC) et présentent une bonne robustesse mécanique lorsqu'elles sont installées sur des surfaces rigides.

6.2. Inconvénients:

- La largeur de bande est généralement restreinte, se situant entre 1 et 5% (pour les éléments résonants présentant une géométrie simple).
- faible gain.
- Facteur qualité Q supérieur, variant approximativement entre 50 et 75.
- Sont limitées à l'acheminement de faibles niveaux de puissance.
- Rendement limité de surface.
- Problèmes de tolérance de production peuvent survenir si les motifs imprimés sont de petite taille.
- Danger de rayonnement indésirable dû aux connexions avec l'alimentation ou à la restriction du plan de masse.
- Difficulté d'élaborer des antennes à haute pureté de polarisation

7. Les applications des antennes imprimées :

En raison de l'essor technologique dans le domaine des télécommunications et des avancées constantes dans la recherche sur les antennes imprimées, les antennes micro-ondes classiques ne parviennent plus à satisfaire les exigences croissantes du secteur. Ainsi, les antennes à microbandes tendent à les remplacer dans la majorité des applications [23]. Parmi ces applications, on peut citer :

Télécommunications par satellites ,Commande et contrôle ,Télémessure par missile et Equipements portatifs...ext.

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons discuté des concepts de développement technologique, de l'importance des antennes microbiennes et des critères spécifiques pour le fonctionnement et les performances de ce type d'antenne, c.-à-d. les paramètres de composition et de type d'alimentation en énergie. Nous avons également mis l'accent sur l'antenne microstrip et les méthodes de son analyse, ainsi que sur leurs avantages et inconvénients, et son domaine d'application.

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

Bibliographie

- [1] Valenta, C.R., Durgin, G.D. : Récolte de l'énergie sans fil : étude de l'efficacité de conversion des dispositifs de récupération d'énergie dans les systèmes de transfert d'énergie sans fil à champ lointain. IEEE Microwave Magazine, vol. 15, n° 4, pp. 108–120 (2014).
- [2] Georgiou, O., Mimis, K., Halls, D., Thompson, W.H., Gibbins, D. : Combien de points d'accès Wi-Fi faut-il pour allumer une ampoule ? IEEE Access, vol. 4, pp. 3732–3746 (2016).
- [3] Mimis, K., Gibbins, D., Dumanli, S., Watkins, G.T. : Essai de récolte d'énergie RF ambiante en milieu domestique. IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 9, n° 5, pp. 454–462 (2015).
- [4] Jabbar, H., Song, Y.S., Jeong, T.T. : Système et circuits de récolte d'énergie RF pour la recharge des appareils mobiles. IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 56, n° 1, pp. 247–253 (2010).
- [5] K. R. Carver and J. W. Mink, "Microstrip Antenna Technology," IEEE Trans. Antennas Propagat. ,Vol. AP-29, No. 1, pp. 2–24, January 1981.
- [6] I. J. Bahl and P. E. Bhartia, "Microstrip antenna". Dedham, MA : Artech House, 1980.
- [7] Abia. B,"Contribution à l'étude des antennes microstrip Supraconducteur de forme triangulaire", Mémoire de Magistère en Micro-ondes. Université Mentouri. Constantine 2010.
- [8] Boualem Mekimah,"Etude du fonctionnement en mode bifréquence des patches microbandes empilés et excentrés," Mémoire de magister, Université KasdiMerbah Ouargla, 2013
- [9] Paul F. Combes, « Micro-ondes tome II circuits passifs, propagation, antennes, » Dunod, Paris, 2-10-002753-0, 1997
- [10] Mekimah, Boualem, Abderraouf Messai, and Tarek Djerafi. " Amélioration des caractéristiques des patches microbandes pour les applications ultra large bande." PhD diss., Université Frères Mentouri- Constantine 1, 2020.
- [11] Leila Chouitti, « contribution à l'étude d'antenne imprimées rectangulaires Doubles bandes et multi-bandes tenant compte de l'effet de couplage », Thèse Magistère, Institut d'électronique, Université de Constantine, 2009

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

- [12] BENAROUSSI HANANE PRESENTED AND PUBLISHED, "Study and conception of an antenna in the UHF band", FINAL PROJECT THESIS, UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA Faculty of Sciences and new communication technologies Department of Electronics, 2024
- [13] Makarov, S.N., "Antenna and EM Modeling with MATLAB", John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [14] Barkat Ouarda « Etude et synthèse des caractéristiques de réseaux d'antennes imprimées supraconductrices dans la bande millimétrique » Thèse de doctorat de l'université Mentouri Constantine décembre 2009.
- [15] Alaeddine AL-FAWAL « Conception et Réalisation de Réseaux d'Antennes pour les Mesures de Propagation et de Transmission Application aux Réseaux de Communication sans Fil UMTS, WLAN, WLL ET HIPERLAN/2 », Diplôme d'Ingénieur en Electricité et Electronique, Faculté de Génie I, Université Libanaise, Beyrouth, Liban, 2001.
- [16] R. L. Yadava, "Antenna and Wave Propagation," PHI Learning Pvt. Ltd., 2011.
- [17] Alexandre Boyer, "Antennes", Support de cours Enoncé de travaux dirigés, Institut National des sciences Appliquées de Toulouse, Octobre 2011.
- [18] Mr ROUHA Mustapha, "L'effet des caractéristiques de l'antenne patch sur sa directivité", Mémoire de Fin d'étude, Université A. Mira de Béjaia, Faculté de Technologie, Département de Génie Électrique 2014
- [19] Abba Behloul, « Contribution à l'étude des antennes microstrip Supraconducteur de forme triangulaire » mémoire de magister en électronique De l'université Mentouri CONSTANTINE Avril 2010
- [20] A.K. Bhattacharyya, "Long rectangular patch antenna with a single feed," IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. 38, N°. 7, pp. 987-993, July 1990.
- [21] C. A. Balanis, "Antenna Theory : Analysis and Design", John Wiley & Sons, Inc., Third Edition, 2005.
- [22] LALMI Hadda, "Conception et simulation d'un réseau d'antennes microrubans circulaires pour les applications radar", Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mohamed Khider Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Electrique, 2015.

Chapitre I : généralités sur les antennes imprimées

[23] ABDELLAOUI WAHIBA, CHERGUI FARIDA, '' Etude de l'antenne patch rectangulaire par le modèle de la cavité'', MEMOIRE DE FIN D'ETUDES, Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU, Département d'Electronique,2012.

Chapitre II :

La Rectenna

Chapitre II

La Rectenna

1. Introduction :

La Rectenna est importante à l'ère de la technologie moderne, où la demande pour des sources d'énergie alternatives et durables augmente. Cette technologie peut jouer un rôle crucial dans la réduction de la dépendance aux batteries traditionnelles et fournir de l'énergie aux petits appareils électroniques. Elle se compose de deux éléments principaux : l'antenne qui capte les signaux électromagnétiques, et le redresseur qui transforme le courant alternatif résultant de ces signaux en courant continu. Cette technologie est utilisée dans une variété d'applications, allant des systèmes de Communication sans fil aux technologies de transmission d'énergie sans fil.

2. Récolte d'énergie :

La récolte d'énergie est une méthode qui récupère l'énergie de l'environnement afin de la transformer en énergie électrique [1][2]. Cette énergie peut être une énergie mécanique provenant des vibrations et des déformations ; une énergie thermique produite par les fours et autres dispositifs de chauffage ; une énergie solaire captée sous diverses formes, comme l'éclairage ou la lumière du soleil ; une énergie électromagnétique qui est recueillie à travers des bobines et transformateurs ; ainsi que l'énergie éolienne et fluide, dérivée du mouvement de l'air et des liquides. De plus, il y a l'énergie humaine générée par les mouvements corporels, la peau humaine et le sang, sans oublier l'énergie chimique issue des processus biologiques [3]

3. La transmission d'énergie sans fil (TESF) :

3.1. Historique :

En 1899, le physicien américain Nikola Tesla a effectué la première expérience de transmission d'énergie sans fil à Colorado Springs. Il s'est particulièrement penché sur le phénomène de résonance et a tenté de l'intégrer à la Théorie Électromagnétique des Systèmes Finis. Il avait envisagé d'utiliser des ondes électromagnétiques pour transmettre de l'électricité n'importe où sur Terre, sans nécessiter de câbles. Il a érigé une immense bobine, vibrant à 150 KHz et alimentée par une puissance de 300 KW, au sommet d'une tour. Malheureusement, il n'y a pas de résultats précis concernant la puissance émise et celle reçue à distance de la source.

Les activités de Tesla n'ont pas cessé à Colorado Springs. À l'aube du siècle passé, Tesla érigea une tour de transmission à Long Island, (New York). Le projet a été abandonné juste avant sa conclusion en raison de difficultés financières. Au cours de la première moitié du 20^{ème} siècle, l'absence d'intérêt pour le sujet de la TESF peut être attribuée à l'insuffisance des ressources techniques, notamment en ce qui concerne les sources capables de produire d'importantes puissances à des fréquences élevées.

Peter Glaser a introduit l'idée du SPS (Système d'Énergie Solaire) en 1969. Ce projet pourrait offrir une solution aux problèmes énergétiques mondiaux, tout en agissant comme une source d'énergie propre et respectueuse de l'environnement. Le projet a donné naissance à un système intégrant un satellite en orbite géostationnaire qui recueille l'énergie solaire. Cette énergie solaire est ensuite convertie en micro-ondes de 2,45 GHz avant d'être transmise sur Terre. Les antennes de réception sont soumises à des densités de puissance considérables, approximativement 100 W/m².

L'expérimentation terrestre de Goldstone réalisée par Raytheon en 1975 constitue un jalon déterminant dans l'histoire de la TESF. Elle a apporté une contribution significative à la confirmation de l'idée et à la crédibilité du projet SPS. Grâce à un dispositif de pilotage, une puissance constante de 30 KW a été récupérée et une efficacité globale de 54% a été établie et certifiée [Figure 1]. L'écart entre les antennes qui transmettent et reçoivent est de 1,6 km. [4]

3.2. Définition :

La transmission d'énergie sans fil (TESF, également connue sous le nom de Wireless Energy Transmission, WET, ou Wireless Power Transfer, ou Wireless Power Transmission, WPT) est une méthode qui permet de transmettre de l'énergie électrique sans recourir à un support physique. Cette méthode est conçue pour être employée soit pour fournir de l'énergie à des endroits difficilement accessibles, soit pour recharger des appareils portables (véhicules, téléphones, etc.). À l'inverse de la transmission de données, où l'objectif est de maximiser la quantité transmise, le rendement est le critère déterminant pour la transmission d'énergie, car il dicte le choix des différentes méthodes.

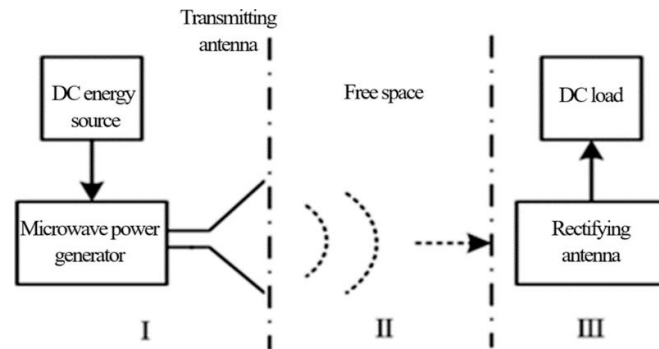


Figure 1 : Transmission d'énergie sans fil.

3.3 Principe :

La télé-alimentation ou transmission d'énergie sans fil se réfère à la diffusion d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Elle implique une source d'énergie (génération d'un signal alternatif), un environnement de propagation (généralement l'air) et un dispositif de récupération d'énergie (Figure 2).

Ce concept a suscité des investissements considérables, en particulier pour des applications à très haute puissance (de quelques centaines à plusieurs milliers de kW). Ces recherches ont démontré que la puissance requise pour atteindre un tel niveau de performance n'est pas réaliste. Néanmoins, pour les applications qui nécessitent une faible à modérée quantité d'énergie, la télé-alimentation représente une option très séduisante. C'est en se basant sur ce concept que la technologie d'identification par radiofréquence, également connue sous le nom de RFID, a commencé à se développer à partir des années 90. Un lecteur ou Reader fournit à une étiquette ou tag RF, en même temps que sa demande, l'énergie requise pour leur interaction.

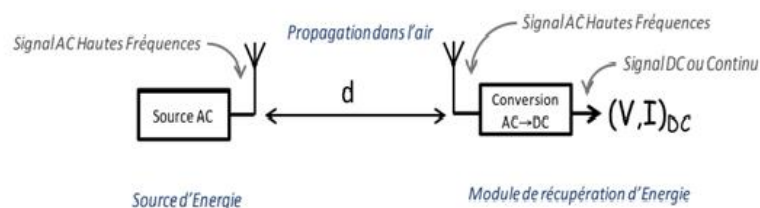


Figure 2 : Principe d'un système de transmission d'énergie sans fil

4. Rectenna :

4.1. Historique :

Premières études sur les rectennas se sont concentrées sur la bande ISM à 2,45 GHz avec une application principale dans le domaine spatial. Le choix de cette fréquence n'était pas aléatoire, car cette bande présente une faible atténuation dans l'atmosphère.

En 1960, Raytheon a développé une rectenna à 2,45 GHz, avec une antenne dipôle demi-onde et un circuit de conversion RF-DC contenant une diode simple connectée à une charge résistive. Le rendement de conversion est un paramètre clé pour les circuits rectennas, défini comme le rapport entre la puissance continue récupérée et la puissance RF reçue par l'élément rayonnant. Depuis les premiers travaux, le rendement de conversion a augmenté, atteignant en 1977 (W.C. Brown) les 90,6% grâce à l'utilisation d'une diode Schottky en Arséniure de Gallium-Platine et d'une antenne dipôle en aluminium.

En 1982, Brown et J.F. Triner ont développé une version imprimée du circuit avec un rendement de 85%, Cependant, pour occuper moins d'espace, les chercheurs ont commencé à explorer des fréquences plus élevées.

En 1991, K. Chang et T.W. Yoon ont conçu une rectenna intégrée à 35 GHz qui présente une efficacité de 33% pour des puissances d'entrée avoisinant les 60 mW. Cette rectenna comprenait une antenne dipôle et une diode Schottky disposées en parallèle. En dépit des défis liés à la fréquence de 35 GHz, comme une efficacité réduite et des coûts accrus, les scientifiques ont commencé à adopter une nouvelle fréquence de 5,8 GHz en 1992 afin d'éviter ces désagréments.

La première rectenna dans la bande C à 5,87 GHz a été rapportée avec un rendement de 80%. D'autres travaux ont été rapportés par la suite, notamment une rectenna développée en technologie CPS (Coplanar Stripline) avec un dipôle imprimé à 5,8 GHz et un rendement de 82% mesuré. En utilisant cette fréquence plus élevée, les dimensions des circuits peuvent être réduites sans perdre en efficacité. [5]

4.2. Définition:

Une antenne redresseuse, également appelée rectenna, est une variante spécifique d'antennes réceptrices utilisée pour transformer l'énergie électromagnétique en courant continu (DC). On la retrouve essentiellement Dans les systèmes de transmission d'énergie sans fil (WPT) ou les dispositifs de récupération d'énergie ambiante (Energy Harvesting). Une rectenna élémentaire est une antenne dipôle associée à une diode RF en amont. La diode

transforme le courant alternatif produit par l'antenne en courant continu, qui ensuite alimente une charge connectée à la diode. Les diodes Schottky sont souvent utilisées pour ce genre d'applications en raison de leur tension de seuil basse. Ces diodes démontrent également une réduction des pertes lors de la conduction et de la commutation.[6] .La figure 8 illustre un circuit standard de récupération d'énergie basé sur une rectenna.

- Antenne réceptrice.
- Circuit redresseur.
- Filtre DC.
- Charge (RL).

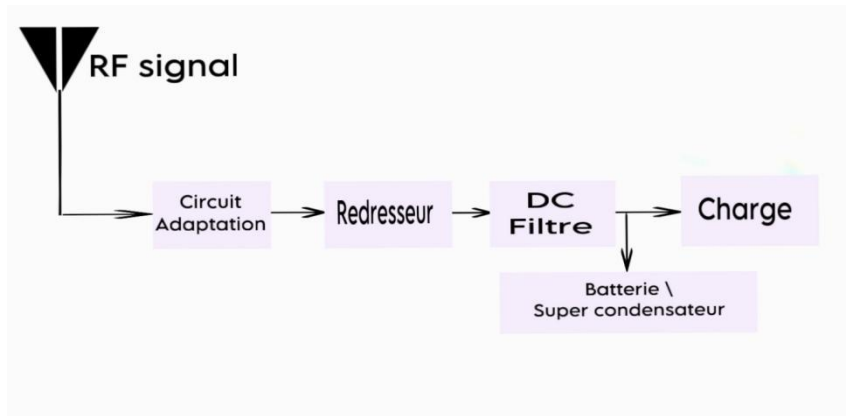


Figure 3 : Schéma synoptique d'une chaîne de récupération d'énergie à base de rectenna .

Le système de récupération d'énergie fonctionne comme suit : l'antenne de réception capte l'énergie électromagnétique présente dans l'espace libre et la transmet au circuit redresseur. Ce dernier, généralement composé d'une ou plusieurs diodes, convertit l'énergie RF en énergie continue (DC) avant de l'acheminer vers la charge RL. Toutefois, en plus de générer une tension continue, le redresseur produit également des harmoniques indésirables. Pour atténuer ces composantes parasites, un filtre passe-bas (filtre DC) est inséré entre le redresseur et la charge afin de ne laisser passer que le signal continu.

4.3. Antenne de réception :

Le rôle de l'antenne est de convertir l'énergie électrique du signal en énergie. L'électromagnétisme, ou à l'autre extrême, la conversion de l'énergie électromagnétique en énergie électrique. Un équipement émetteur est un matériel qui transmet de l'énergie de l'émetteur vers la zone libre où cette énergie sera diffusée. À l'inverse, une antenne réceptrice est un dispositif assurant le transfert de l'énergie des ondes propagées dans l'espace vers

l'appareil qui reçoit. Dans le domaine de la récupération d'énergie et de la conception de rectennas, l'orientation de l'antenne est un élément essentiel.[8]

4.4. Circuit de conversion RF – DC :

Afin d'alimenter les dispositifs électroniques à faible puissance en tension continue, il faut convertir l'énergie radiofréquence captée par l'antenne réceptrice en une énergie électrique continue. Pour cela un redresseur RF-DC est nécessaire pour la conception d'un système de rectenna puisqu'il permet d'effectuer cette conversion avec une efficacité la plus élevée possible.

La conversion RF-DC est un processus non-linéaire où des diodes ou des transistors peuvent être utilisés. Toutefois, dans le cas de la récupération d'énergie électromagnétique (les faibles niveaux de puissance), les diodes Schottky sont plus utilisées que les transistors qui présentent des tensions de seuil élevées ce qui limite les performances des rectennas. [9]

4.4.1. Structure et principe de fonctionnement du redresseur:

Un redresseur est un circuit électronique qui convertit un courant alternatif en un courant continu afin d'alimenter une charge. Dans le domaine de la récupération d'énergie RF, les redresseurs à diodes, également connus sous le nom de redresseurs non commandés, sont les dispositifs les plus couramment utilisés. Il existe deux types de redresseurs : les redresseurs à simple alternance et les redresseurs à double alternance.

Le redresseur à simple alternance utilise une diode unique en série avec une charge pour éliminer les alternances négatives du signal tout en laissant les alternances positives intactes (circuit de la figure 4).

La figure 10 présente une redresseuse double alternance qui est constitué d'un pont de diodes appelé pont de Graetz. Ce dernier permet de convertir les tensions négatives en tensions positives par commutation entre les diodes conductrices. En effet, lorsqu'une tension d'entrée positive est appliquée, Les diodes D1 et D4 passent, et lorsque la tension entrante est négative, les diodes D2 et D3 conduisent, assurant une commutation efficace [9] .

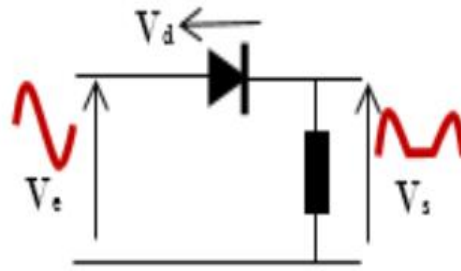


Figure 4 : Redresseur simple alternance.

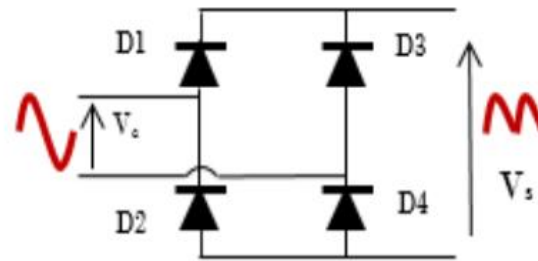


Figure 5 : Redresseur double alternance.

4.4.2. Élément redresseur « Diode Schottky »:

Dans le domaine des hyperfréquences, les diodes, notamment les diodes Schottky, sont les composants idéaux adoptés pour la conception des circuits de rectification impliqués dans la rectenna en raison de certaines propriétés. En effet, les diodes Schottky sont caractérisées par une tension de seuil très faible située dans la gamme de 0.15 V à 0.45 V, ce qui les rend très sensible aux faibles densités de puissance délivrés par l'antenne. En outre, elles possèdent un temps de transition assez court grâce à leur très faible capacité de jonction (inférieure au pF), ce qui les rend très rapides en commutation. Ces caractéristiques justifient l'utilisation très répandue des diodes Schottky dans les applications micro-ondes.

Dans les diodes Schottky, une jonction métal - semi-conducteur est formée entre un métal et un semi-conducteur dont le dopage du substrat est de type P ou N. Grâce à cette jonction deux situations peuvent être distinguées. L'une est la création d'une zone de contact ohmique où la barrière d'injection des charges entre le métal et le semi-conducteur est négligeable, ce qui permet la circulation libre des porteurs de charge, et le courant électrique passe ainsi dans les deux sens de polarisation. Ainsi, une zone d'accumulation (zone riche en porteurs majoritaires) est formée à l'interface métal-semi-conducteur après le contact. L'autre concerne l'établissement d'une barrière de Schottky qui vise à résister au flux de courant électrique du métal vers le semi-conducteur, entraînant la formation d'une zone de charge

d'espace dans ce second matériau et une autre zone avec une polarité contraire sur la surface du métal. La barrière de potentiel formée à la périphérie de l'interface entre le métal et le semi-conducteur est conductrice en mode direct, tout en empêchant la circulation des électrons lors de la polarisation inverse jusqu'à atteindre un claquage.[9]

Le rapport de redressement, la tension de seuil, la capacité de jonction et la résistance série sont les paramètres les plus importants pour évaluer la diode. En comparaison avec les transistors, les diodes possèdent des capacités de jonction plus faibles. Comme il a été mentionné auparavant, les diodes doivent avoir une très faible tension de seuil pour résoudre la problématique des faibles niveaux de puissance RF disponibles.

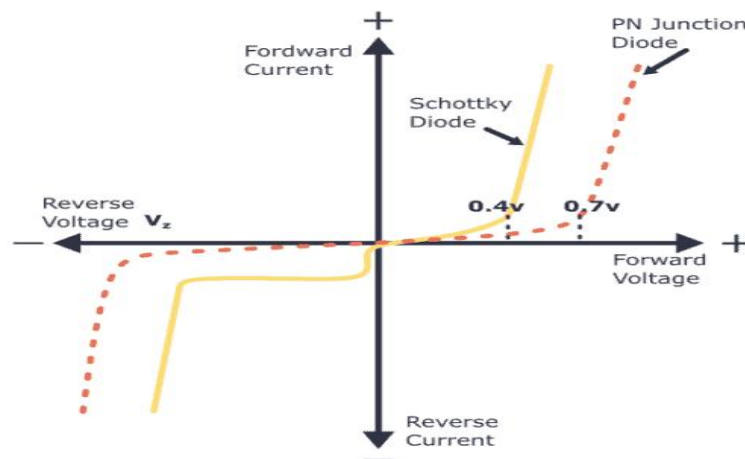


Figure 6:Caractéristique diode normal contre diode schottky. [10]

4.4.3. Etude de l'impédance d'entrée de redresseur:

Le choix du circuit de réseau correspondant dépend des exigences telles que la sortie plus élevée ou une bande passante plus large, mais l'efficacité du réseau correspondant Elle change avec le changement d'impédance de sortie. Dans les moissonneuses-batteuses, la charge est l'impédance d'entrée du redresseur.

Dans ce travail, une structure simple d'un multiplicateur de tension de Dickson à base de diodes Schottky a été utilisée comme redresseur pour un collecteur de puissance RF. Le choix du redresseur dépend de la fréquence et de la puissance du signal RF d'entrée. La diode Schottky emballée est modélisée comme R_j non linéaire ; (résistance de jonction) est transformée par C_j non linéaire, (capacité de jonction). V_j , est la tension traversant la résistance de jonction. R_s , est la résistance de propagation du courant, L_p et C_p est l'inductance et la capacité d'emballage [11]. La capacité et l'inductance différencient l'action

des diodes Schottky aux basses et hautes fréquences. La résistance de la jonction R_j est donnée par l'équation. (1) [11]

$$R_j = \frac{\eta \alpha}{I_s + I} \quad (1)$$

Où η , α et I_s sont le facteur d'idéalisation de la diode, la tension thermique et le courant de saturation inverse de la diode. Le courant ampère (I) change avec l'entrée RF

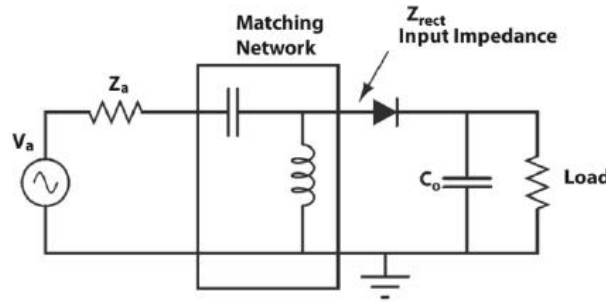


Figure 7 : Impédance d'entrée du redresseur.

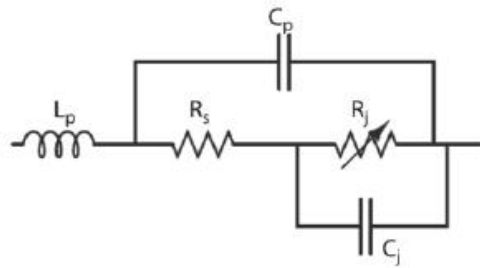


Figure 8 : Diode Schottky non linéaire

Où n , α et I_s sont le facteur d'idéalisation de la diode, la tension thermique et le courant de saturation inverse de la diode. Le courant ampère (I) change avec l'entrée RF.

Le niveau de puissance P_{in} affecte la résistance de jonction (R_j) et donc l'impédance totale de la diode Schottky. A partir de la figure 13, l'impédance totale (Z_{rec}) de la diode Schottky peut être écrite comme : équation (2).[11]

$$Z_{rec} = j\omega L_p + \left(\frac{\left\{ \frac{R_j}{1+j\omega R_j C_j} + R_s \right\} \frac{1}{j\omega C_p}}{\left\{ \frac{R_j}{1+j\omega R_j C_j} + R_s \right\} + \frac{1}{j\omega C_p}} \right) \quad (2)$$

Pour l'évaluation exacte de l'impédance d'entrée, une diode à un étage Dickson le circuit redresseur RF-DC . Dans ce circuit, le modèle non linéaire de la diode HSMS2850 Schottky a été utilisé à la place de D1 et D2 car il fonctionne mieux à de faibles niveaux de puissance d'entrée et à haute fréquence[11].

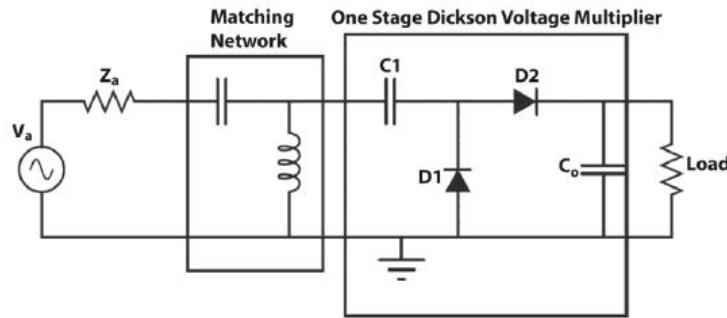


Figure 9 : Abatteuse d'énergie complète avec sur scène le multiplicateur Dickson.

4.5. Filtre de sortie DC :

Le filtre de sortie DC est un dispositif important dans la conception des circuits de redressement, et il est généralement placé après le redresseur. Ce filtre fonctionne comme un filtre de passage avec une capacité parallèle qui lui permet de bloquer les signaux harmoniques à haute fréquence, tout en ne laissant passer que la composante continue du courant continu. La présence d'un filtre DC est nécessaire pour optimiser les performances des diodes en éliminant les perturbations RF (Radio Fréquence) indésirables et en fournissant une tension DC stable et propre pendant la charge [12]

5. Techniques d'adaptation des antennes imprimées :

Toute installation qui transforme l'énergie sur une ligne de transmission exige un ajustement ; la ligne modifie l'impédance de charge en une autre valeur d'impédance à la sortie de la source. Ainsi, ce que détecte la source est affecté par l'impédance de la charge, la longueur électrique du câble et son impédance caractéristique.[13]

5.1. L'adaptation par quart d'onde :

Dans l'élaboration de circuits hyperfréquences, on vise fréquemment l'adaptation, c'est-à-dire la conversion à une impédance distincte (qui correspond souvent à l'impédance caractéristique) de celle qui est obtenue en bout de circuit.[13]

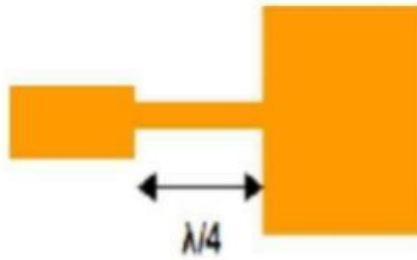


Figure 10: Adaptation par ligne quart d'onde.

5.2. L'adaptation par STUB :

Une autre méthode pour parvenir à l'adaptation d'une charge quelconque est d'utiliser un stub. Par le biais d'un stub qui peut être ouvert ou en court-circuité. On privilégie généralement l'option qui occupe le moins d'espace. On peut effectuer le raisonnement en termes d'impédance, mais il est préférable d'adopter dès le début l'admittance pour additionner les impédances parallèles converties .[13]

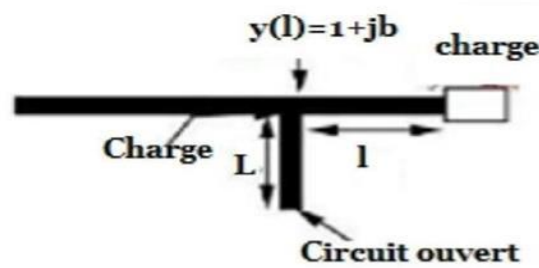


Figure 11 : stub en circuit ouvert

5.3. Adaptation avec encoches :

Pour adapter l'antenne, on utilise des encoches, il suffit de modifier la géométrie du Patch ou les dimensions des encoches. [13]

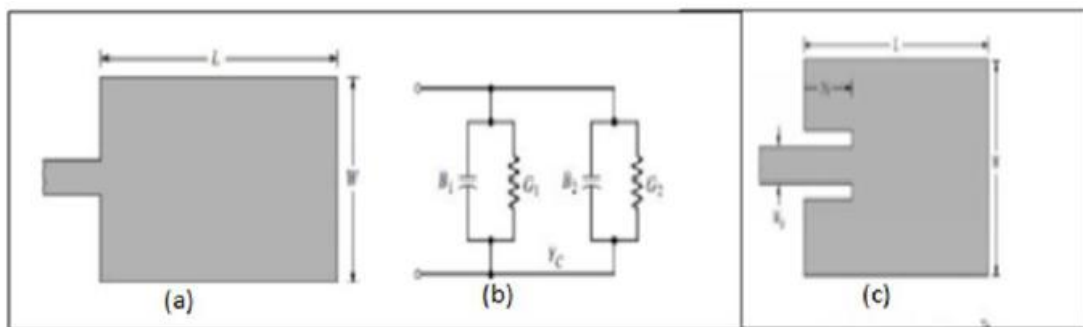


Figure 12 : Patch rectangulaire(a), L'équivalence en circuit(b), Patch adapté par encoches De Longueur (c).

6. Conclusion :

Ce chapitre présente un aperçu de la technologie Rectenna, employée pour transformer l'énergie électromagnétique en électricité, notamment dans le cadre d'applications telles que la transmission d'énergie sans fil et la récupération d'énergie ambiante. Il décrit sa composition, son mode de fonctionnement, et son histoire évolutive, tout en soulignant l'efficacité de conversion et la contribution des diodes Schottky. Pour optimiser les performances, diverses configurations de circuits redresseurs et techniques d'adaptation d'impédance ont été examinées. La Rectenna se présente donc comme une option intéressante pour fournir de l'énergie aux appareils à faible consommation dans des environnements intelligents et sans fil.

Bibliographie

- [1] L. Mateu and F. Moll, "Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics (Keynote Address)," in *Microtechnologies for the New Millennium 2005*, 2005, pp. 359-373
- [2] P. R. Bhaskaran, J. D. Rathnam, S. Koilmani, and K. Subramanian, "Multiresonant Frequency Piezoelectric Energy Harvesters Integrated with High Sensitivity Piezoelectric Accelerometer for Bridge Health Monitoring Applications," *Smart Materials Research*, vol. 2017, 2017.
- [3] M. K. Stojčev, M. R. Kosanović, and L. R. Golubović, "Power management and energy harvesting techniques for wireless sensor nodes," in *2009 9th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable, and Broadcasting Services*, 2009, pp. 65- 72.
- [4] Hakim TAKHEDMIT, <Modélisation et Conception de Circuits de Réception Complexes pour la Transmission d'Énergie Sans Fil à 2.45 GHz> THESE de doctorat 18 octobre 2010
- [5] H. TAKHEDMIT, Modélisation et Conception de Circuits de Réception Complexes pour la Transmission d'Énergie Sans Fil à 2.45 GHz..
- [6] Guler, Ulkuhan; Sendi, Mohammad S.E.; Ghovanloo, Maysam (2017). "A dual-mode passive rectifier for wide-range input power flow". *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. pp. 1376–1379.
- [7] Abdelmalek Reddaf, ,'' Modeling of Schottky diode and optimal matching circuit design for low power RF energy harvesting'' Research article, Electrical Engineering Department, University of Business and Technology, ArRawdah, Jeddah, 23435, Saudi Arabia. Department of Electrical Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Kaohsiung 807618,.
- [8] Z.Saddi, Conception d'un dispositif de récupération d'énergie mixte vibratoire-électromagnétique pour l'alimentation des dispositifs à faible consommation, Paris-Est, 2016.
- [9] S. E. F. MBOMBOLO, "Etude et conception d'une rectenna pour un transfert d'énergie sans fil point à point par faisceaux micro-ondes", mémoire de maîtrise, université du QUÉBEC à Rimouski, Mars 2012.

[10] Optimisation de diodes Schottky pour les applications THz Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay préparée à l'Université Paris-Sud Thèse présentée et soutenue à Orsay, le 23 octobre 2018.

[11] papier : Analysis of RF-DC Rectifier Input Impedance for the Appropriate Design of Matching Network for Wireless RF Energy Harvesters, chapter 5

[12] Optimisation de diodes Schottky pour les applications THz Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay préparée à l'Université Paris-Sud Thèse présentée et soutenue à

[13] Fouad Benamrane<< Conception d'une antenne Patch Microstrip>> online master thesis, University of Sidi Mohamed Ben Abdellah (Fès) Morocco, 2011

Chapitre III :

Résultats et discussion

Chapitre III

Résultats et discussion

1. Introduction :

Avec l'augmentation de l'utilisation des appareils sans fil et la multiplication des réseaux Wi-Fi dans différents contextes, les ondes électromagnétiques ambiantes se sont transformées en une source potentielle d'énergie réutilisable. Ce secteur est désigné sous le terme de récolte d'énergie électromagnétique (RF Energy Harvesting). Dans ce processus, l'énergie dégagée par les signaux sans fil est convertie en énergie électrique pouvant alimenter des appareils à faible consommation comme les capteurs sans fil et les dispositifs de l'Internet des objets (IOT). Dans ce chapitre, nous allons concevoir et simuler une antenne de patch rectangulaire qui fonctionne dans la bande de fréquences wifi (2,45 GHz). Le logiciel de simulation CST Studio Suite a été utilisé pour analyser les performances de l'antenne et améliorer ses paramètres de base tels que le gain, la bande passante et le rendement.

2. Conception d'une antenne patch 2.45 GHz :

Le tableau 1 représente les équations permettant de calculer les dimensions d'une antenne patch rectangulaire à micro-ruban. Par la suite, une optimisation de ces dimensions a été effectuée afin d'obtenir les performances souhaitées, en utilisant le logiciel de simulation électromagnétique CST.

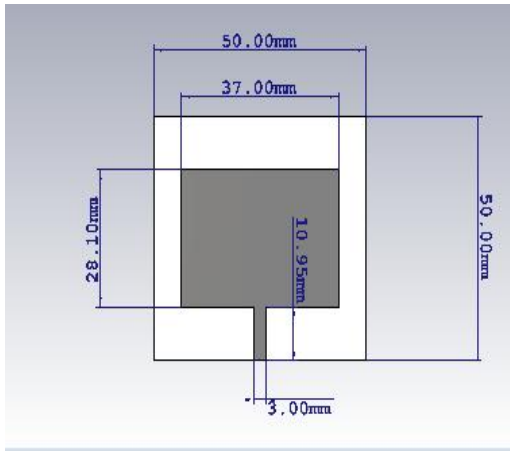
Tableau 1 : Les équations d'antenne patch rectangulaire.

Paramètres		Equations
Patch	Largeur	$W_p = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$
	Fréquence de résonance	$fr = \frac{c}{2l_{eff} \sqrt{\epsilon_{eff}}}$
	Constant diélectrique(ϵ_{eff})	$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{\frac{1}{2}}$

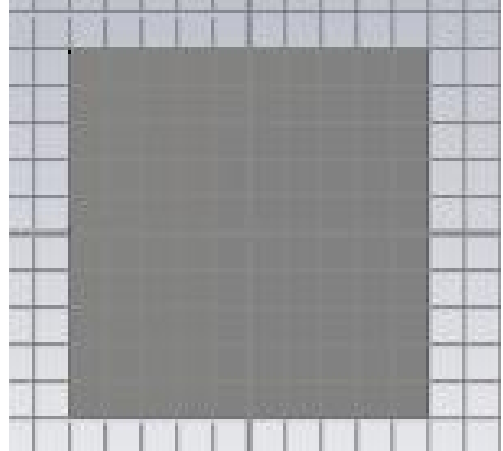
Chapitre III : Résultats et discussion

	Longueur	$L_p = L_{eff} - 2\Delta L$
	Extension rectangulaire de la longueur (ΔL)	$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_r - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)}$
Substrat et plan de masse	Longueur	$L_{sub} = L_p + 6h + LI1$
	Largeur	$W_{sub} = W_p + 6h$
	Quarte d'onde	$LI2 = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{reff}}}$

La géométrie de l'antenne est illustrée dans la figure 1. Elle se compose d'un patch de forme rectangulaire mesurant $W_p = 37$ mm et $L_p = 28.1$ mm, qui est imprimé sur la surface supérieure d'un substrat FR4 ayant une permittivité relative de 4.3 et une épaisseur de $h = 1.6$ mm, avec une longueur $L_{sub} = 50$ mm et une largeur $W_{sub} = 50$ mm. Pour alimenter le patch, on utilise une ligne microruban mesurant $LI1 = 10,95$ mm de long et $W1 = 3$ mm de large.



(a)



(b)

Figure 1 : Structure de l'antenne (a) Vue de dessus (b) Vue de dessous.

2.1. Résultats de simulation d'antenne :

2.1.1. Coefficient de réflexion :

La figure 2 illustre les fluctuations du coefficient de réflexion en lien avec la fréquence. On peut affirmer que la fréquence de fonctionnement est actuellement établie à 2.45 GHz

Chapitre III : Résultats et discussion

avec une adaptation efficace (un $|S_{11}|$ d'environ -13.925 dB). La bande passante correspondante ($|S_{11}| < -10\text{dB}$) mesurée est de 100 MHz

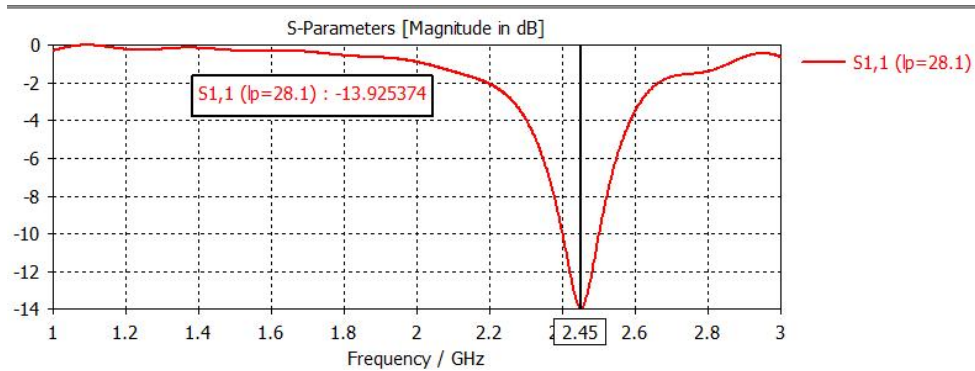
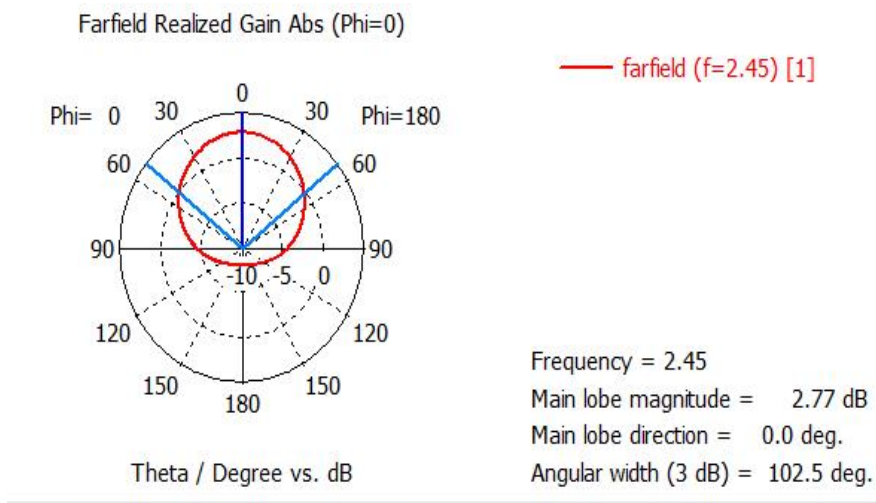


Figure 2 : Coefficient de réflexion de l'antenne patch rectangulaire

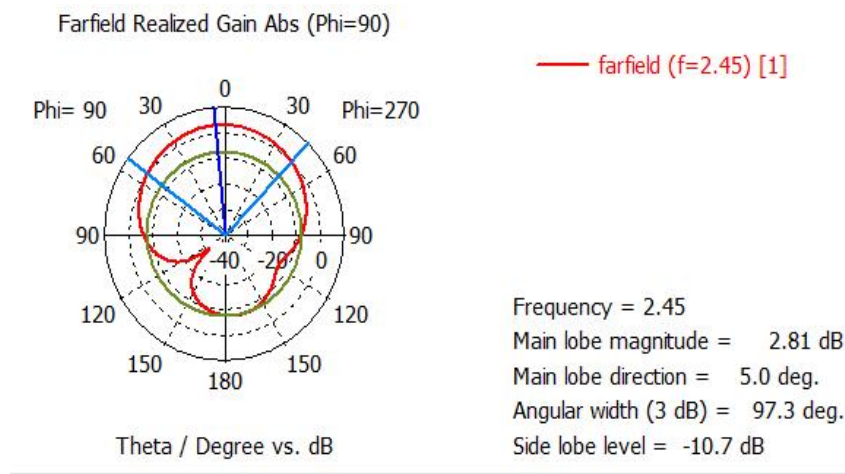
2.1.2. Diagramme de rayonnement :

La figure 3 représente les caractéristiques radiatives de l'antenne conçue. , Diagrammes de rayonnement simulés La fréquence de résonance est 2.45ghz.

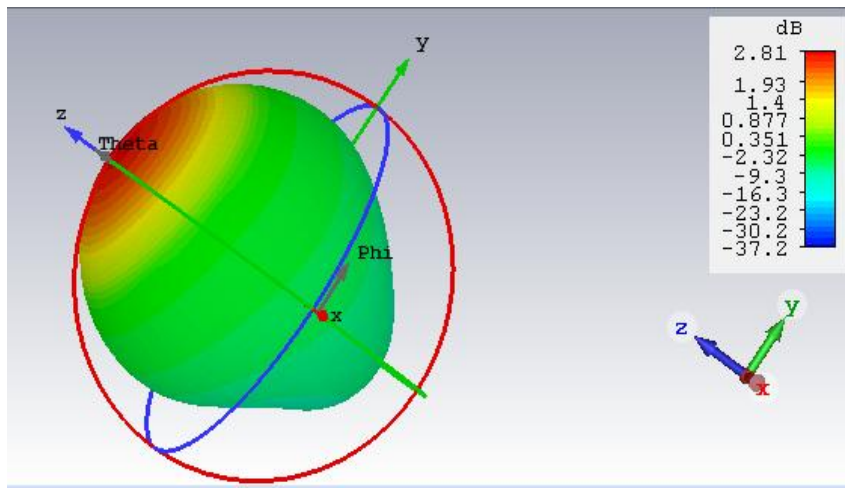


(a)

Chapitre III : Résultats et discussion



(b)



(c)

Figure 3 : Diagramme de rayonnement à 2.45 GHz (a) phi=0, (b) phi=90, (c) plan 3D.

plan	3D	phi=90	phi=0
gain	2.81dB	2.81dB	2.77dB

2.1.3. Gain et directivité :

La figure 4 représente le gain et la directivité de l'antenne en fonction de fréquence.

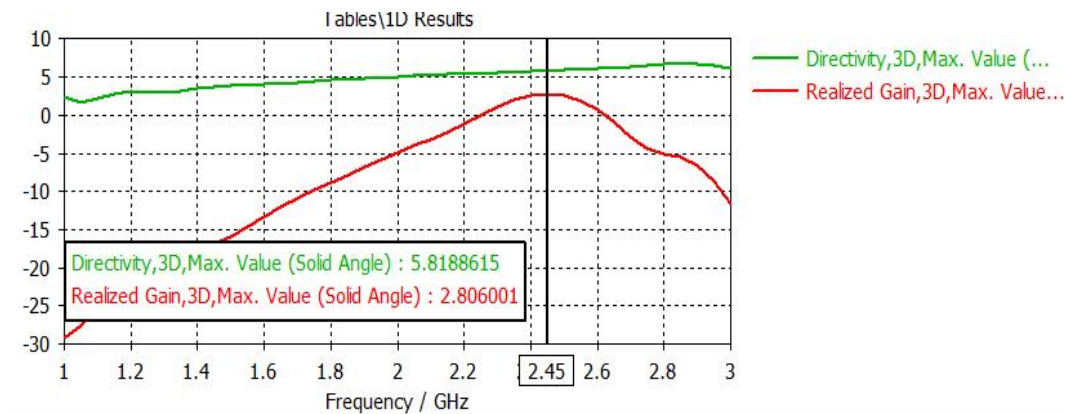


Figure 4 : Gain et directivité en fonction de la fréquence.

Les résultats de simulation sont présentée sur ce tableau :

Tableau 2 : Résumé des résultats de l'antenne.

Spécifications	Antenne
Dimension (mm)	50×50
S1.1 (dB)	-13.92
Bande passante (MHz)	100
Gain (dB)	2.80
Directivité (dB)	5.81
Efficacité (%)	50%

Cette antenne présentée des performances faibles en termes d'efficacité et de gain à cause de la mauvaise adaptation entre la ligne d'alimentation et le patch mais la bande passante est suffisante pour couvrir la bande wifi (2.412GHz 2.484GHz) .

3. L'antenne adaptée :

Pour adaptée la ligne d'alimentation avec le patch nous alleu utiliser le méthode d'adaptation avec un tronçon de linge quart d'onde pour celle nous alleu utiliser algorithme de Legendre.

3.1. Géométrie de l'antenne :

Méthode de calcul pour un transformateur quart d'onde a 3 sections.

Calcul de pas (step)

$$\text{step} = \left(\frac{z_L}{z_0} \right)^{\frac{1}{N}}$$

Calcul d'impédance d'entrée de chaque tronçon ($\lambda/4$) :

$$z_i(1) = \text{step} \cdot z_0$$

$$z_i(n) = \text{step} \cdot z_i(n-1) ; n=2 : N$$

$$z_i(N) = z_L = R_L$$

Calcul de l'impédance caractéristique de chaque section est :

$$Z(n) = \sqrt{z_i(n-1)z_i(n)} ; n=2 : N$$

$$z_i(0) = z_0 : \text{Impédance de la source}$$

Valeurs calculées

$$Z1=66.14 \quad ; \quad Z2=115.75 \quad ; \quad Z3=202.57$$

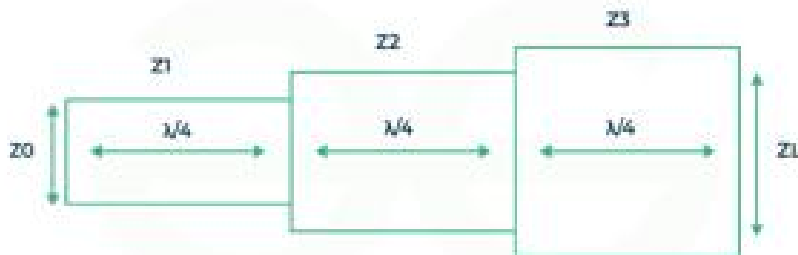


Figure 5 : Transformateur quart-d'onde

La figure 6 illustre la configuration de l'antenne modifiée. Elle comprend un patch de forme rectangulaire ayant des dimensions $W_p = 65.50$ mm et $L_p = 41.46$ mm, placé sur la surface supérieure d'un substrat Rogers RT 5880 LZ doté d'une permittivité relative de 1.96 et

Chapitre III : Résultats et discussion

d'une épaisseur $h = 1.575$ mm, avec une longueur $L_{sub} = 80$ mm et une largeur $W_{sub} = 117.40$ mm.

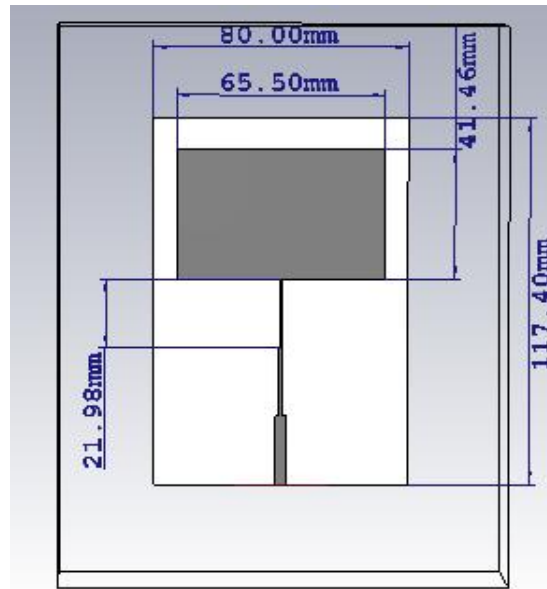


Figure 6 : Structure de l'antenne adaptée

3.1.1. Coefficient de réflexion :

La figure 7 illustre les fluctuations du coefficient de réflexion en lien avec la fréquence. Il est désormais possible d'affirmer que la fréquence de fonctionnement se situe autour de 2.448 GHz avec une adaptation satisfaisante ($|S_{11}|$ environ -22.18 dB). La bande passante correspondante ($|S_{11}| < -10$ dB) observée est de 56 MHz.

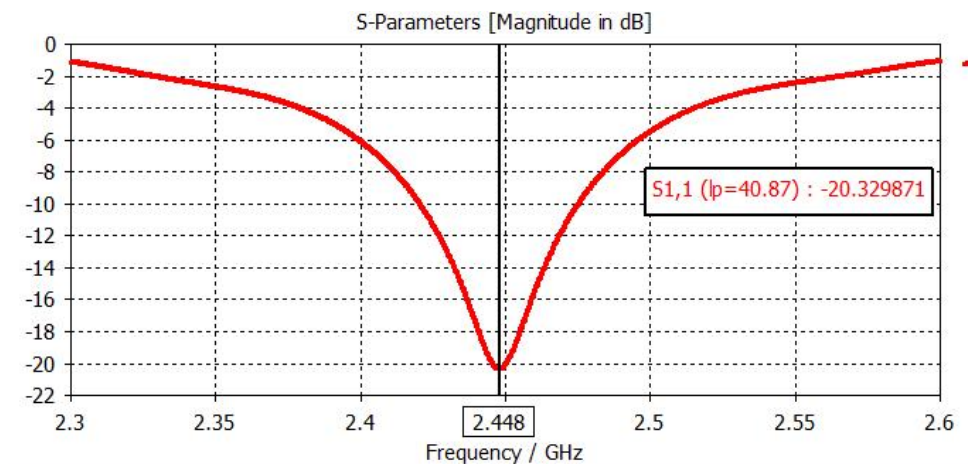
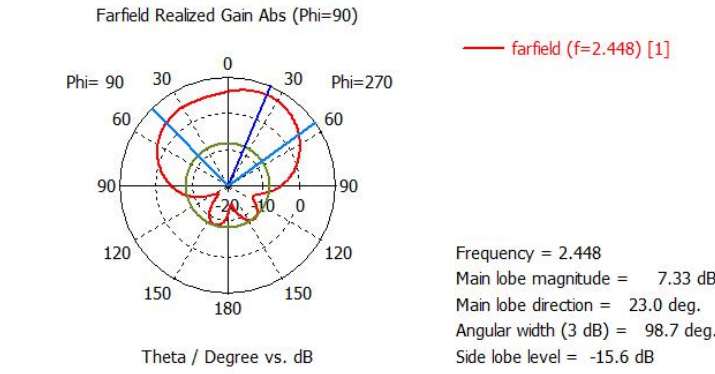


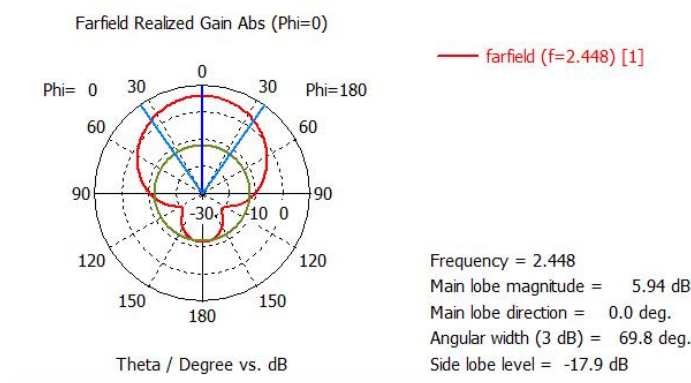
Figure 7 : Coefficient de réflexion

3.1.2. Diagramme de rayonnement :

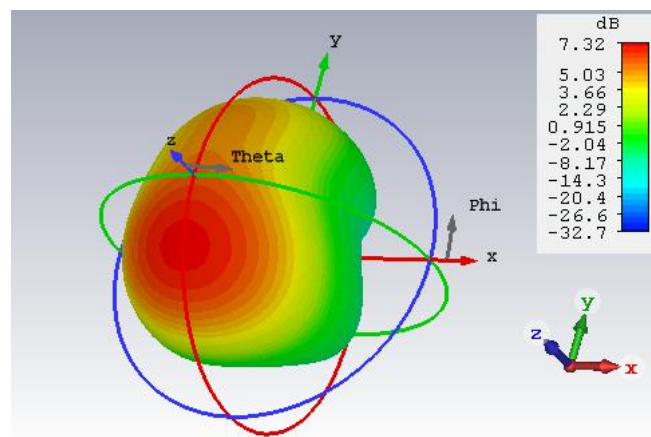
La figure 8 représente les caractéristiques radiatives de l'antenne conçue. , Diagrammes de rayonnement simulés La fréquence de résonance est 2.45ghz.



(a)



(b)



(c)

Figure 8 : Diagramme de rayonnement à 2.45 GHz (a) polaire (phi=90) (b) plan polaire (phi=0) (c) plan 3D.

Chapitre III : Résultats et discussion

plan	3D	phi=90	phi=0
gain	7.32dB	7.33dB	5.94dB

3.1.3. Gain et directivité

La figure 9 représente le gain et la directivité de l'antenne en fonction de fréquence.



Figure 9 : Gain et directivité en fonction de la fréquence.

Les résultats de l'antenne sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3 : Résumé des résultats de l'antenne.

Spécifications	Antenne optimisée
Dimension (mm)	80 × 117.40
l'épaisseur (mm)	1.575
S1.1 (dB)	-22.18
Bande passante (MHz)	56
Gain (dB)	7,32
Directivité (dB)	7,75
Efficacité (%)	90%

Les résultats ont montré une amélioration significative dans la plupart des caractéristiques par rapport à l'antenne précédente, comme une augmentation significative a été enregistrée

Chapitre III : Résultats et discussion

dans le Gain, la directivité et l'efficacité, ce qui indique une meilleure performance et une plus grande efficacité du rayonnement. Cependant, nous notons que la bande passante est devenue plus étroite (seulement 56 MHz), ce qui peut limiter l'utilisation de l'antenne pour couvrir la gamme de fréquences Wi-Fi.

4. Augmentation de l'épaisseur du substrat :

Parmi les techniques adoptées pour améliorer la bande passante, l'augmentation de l'épaisseur de la base est l'une des méthodes efficaces. Le même type de base RT Rogers LZ a été adopté, avec une épaisseur de $h = 4,318$ mm, selon la documentation technique de Rogers.

4.1. Coefficient de réflexion :

La figure 10 illustre les changements du coefficient de réflexion selon la fréquence. Il est possible d'affirmer que la fréquence de fonctionnement est désormais centrée sur 2.448 GHz avec une adaptation satisfaisante ($|S_{11}|$ avoisinant le -38.59dB). La largeur de bande mesurée est de 110 MHz, avec un rapport S11 inférieur à -10dB.

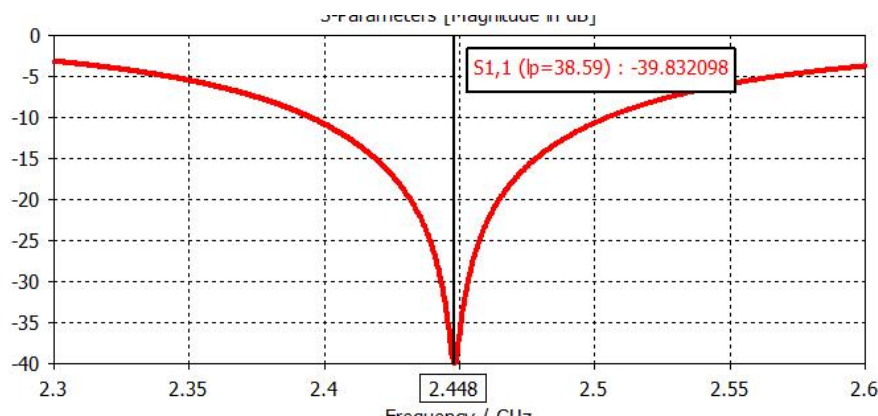
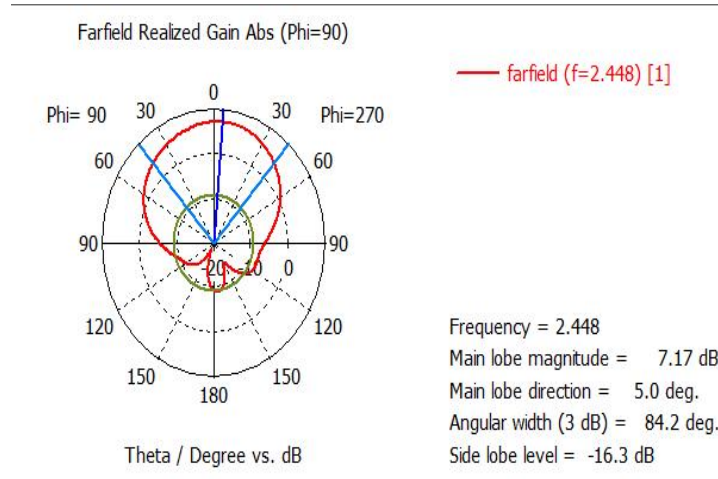


Figure 10 : Coefficient de réflexion.

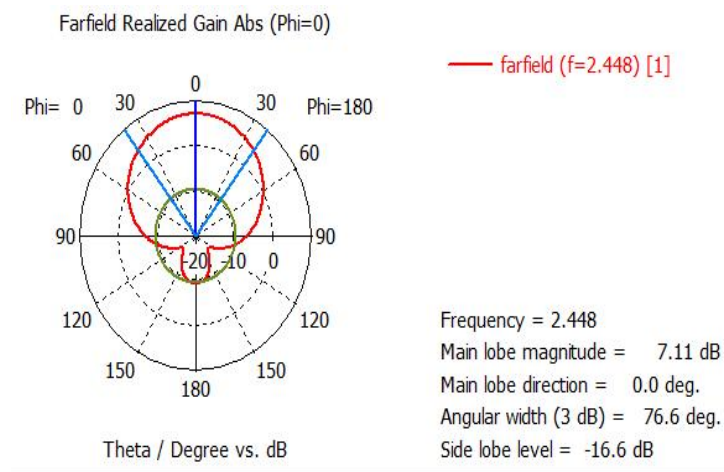
4.2. Diagramme de rayonnement :

La figure 11 représente les caractéristiques radiatives de l'antenne conçue. , Diagrammes de rayonnement simulés La fréquence de résonance est 2.45ghz.

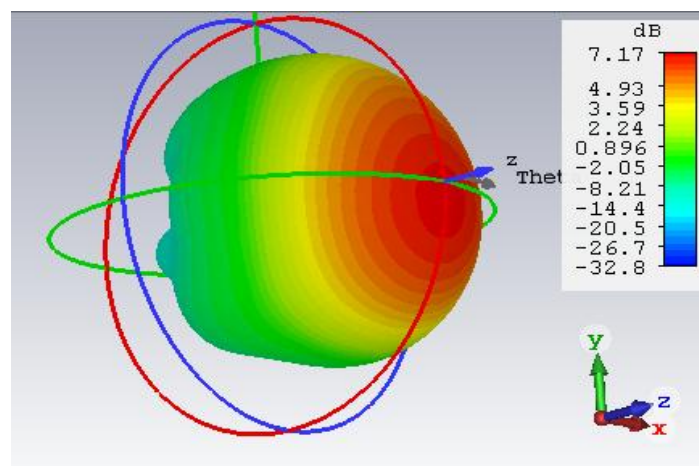
Chapitre III : Résultats et discussion



(a)



(b)



(c)

Figure 11 : Diagramme de rayonnement à 2.45 GHz (a) phi=90, (b) phi=0, (c) plan 3D.

Chapitre III : Résultats et discussion

Plan	3D	phi=90	phi=0
Gain	7.17 dB	7.17 dB	7.11B

4.3. Gain et directivité :

La figure 12 représente le gain et la directivité de l'antenne en fonction de fréquence.

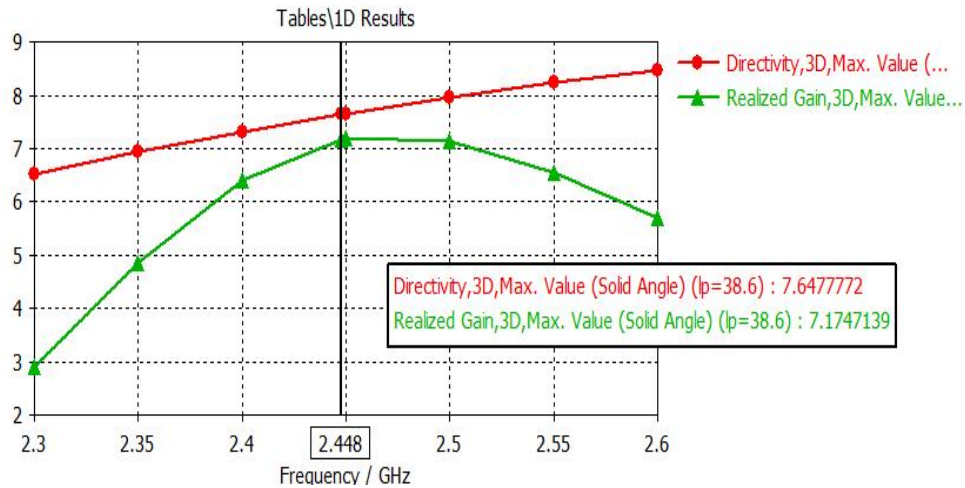


Figure 12 : Gain et directivité en fonction de la fréquence.

Les résultats de l'antenne optimisée sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4 : Résumé des résultats de l'antenne.

Spécifications	Antenne optimisée
Dimension (mm)	80 × 117.40
l'épaisseur (mm)	4.318
S1.1 (dB)	-39.83
Bande passante (MHz)	110
Gain (dB)	7,17
Directivité (dB)	7.65
Efficacité (%)	89%

Chapitre III : Résultats et discussion

Les résultats ont montré une amélioration significative des caractéristiques de l'antenne, où nous constatons que la bande passante est devenue plus large (110 MHz), ce qui rend l'antenne capable de couvrir la gamme des fréquences Wi-Fi. Nous observons également une légère diminution du gain, de la directivité et de l'efficacité, en raison de l'augmentation de la taille de la base.

5. Circuit d'adaptation:

Pour notre conception, nous avons choisi la diode schottky HSMS-2850 dont les caractéristiques électriques et mécaniques sont données par [1]. Le redresseur peut être un simple redresseur à une diode, comme il peut être un redresseur à N étages. Les redresseurs à N étages sont appelés des multiplicateurs de tension.

Pour notre cas, nous avons pris un redresseur à 1 étage, appelé doubleur de tension, qui est composé de 2 diodes schottky HSMS-2850 et de 2 condensateurs [2]. L'impédance d'entrée est $Z_{in} = 5.9896 - j118 \Omega$, avec une impédance de charge de $1 M\Omega$. Nous allons maintenant procéder à l'adaptation de l'impédance du redresseur avec l'impédance de l'antenne qui est égale à 50Ω . Nous avons choisi le réseau d'adaptation « L », parmi les autres réseaux « π » et « T », car il est simple (ne demande que 2 composants) et elle offre une bande passante meilleure que celles des autres réseaux.

Le réseau « L », lui-même, est composé de 4 configurations série/parallèle ou parallèle/série composés d'éléments passif inductifs ou capacitifs.

En utilisant l'abaque de Smith, le circuit d'adaptation est déterminé (figure 13). Ce circuit est composé d'une inductance parallèle $L = 5.75 nH$ et un condensateur série $C = 0.193 pF$. Ces valeurs sont déterminés à la fréquence $2.45 GHz$

Les éléments du circuit d'adaptation peuvent être des éléments discrets (lumped elements) ou des éléments localisés microbandes.

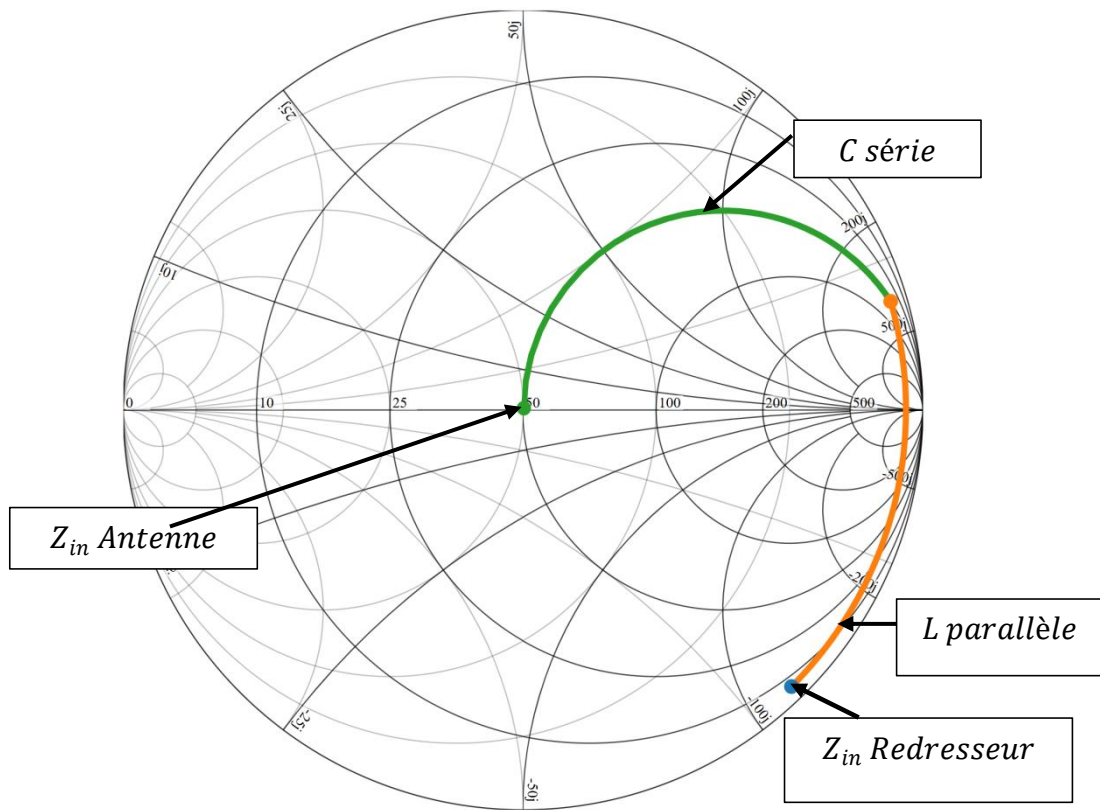


Figure 13: Détermination du circuit d'adaptation

Le circuit d'adaptation est représenté par la figure 14.

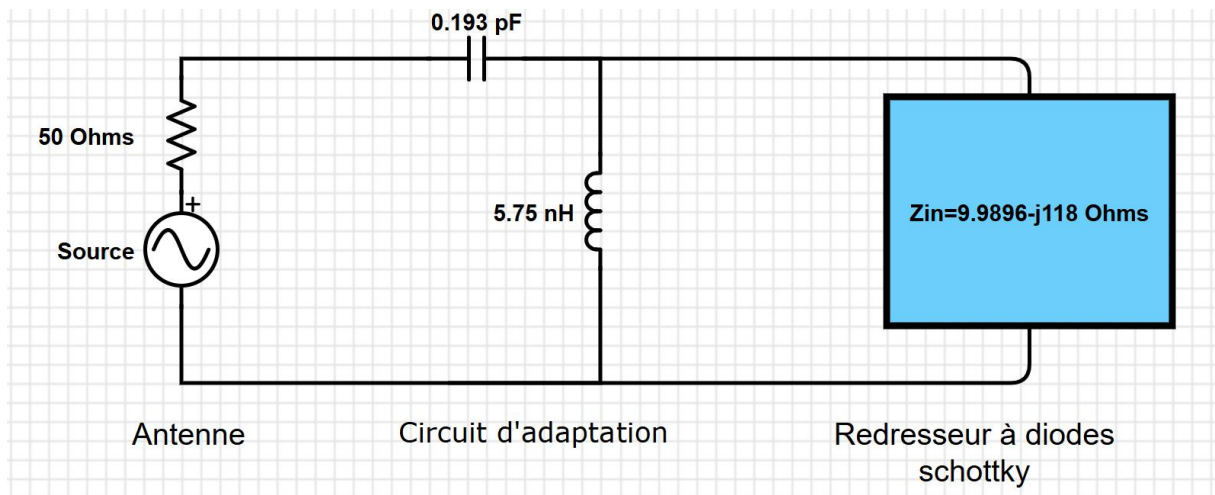


Figure 14 : circuit d'adaptation reliant l'antenne au redresseur.

6. Conclusion:

À la conclusion de ce travail, l'étude et la conception d'une antenne Rectenna dans le but de récupérer l'énergie électromagnétique a été discutée, en mettant l'accent sur la fréquence 2,45 GHz dans les bandes de fréquences utilisées dans les applications d'énergie Wi-Fi et sans fil. Le logiciel CST Microwave Studio a été utilisé comme principal outil de simulation et d'analyse, ce qui nous a permis d'évaluer les performances de l'antenne en termes de coefficients de réflexion (S_{11}), de gain et d'efficacité et le circuit d'adaptation de récupération d'énergie.

Les résultats obtenus ont montré que la conception proposée est capable de fonctionner efficacement dans la plage requise, avec de bonnes propriétés de rayonnement, ce qui le rend approprié pour l'alimentation sans fil (Wireless Power Transfer) et la récolte d'énergie (Energy Harvesting). L'importance de la correspondance d'impédance pour obtenir la meilleure efficacité de conversion courant continu du signal reçu est également soulignée.

Bibliographie

- [1] Surface Mount Microwave Schottky Detector Diodes Technical Data HSMS-2850 Series, HSMS-2860 Series, Avago Technologies, Hewlett Packard, 1998.
- [2] Arun Kumar, Manoj Gupta, Mahmoud A. Albreem, Dac-Binh Ha, Mohit Kumar Sharma Analysis of RF-DC Rectifier Input Impedance for the Appropriate Design of Matching Network for Wireless RF Energy Harvesters, 06 May 2022.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Compte tenu de l'évolution rapide des technologies de communication sans fil et du besoin croissant de solutions énergétiques innovantes et durables, la technologie de récupération d'énergie électromagnétique s'est imposée comme une option prometteuse pour alimenter les dispositifs de consommation, notamment dans les applications de l'Internet des objets (IOT). Grâce à ce travail, nous avons étudié et conçu un système intégré de récupération d'énergie sans fil basé sur une antenne de type "Rectenna", où l'accent a été mis sur la bande passante de 2,45 GHz utilisée dans les réseaux Wi-Fi.

L'étude a commencé par les aspects théoriques liés aux antennes patch et aux techniques de récupération d'énergie, en passant par le processus de conception et de simulation à l'aide du programme CST, l'amélioration des performances du système grâce à l'adoption de techniques d'alimentation avancées et de matériaux appropriés. Les résultats obtenus montrent que la conception améliorée de l'antenne atteint des performances acceptables en termes de coefficient de réflexion (S_{11}), gain (Gain), efficacité et largeur du faisceau, confirmant l'employabilité de ce type d'antenne dans les systèmes de récupération d'énergie électromagnétique.

Malgré les défis associés à une faible efficacité énergétique par rapport aux sources traditionnelles, les résultats de ce travail ouvrent des horizons prometteurs vers le développement d'appareils auto-alimentés, notamment dans des environnements urbains denses en signaux sans fil. Cette étude peut également être considérée comme un point de départ pour des recherches futures visant à améliorer l'efficacité, explorer les fréquences multiples et réduire les dimensions physiques du système pour répondre aux exigences industrielles et commerciales.

Perspectives

Dans le cadre de travaux futurs, la conception actuelle peut être développée en adoptant une antenne multi-bande (Bi-Bande) fonctionnant à la fois à 2,45 GHz et à 5,8 GHz, dans le but d'élargir la gamme de couverture spectrale et d'augmenter les chances de récolter l'énergie de différents Wi-Fi Signaux FI. Les performances de l'antenne peuvent également être améliorées en adoptant la polarisation circulaire, qui est plus efficace pour recevoir des ondes électromagnétiques de différentes directions, en particulier dans des environnements complexes et fermés, où la direction du signal change constamment. Ces améliorations futures augmenteront l'efficacité et le rendement de l'antenne, et en feront un composant plus efficace des systèmes sans fil de récolte d'énergie.