

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'électronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : télécommunication

Spécialité : système des télécommunications

Par

➤ **LakhdariMarwa**

➤ **Aissihbatouallah**

Intitulé

Etude et conception d'une rectenna pour la récupération d'énergie sans fil

Soutenu le : 03/07/2023

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
M.ATTIA SALIM	MCA	Président	Univ-BBA
M. MESSAOUDENE Idris	MCA	Encadreur	Univ-BBA
M.BELAZZOUG Massinisa	MCB	Examineur	Univ-BBA

Année Universitaire 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remercîment

*Avant tout nous remercions "Allah" tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la force pour accomplir ce travail. Merci à Dieu de nous avoir éclairé le chemin de la réussite. Nous adressons nos remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce modeste travail. En particulier : **Dr. MESSAOUDENE** : notre directeur de mémoire pour sa patience, et surtout ses conseils judicieux, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

*Nous remercions les plus vifs s'adressent aussi au Dr. **ATIA** le président du jury au Dr. **BELAZZOUG** membre du jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail et l'enrichir par leurs propositions. **Dr. Bouchachi** : pour sa participation dans la réalisation de ce mémoire.*

*Nos vifs remerciements à : · Nos chers parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements. Nos remerciements à monsieur le président et les membres du jury qui nous font honneur d'accepter de juger notre travail. Enfin, Je tiens à mentionner une personne particulièrement importa **Azzouz Abdelbaset**ce monsieur a été d'une aide inestimable pour nous, avec son soutien, ses conseils et son expertise.*

Dédicace

*A la reïn de ma vie : mon adorable **maman** qui a souffert sans me laisser souffrir que n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse sa présence à mes cotes a toujours été ma source de force pour affronter les déférent obstacles*

*A mon cher **père**, Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

*A mes chères sœurs **Rayane, Safa** pour leur soutien inconditionnel dans les moments difficiles leur encouragement et leur présence toujours à mes cotes*

*A mes chers frères, **LOTFI, RAMZI, ISHAK** Pour leur soutien moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études. !*

*A mes chers amis **Rania Ymen Bouchra Nada Imane Rayane** et d'autre Pour leur aide et support dans les moments difficiles.*

A tous ceux que j'aime. MERCI

MARWA

Dédicace

*Avant Tous Nous Remercions DIEU Le Tout Puissant Car Sans La Foi Qu'on
A En Lui En Ne Serait Pas Arrivé Là Ou Est Aujourd'hui.*

*À Mes Très Chers Parents, Dont Le Sacrifice, La Tendresse, L'amour, La
Patience, Le Soutien, L'aide Et Les Encouragements Sont L'essence De Ma
Réussite. Sans Eux, Je Ne Serais Pas Ce Que Je Suis Aujourd'hui Mon Père :*

Aïssi Smati. Ma Mère : Titoum Malika.

*A Mon Très Chère Frères : Rabeh. Et Sa Femme Amira, Saber
Et A mon grand-père Ahmed, à mes oncles et tantes et A Toute La Famille
Aïssi Et Titoum.*

*A Tous Les Enseignants Et Les Profs Qui M'ont Appris Durant Toutes Mes
Années D'étude Et Tous Ceux Qui M'ont Aidé De Près Ou De Loin.*

*A Mes Chère Amies : Housseem, Maria, rayan, Marwa, Mona, Romaiïssa,
kaouther Je Dédie Cet Humble Travail.*

Hibatouallah

Tableau de matières

Remerciement	
Dédicace	
Tableau de matières	
Remerciement	
Listes des figures	
Liste des tableaux	
Liste des acronymes	
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les Rectennas	
I.1.Introduction :	4
I.2. Systèmes de récupération d'énergie radio fréquence	4
I.3.Rectenna	5
I.3.1.Historique.....	5
I.3.2Structure globale d'une rectenna	6
I.3.2.1. Antenne de réception	6
I.3.2.2. Filtre d'entrée HF	7
I.3.2.3. Circuit d'adaptation	7
I.3.2.4.Circuit de conversion RF/DC (redressement).....	8
I.3.2.5. Filtre de sortie DC :.....	10
I.3.2.6. Charge résistive.....	10
I.4. Réseaux de rectennas.....	10
I.5. Problématique de la modélisation d'une rectenna :	11
I .6. Quelques travaux des rectennas.....	11
I.6.1. Rectenna compacte bi-bande pour les systèmes de transfert d'énergie sans fil UHF et ISM	11
I.6.2. Réseau de Rectennas omnidirectionnels avec une stratégie de distribution de puissance RF améliorée pour la collecte d'énergie RF	15
I.6.3. Nouvelle conception d'un élément Rectenna à 2,45 GHz et de la matrice pour la transmission d'énergie sans fil.....	18
I.6.4. Une antenne à fente large bande pour le transfert d'énergie sans fil à la bande LTE.....	21
I.6.5. Un Rectenna Compact Avec Diagramme de rayonnement Plat :	24
I.6.6. Rectenna avec antenne dipôle compacte intégrée avec une structure Méta surface	26
I.7.Conclusion :	28
CHAPITRE 02 : Conception et simulation des Rectennas à 2.4 GHz	
II.1.Introduction	30
II.2. Outils de simulation	30

a) Advanced Design System (ADS).....	30
b) High Frequency Structure Simulator (HFSS).....	30
II.3. Conception et modélisation d'un rectenna avec antenne compacte à résonateur diélectrique (DRA)	31
II.3.1. Antenne DRA de forme cylindrique	31
a. Configuration de l'antenne	31
2. Résultats de la Simulation	32
II.3.2. Circuit de conversion RF-DC.....	34
1. Conception de redresseur	34
2. Le type de diode utilisé	34
3. les Simulateurs de Logiciel ADS.....	35
4. Résultats de simulation	36
II.4. Analyse et conception d'une rectenna à polarisation circulaire CP	39
II.4.1. Antenne DRA rectangulaire	39
1. Configuration de l'antenne	39
2. Résultats de simulation	41
II.4.2. Circuit de conversion RF-DC.....	48
1. Conception de redresseur	48
2. Résultats de simulation	49
II.5. Etude comparative.....	51
II.5. Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	54
Références.....	Erreur ! Signet non défini.

Listes des figures

Chapitre I :

Figure I.1: Architecture globale d'un récupérateur d'énergie.....	4
Figure I.2: Eléments constituant une rectenna	6
Figure I.3: Adaptation du circuit redresseur à l'antenne.....	7
Figure I.4: Redresseur simple alternance.....	8
Figure I.5: Redresseur double alternance.....	9
Figure I.6: Structure et dimension de rectenna bibande.....	12
Figure I.7: Coefficient de réflexion des trois de l'antenne bibande.....	13
Figure I.8: Redresseur à double bande proposé : (a) topologie et (b) réseau de correspondance ...	13
Figure I.9: Coefficients de réflexion.....	14
Figure I.10: Efficacité de conversion RF-DC.....	14
Figure I.11: Réseau d'antennes proposé avec stratégie de distribution de puissance RF. [18].....	15
Figure I.12: Disposition d'antenne quasi-Yagi	16
Figure I.13: Illustration du réseau d'antennes.....	16
Figure I.14: Simulation et mesure $ S_{11} $ de l'antenne 1.....	17
Figure I.15: Schéma et photographie du redresseur proposé.....	17
Figure I.16: PCE simulés du redresseur sous différentes résistances de charge.....	18
Figure I.17: la configuration de l'antenne : (a) Vue latérale de l'antenne Vue de face de : (b) deux éléments réseau alimenté en série. (c) quatre éléments	19
Figure I.18: S_{11} simulé et mesuré pour l'antenne conçue :	19
Figure I.19: Schéma du circuit de rectification conçu.....	20
Figure I.20: Efficacité de conversion RF-DC mesurée avec différentes RL.....	20
Figure I.21: L'efficacité de conversion de trois types de rectennas différentes densités de puissance.....	21
Figure I.22: Antenne avec trois patches différents.....	22
Figure I.23: Performance simulée de l'antenne des trois cas.....	22
Figure I.24: Configuration du redresseur.....	23
Figure I.25: Performances simulées du redresseur par rapport à la puissance d'entrée.....	24
Figure I.26: Modèle de rayonnement simulé du plan H.....	25
Figure I.27: Diagramme of the proposed design.....	25
Figure I.28: Schéma et photo graphique du redresseur proposé.....	26
Figure I.29: Tension de sortie CC et la tension et L'Efficacité de rectification.....	26
Figure I.30: (a) Configuration de l'antenne (b) Variation de $ S_{11} $ (c) Distribution du champ électrique dans le plan XZ (d) dans le plan YZ.....	27
Figure I.31: Paramètres de conception du redresseur	28

Chapitre II :

Figure II.1: Géométrie de l'antenne.....	31
Figure II.2: Coefficient de réflexion de l'antenne.....	33
Figure II.3: diagramme de rayonnement en 2D.....	32
Figure II.4: Circuit de conversion RF-DC sous ADS.....	354
Figure II.5: Coefficient de réflexion S_{11}	37
Figure II.6: Spectre des signaux d'entrée et de sortie du redresseur simulé.....	36

Figure II.7: Forme temporelle du signal en entre et en sortie du redresseur.	387
Figure II.8: parties réelle et imaginaire	39
Figure II.9: Géométrie de l'antenne.....	39
Figure II.10: Coefficient de réflexion de l'antenne.....	40
Figure II.11: Amélioration de l'antenne.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.12: Coefficient de réflexion de l'antenne.....	43
Figure II.13: les étapes de la conception finale.....	43
Figure II.14: Conception finale	43
Figure II.15: Coefficient de réflexion de l'antenne finale.....	45
Figure II.16: Rapport axial pour les steps	475
Figure II.16: Rapport axial de l'antenne finale.....	475
Figure II.17: Le comportement de polarisation avec de phase variable a : (a)=0°, (b)= 90°, (c)=180°, (d)=270°	46
Figure II.18: Circuit de conversion RF-DC sous ADS.	48
Figure II.19: Coefficient de réflexion.	49
Figure II.20: Spectre des signaux d'entrée et de sortie du redresseur simulé	49
Figure II.21: Forme temporelle du signal en entre et en sortie du redresseur	510

Liste des tableaux

Tableau I.1: Topologies des circuits de conversion.	9
Tableau II.1: Dimensions et paramètres des matériaux utilisés dans la conception d'antenne.	32
Tableau II.2: Dimensions de l'antenne DRA.	32
Tableau II.3: Dimensions de l'antenne DRA.	32
Tableau II.4 : paramètres de circuit de conversion.	34
Tableau II.5: Paramètres de la diode Schottky HSMS2850 et leurs valeurs.	34
Tableau II.6: Dimensions et paramètres des matériaux utilisés dans la conception d'antenne.	39
Tableau II.7: Dimensions de l'antenne DRA.	39
Tableau II.8: paramètres de circuit de conversion.	49
Tableau II.9 : comparaison entre les antennes Dra utilisées.	51
Tableau II.10: comparaison entre les redresseurs utilisés.	51

Liste des acronymes

2D	deux dimensions
3D	trois dimensions
DRA	Antenne résonateur diélectrique
PCE	Power conversion efficiency
RF	Radio Fréquence
ADS	Advanced Design System
DC	Direct Current (régime continu).
HB	Harmonique Balance
RF	Radio Fréquence.
RF-DC	Régime alternatif –continue
TESF	Transmission d'Energie Sans Fil.
RECTENNE	Rectifying +Antenne

Résumé

La récupération d'énergie sans fil est une technologie prometteuse pour collecter et exploiter l'énergie électromagnétique ambiante pour alimenter des dispositifs électromagnétiques sans avoir besoin de câble ou de batterie traditionnelle à l'aide d'une rectenna. Ce dispositif combine une antenne pour capter les ondes électromagnétiques et un circuit redresseur pour convertir le signal RF en courant continu. L'objectif de ce travail est d'étudier et d'améliorer les performances d'une rectenna qui fonctionne dans la bande de fréquences (UMTS, WiFi...) 2.45 GHz. Ce travail a été effectué à l'aide de deux logiciels notamment ; High Fréquence structure simulator (HFSS) puis le logiciel Advanced Design System (ADS).

Mot-clé : Rectenna, un circuit redresseur, bandes ISM et WIFI, logiciel HFSS et ADS.

Abstract

Wireless energy harvesting is a promising technology for collecting and harnessing ambient electromagnetic energy to power electromagnetic devices without the need for traditional cables or batteries. A rectenna is a device that combines an antenna to capture electromagnetic waves and a rectifier circuit to convert the RF (Radio Frequency) signal into direct current. The aim of this work is to study and improve the performance of a rectenna operating in the (UMTS,WIFI...)frequency band (2.45GHZ). The work was carried out using the High Frequency structure simulator (HFSS) software version 2013, followed by the Advanced Design System (ADS) software version 2023.

Index terms: energy harvesting, electromagnetic energy, cables, batteries, rectenna, rectifier circuit, Radio Frequency, signal, current, UMTS and WIFI, frequency, HFSS et ADS.

ملخص

حصاد الطاقة اللاسلكية هي تقنية واعدة جمعت واستغلت الطاقة الكهرومغناطيسية المحيطة لتشغيل الأجهزة الكهرومغناطيسية دون الحاجة إلى أسلاك أو بطارية تقليدية باستخدام «rectenna» هو جهاز يجمع بين هوائي لالتقاط الموجات الكهرومغناطيسية ودائرة مصححة لتحويل إشارة التردد اللاسلكي (تردد الراديو) إلى التيار المباشر. والهدف من هذا العمل هو دراسة وتحسين أداء «rectenna» العاملة في النطاق الترددي , (UMTS 2.45 GHZ)....)WIFI تم القيام بهذا العمل باستخدام نسخة برنامج محاكاة البنية عالية التردد (HFSS) اصدار 2013 و برنامج نظام التصميم المتقدم (ADS) اصدار 2023.

هوائي, الموجات, UMTS, WIFI, (ADS), (HFSS), كلمات مفتاحية : الطاقة اللاسلكية, التيار, التردد الكهرومغناطيسية, أسلاك, بطارية, الطاقة الكهرومغناطيسية ودائرة مصح

Introduction Générale

Introduction générale

L'avancée rapide des technologies sans fil a entraîné une augmentation significative de la demande en énergie pour alimenter ces dispositifs. Cependant, la disponibilité limitée des sources d'énergie conventionnelles et les contraintes environnementales croissantes ont conduit à une recherche active de solutions énergétiques alternatives et durables. Dans ce contexte, la récupération d'énergie sans fil émerge comme une technologie prometteuse, permettant de convertir l'énergie ambiante en électricité utilisable pour alimenter les dispositifs électroniques.

Le mémoire présent se concentre sur l'étude et la conception d'un composant essentiel des systèmes de récupération d'énergie sans fil : les rectennas. Une rectenna est un dispositif qui combine un redresseur (rectifier) et une antenne, permettant ainsi de convertir les ondes électromagnétiques environnantes, telles que les ondes radiofréquences ou les micro-ondes, en courant continu.

Le manuscrit de ce mémoire de master est constitué d'une introduction, de deux chapitres et d'une conclusion.

Dans le premier chapitre, on va explorer le rôle crucial joué par la rectenna dans la récupération d'énergie. On examinera les composants qui la composent, notamment l'antenne et le redresseur, ainsi que leur fonctionnement en détail. On découvrira comment ces éléments interagissent pour capturer l'énergie électromagnétique et la convertir en courant continu exploitable. On abordera également les différentes performances de la rectenna, telles que son efficacité de conversion, sa sensibilité aux variations de fréquence et de puissance, ainsi que sa capacité à fonctionner dans différentes conditions environnementales. On discutera des progrès réalisés dans le domaine de la rectenna moderne et quelques exemples de rectennas anciennes qui ont pavé la voie à ces développements actuels.

Dans la deuxième partie de cette étude, on concentrera sur la conception et l'amélioration des performances de deux rectennas qui fonctionnent dans la bande (2,45 GHz). Pour ce faire, on a utilisé deux logiciels spécialisés : HFSS (High-Frequency Structure Simulator) pour la conception de l'antenne et ADS (Advanced Design System) pour le redresseur.

Introduction générale

La première Rectenna avec polarisation linéaire dans laquelle l'antenne est conçue pour capturer des ondes électromagnétiques ayant une polarisation linéaire avec un redresseur avec deux diodes HSMS2850 Schottky.

La deuxième Rectenna avec polarisation circulaire dans laquelle l'antenne est conçue pour capturer des ondes électromagnétiques ayant une polarisation circulaire avec un redresseur avec une diode Schottky (HSMS-2852).

À la fin, on termine ce travail par une conclusion générale résumant l'ensemble des travaux réalisés.

Chapitre I : Généralités sur les Rectennas

I.1.Introduction :

Dans certaines applications, l'utilisation de piles ou de batteries pour alimenter les systèmes et objets communicants peut être limitée en termes d'autonomie, nécessitant des remplacements périodiques et engendrant des coûts de recyclage élevés. C'est pourquoi les systèmes de récupération d'énergie électromagnétique sont de plus en plus considérés comme une alternative intéressante pour rendre ces systèmes plus autonomes en énergie et prolonger la durée de vie de leur batterie. En effet, la récupération et la conversion de l'énergie RF en tension continue peuvent être réalisées grâce à l'utilisation de "rectenna".

Dans ce chapitre, on va expliquer l'architecture générale d'une rectenna et son principe de fonctionnement. On abordera également les caractéristiques générales d'une rectenna, telles que l'adaptation, la diode Schottky, la topologie de redresseur, etc. Enfin, on présentera quelques travaux publiés dans ce domaine de recherche d'actualité.

I.2. Systèmes de récupération d'énergie radio fréquence

Un système de récupération d'énergie se compose généralement de 5 blocs, comme illustré dans la Figure I.1. L'objectif principal de ce système est de fournir une quantité d'énergie suffisante au capteur pour qu'il puisse fonctionner d'une manière optimale [1].

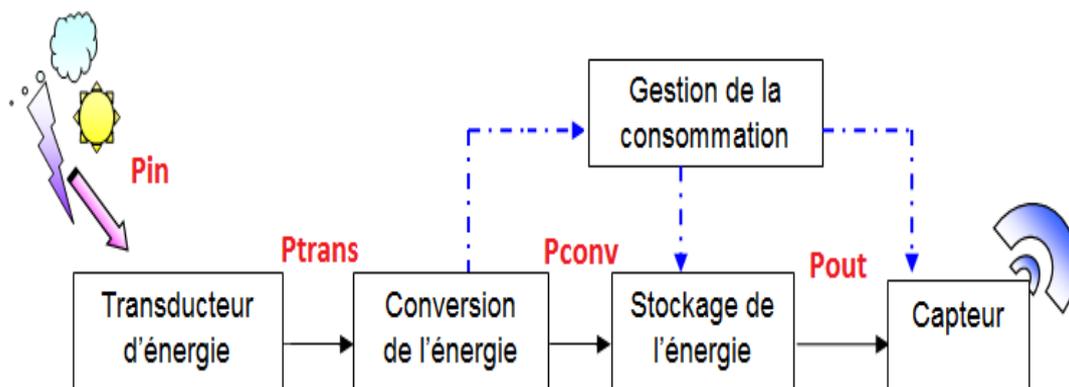


Figure I.1: Architecture globale d'un récupérateur d'énergie.

Le premier élément de la chaîne de récupération d'énergie est le transducteur d'énergie. Sa fonction est de convertir une grandeur physique E en une grandeur physique S, et de produire en sortie une grandeur électrique telle que la tension ou le courant. Les capteurs sont un bon exemple de transducteurs, car ils peuvent mesurer différentes grandeurs physiques telles que la température, la pression, l'accélération, etc.

Le deuxième bloc de la chaîne est celui de la conversion d'énergie. Son rôle consiste à convertir l'énergie électrique produite à la sortie du transducteur en un signal électrique continu. Ce bloc est essentiel et doit offrir une efficacité maximale. Les travaux menés à ce niveau visent principalement à améliorer le rendement de conversion.

Le troisième élément de la chaîne est le stockage d'énergie. Ce module a pour fonction de conserver toute l'énergie DC produite à la sortie du module de conversion, afin de l'utiliser au moment opportun. Les éléments de stockage peuvent être des super-capacités et des batteries etc.

Enfin, le dernier bloc est celui de la gestion d'énergie. Son rôle peut être résumé dans les tâches suivantes :

- Fournir l'énergie DC quand c'est nécessaire au capteur ;
- Contrôler le flux de l'énergie afin d'optimiser sa consommation ;
- Conversion DC-DC entre le convertisseur et l'élément de stockage.

I.3.Rectenna

I.3.1.Historique

Les 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 développé une rectenna intégrée à 35 GHz avec un rendement de 33% pour des puissances d'entrée de l'ordre de 60 mW. Cette rectenna était constituée d'une antenne dipôle et d'une diode Schottky montée en parallèle. Malgré les inconvénients rencontrés à 35 GHz, notamment une efficacité moindre et des coûts plus élevés, Cependant pour éviter ces inconvénients, les chercheurs ont commencé à utiliser une nouvelle fréquence à 5,8 GHz en 1992.

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 [2].

I.3.2 Structure globale d'une rectenna

Le terme Rectenna est un mot anglais composé de « Rectifier + Antenna ». La Rectenna est un appareil qui permet de récupérer l'énergie électromagnétique pour alimenter des dispositifs électroniques à faible consommation. Ce dispositif se compose d'une antenne réceptrice qui collecte l'énergie à partir d'une ou plusieurs sources, puis cette énergie est convertie en puissance continue (DC) avec un rendement maximal à travers un circuit redresseur composé d'un ou plusieurs éléments semi-conducteurs actifs non linéaires. Selon le dispositif électronique à alimenter, on peut chercher à maximiser le courant continu, la tension continue ou la puissance [3].

Le circuit de la Rectenna est composé d'une antenne de réception, d'un redresseur et d'un circuit d'adaptation d'impédance, d'un filtre DC et d'une charge qui représente l'impédance d'entrée du dispositif électronique à alimenter. Sa structure générale est illustrée dans la Figure I.2 :

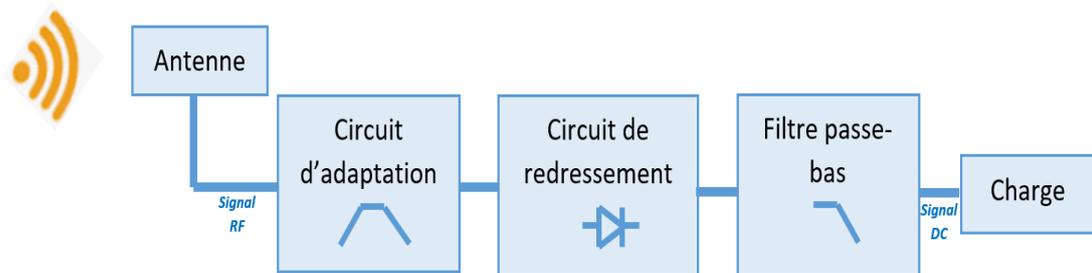


Figure I.2: Éléments constituant une rectenna

I.3.2.1. Antenne de réception

L'antenne de réception est un élément de transition entre l'espace libre et le circuit redresseur, sa fonction première est de capter le rayonnement électromagnétique de toute source RF (Radio Fréquence) de l'environnement et de le convertir en énergie électrique. Ces antennes peuvent prendre de nombreuses formes et tailles en fonction de la fréquence de fonctionnement et du type d'application.

I.3.2.2. Filtre d'entrée HF

Le filtre d'entrée HF est un filtre passe-bande ou passe-bas installé entre l'antenne RF et le circuit de redressement. Il est utilisé pour remplir deux fonctions principales en même temps. La première est la suppression des harmoniques indésirables produites par la diode du circuit de redressement (en raison de sa non-linéarité), ce qui les empêche d'être transmises à l'antenne. L'autre est l'adaptation de l'antenne réceptrice et du circuit de redressement à la fréquence de fonctionnement afin d'assurer une transmission maximale de l'énergie entre eux. En outre, il est possible d'incorporer ce filtre dans l'antenne réceptrice, ce qui permet d'acquérir une "antenne de réjection des harmoniques" qui réduit la taille et le coût de l'antenne réceptrice [4].

I.3.2.3. Circuit d'adaptation

En général, dans un système à rectenna, le circuit de redressement a une impédance d'entrée Z_{rect} qui diffère de l'impédance d'entrée de l'antenne Z_e à une fréquence de travail fixe et à une puissance fixe. Par conséquent, afin de maximiser la puissance transmise au récepteur, un réseau d'adaptation d'impédance doit être installé entre l'antenne de réception et le redresseur. Cette adaptation est validée si l'impédance complexe de l'antenne est égale à l'impédance complexe conjuguée du redresseur.

Un circuit d'adaptation est créé en ajoutant des éléments en série ou en parallèle, ces éléments étant soit des composants localisés (capacité, inductances), soit des tronçons de ligne, soit une combinaison des deux. L'objectif principal de cette modification est d'obtenir une efficacité de conversion RF-DC élevée. La figure I.3 illustre un exemple d'un circuit d'adaptation d'impédance.

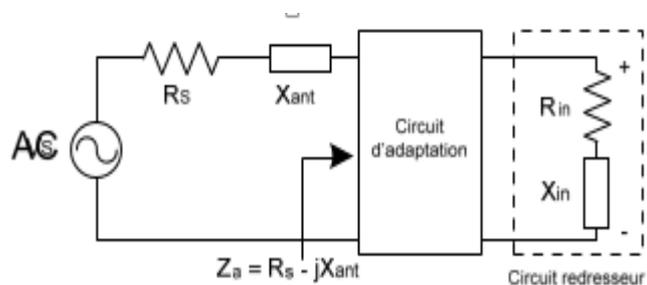


Figure I.3: Adaptation du circuit redresseur à l'antenne.

I.3.2.4. Circuit de conversion RF/DC (redressement)

Pour alimenter les appareils électroniques avec une faible tension continue, l'énergie radiofréquence captée par une antenne réceptrice doit être convertie en énergie électrique continue. À cet égard, un redresseur RF-DC est nécessaire pour la conception d'un système à rectenna, car il permet la conversion la plus efficace. Cette conversion RF-DC est un processus non linéaire qui peut être réalisé à l'aide de diodes ou de transistors. Cependant, pour récupérer de faibles niveaux d'énergie électromagnétique, les diodes Schottky sont plus couramment utilisées que les transistors, qui ont des tensions de seuil élevées, ce qui limite les performances des rectennas [3].

A. 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 I.4). La figure I.5 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 [4].

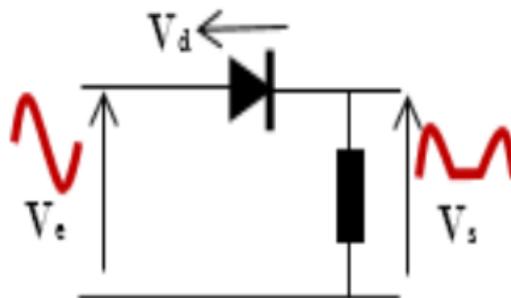


Figure I.4: Redresseur simple alternance.

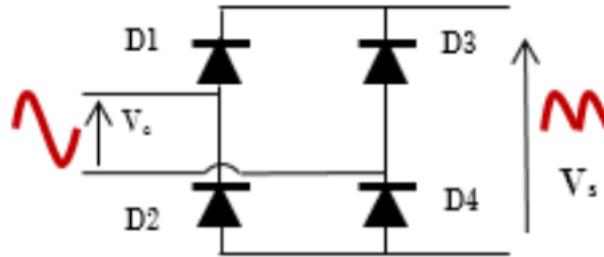


Figure I.5: Redresseur double alternance

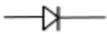
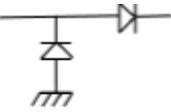
B. Élément redresseur « Diode Schottky »

Les diodes Schottky sont largement utilisées dans les circuits de redressement pour les applications à microondes en raison de leur tension de seuil très faible, de l'ordre de [0,15 V à 0,45 V], et de leur temps de transition rapide du à leur faible capacité de jonction. Ces diodes sont constituées d'une jonction métal-semi-conducteurs dopé en P ou en N. Cette jonction peut fournir une zone de contact ohmique qui permet au courant de circuler dans les deux sens, ou une barrière Schottky qui empêche le courant de circuler dans la direction opposée. Les paramètres clés pour évaluer une diode Schottky sont ; le rapport de redresseur, la tension de seuil, la capacité de jonction et la résistance série. Les diodes Schottky sont particulièrement bien adaptées aux faibles densités de puissance RF, ce qui en fait des composants idéaux pour les redresseurs.

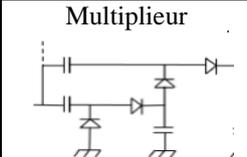
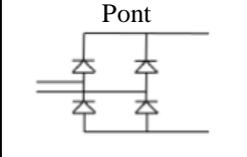
C. Topologies des circuits de conversion

Le tableau I.1 résume les différents types de topologies des circuits de conversion ainsi leurs avantages, inconvénients et applications.

Tableau I.1 : Topologies des circuits de conversion.

	Avantages	Inconvénients	Applications
Mono diode série 	Adapté aux très faibles puissances	Tension de sortie faible	Récupération énergie ambiante
Mono diode Shunt 	Adapté aux très faibles puissances	Tension de sortie faible	Récupération énergie ambiante
Doubleur 	Double alternances, Tension de sortie plus élevée	Rendement moins bon que la structure simple diode	Récupération et transfert d'énergie sans fils

Chapitre I : Généralités sur les Rectennas

 <p>Multiplieur</p>	Tension de sortie plus élevée	Pertes dans les diodes, rendement dégradé	Récupération et transfert d'énergie sans fils
 <p>Pont</p>	Bon Rendement à forte puissances	Non sensible aux petites tensions	Récupération d'énergie sans fils

I.3.2.5. 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 [5].

I.3.2.6. Charge résistive

Une charge résistive est un composant électronique qui offre une résistance au passage du courant électrique. Lorsque le courant traverse une charge résistive, une partie de l'énergie électrique est convertie en chaleur et dissipée dans l'environnement. La résistance d'une charge résistive est mesurée en ohms (Ω) et est déterminée par la loi d'Ohm, qui stipule que la résistance est égale à la tension divisée par le courant. Plus la résistance est élevée, plus la tension à appliquer est importante pour obtenir un courant donné. En général, la charge terminale d'un dispositif correspond à l'impédance d'entrée de ce dernier, qui doit être alimenté [6].

I.4. Réseaux de rectennas

Les réseaux de Rectenna sont utilisées dans différentes applications telles que la récupération d'énergie dans des environnements distants, le chargement de batteries à distance, la communication sans fil à faible puissance, la surveillance de l'environnement, etc. Ils peuvent être intégrés dans des appareils portables et des objets connectés, les rendant autonomes en énergie.

Les réseaux rectenna ont encore des limites en termes d'efficacité énergétique et de portée en raison de la faible densité de puissance des ondes radio. Des recherches sont en cours pour

améliorer ces aspects et rendre les réseaux rectenna plus largement utilisés dans divers domaines [7].

I.5.Problématique de la modélisation d'une rectenna :

La conception d'une rectenna, ou antenne redresseuse, est un processus compliqué car elle nécessite l'intégration de deux parties distinctes: une antenne qui reçoit les ondes électromagnétiques et un circuit redresseur qui transforme ces ondes en énergie électrique utilisable. Le calcul des propriétés de rayonnement et de la réponse du signal électromagnétique d'une antenne peut être réalisé en utilisant des équations électromagnétiques [8].

- ✓ le circuit redresseur pose un plus grand défi à modéliser en raison de sa nature complexe. En plus de la modélisation du circuit, il est nécessaire de modéliser les diodes et les circuits de filtrage nécessaires pour extraire l'énergie électrique de l'onde électromagnétique captée par l'antenne ;
- ✓ la modélisation d'une antenne redresseuse dépend de plusieurs autres facteurs, tels que la fréquence de fonctionnement de l'antenne, la polarisation des ondes électromagnétiques, la distance entre l'antenne et l'alimentation, la géométrie de l'antenne et les caractéristiques de l'antenne.

I .6. Quelques travaux des rectennas

I.6.1.Rectenna compacte bi-bande pour les systèmes de transfert d'énergie sans fil UHF et ISM

L'article [9] publié par Abdul Quddious et al. propose un nouveau design pour une rectenna. Elle est conçue pour fonctionner dans deux bandes de fréquences, UHF à large bande (bandes RFID standard américaines, européennes et chinoises de 855-935 MHz) et ISM (2,45 GHz), La taille est plane et compacte (45 mm × 80 mm), qui est couramment utilisée pour les systèmes de transfert d'énergie sans fil.

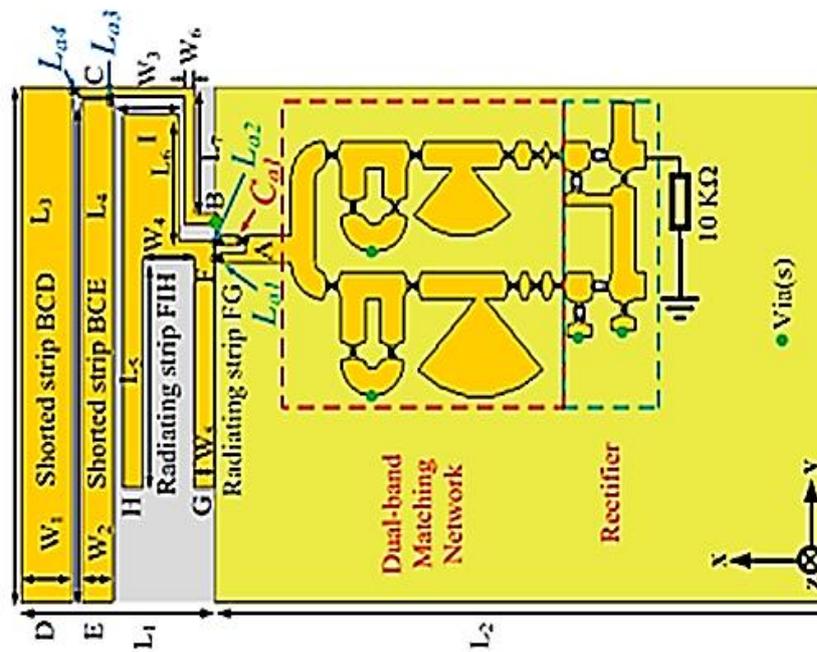


Figure I.6: Structure et dimension de rectenna bibande [9]

L'antenne se compose de deux éléments rayonnants, l'un pour la bande ISM et l'autre pour la bande UHF, avec un réseau d'adaptation à éléments nuls pour améliorer la largeur de bande, comme le montre la figure I.6. La conception utilise la technologie micro-ruban et une zone de segment sans mise à la terre. Un substrat Rogers RT/duroïde 5880 ($\epsilon_r=2,2$ et tangente de perte $\tan \delta = 0,0009$ d'une épaisseur de 0,787 mm) a été utilisé.

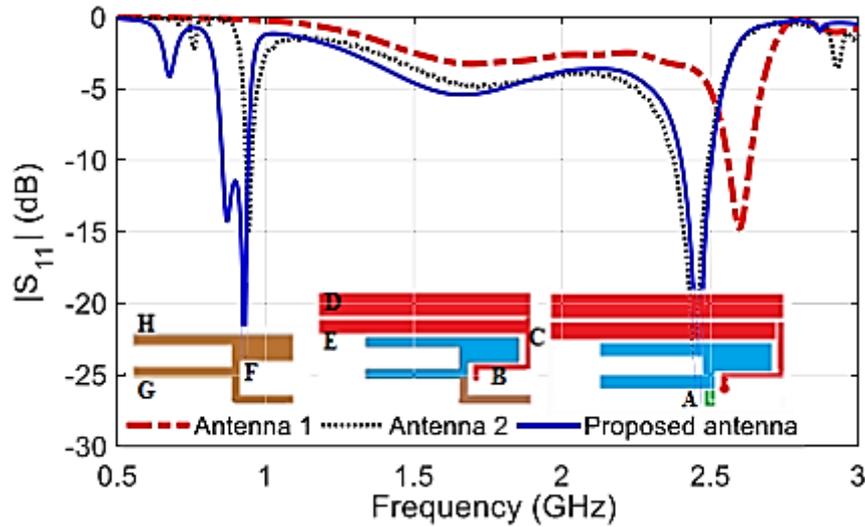


Figure I.7: Coefficient de réflexion des trois de l'antenne bi-bande[9].

La figure I.7 représente le coefficient de réflexion pour trois étapes de conception suivies pour générer les deux résonances rayonnantes de manière indépendante, puis de résoudre le problème d'adaptation.

Le redresseur bi-bande utilise un réseau d'adaptation à trois ports et est monté en cascade avec l'antenne bi-bande (voir figure I.8). Il est responsable de l'adaptation du signal UHF à la branche gauche et du signal ISM à la branche droite. Les deux branches mènent à deux doubleurs de tension mis en œuvre avec des diodes Schottky et des condensateurs Murata.

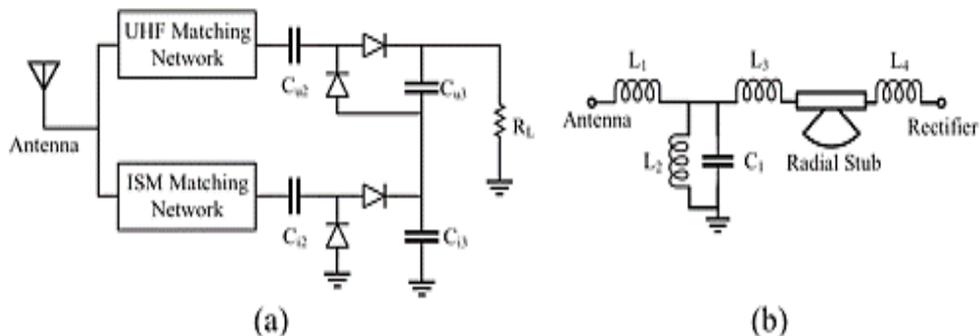


Figure I.8: Redresseur à double bande proposé : (a) topologie et (b) réseau de correspondance [9]

Chapitre I : Généralités sur les Rectennas

La figure I.9 présentées Les valeurs simulées et mesurées pour trois niveaux de puissance d'entrée différents, à savoir -5, -10 et -20 dBm, avec le redresseur fabriqué dans la photographie en médaillon. Malgré la dépendance non linéaire de l'impédance d'entrée du redresseur par rapport au niveau de puissance d'entrée, le réseau d'adaptation robuste maintient la large bande de la bande UHF et la bande de 100 MHz de la bande ISM pour une large gamme de niveaux de puissance d'entrée L'efficacité RF-to-dc est le chiffre de mérite du redresseur.

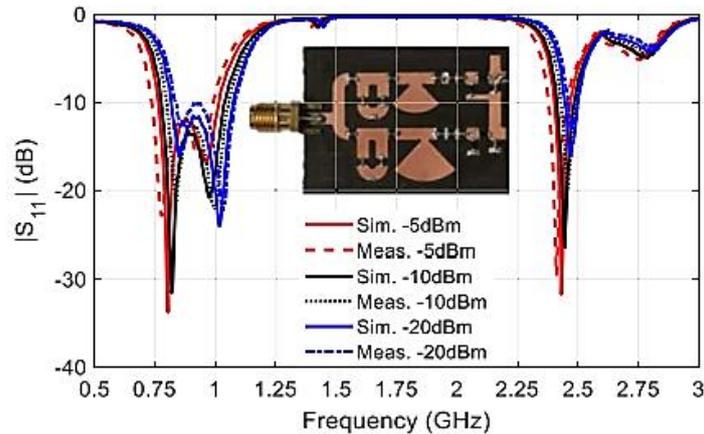


Figure I.9: Coefficients de réflexion.[9]

Les rendements mesurés et simulés en fonction des fréquences sont présentés à la figure I.10. Les deux bandes sont larges. L'efficacité maximale mesurée est atteinte pour une puissance d'entrée de -5 dBm et elle est de 65%, 62% et 60% à 866, 915 Mhz Et 2450 Mhz, respectivement. Au niveau de puissance intermédiaire de -15 dBm, l'efficacité de la bande UHF est d'environ 45%, et pour le niveau de puissance inférieur (-25 dBm), l'efficacité maximale pour l'UHF tombe à 18%.

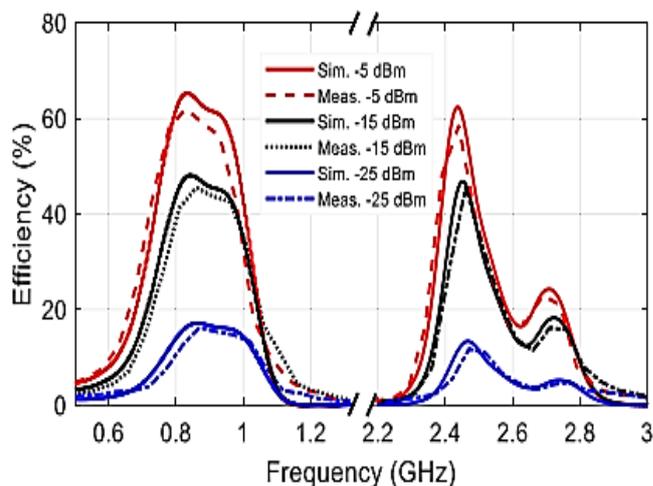


Figure I.10: Efficacité de conversion RF-DC.[9]

I.6.2. Réseau de Rectenna omnidirectionnels avec une stratégie de distribution de puissance RF améliorée

Dans la référence [10], Hucheng Sun a proposé une conception pour un réseau Rectenna omnidirectionnel qui peut récolter l'énergie RF dans plusieurs directions, Le document présente une nouvelle stratégie de distribution de puissance RF qui peut améliorer l'efficacité globale du réseau Rectenna. Tout d'abord, trois antennes sous-réseau bidirectionnelles sont conçues en composant le réseau d'antennes pour une capacité de réception omnidirectionnelle.

Ensuite, un réseau 3×3 est conçu, qui peut redistribuer les trois entrées de puissance RF variables de manière plus uniforme au niveau de ses ports de sortie. Le réseau est ensuite placé entre le réseau d'antennes et trois circuits de redressement pour former un réseau de rectenna, comme présenté dans la figure I.11.

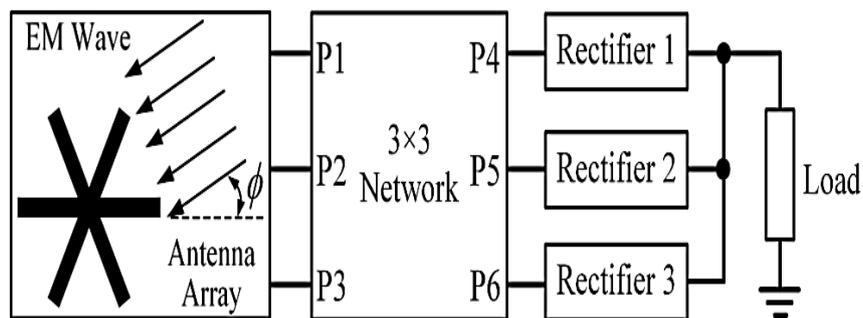


Figure I.11: Réseau d'antennes proposé avec stratégie de distribution de puissance RF. [10]

L'antenne quasi-Yagide la figure I.12 se compose d'un dipôle d'attaque, de trois directeurs parasites et d'un réflecteur, le réflecteur est constitué d'une surface rectangulaire relativement grande, toutes les couches métalliques sont imprimées sur un substrat FR4. Les quatre éléments formant un sous-réseau bidirectionnel, le réseau d'antennes final est réalisé en croisant trois sous-réseaux identiques au niveau de leurs zones de masse avec des angles de 60° (voir figure I.13). Le réseau d'antennes a été fabriqué et mesuré.

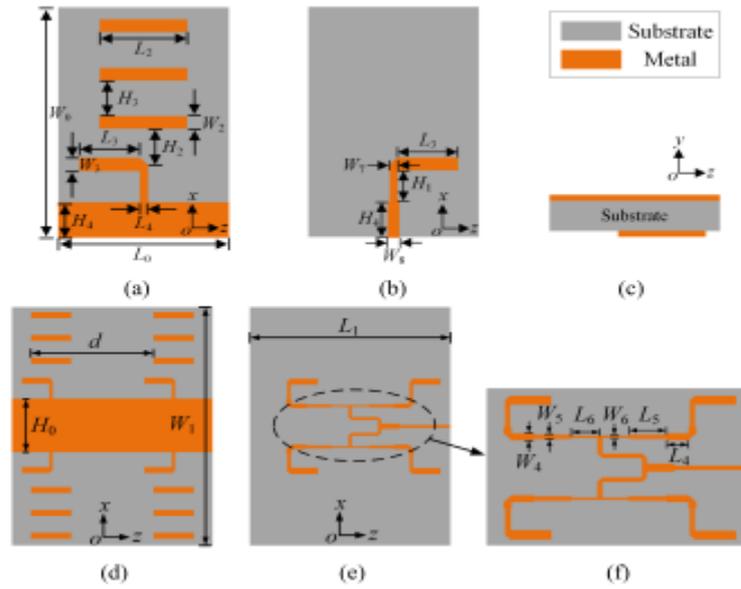


Figure I.12: Disposition d'antenne quasi-Yagi. [10]

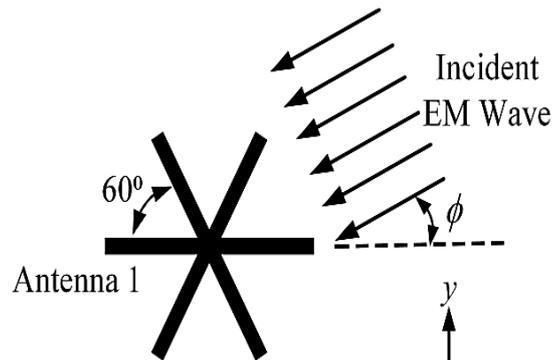


Figure I.13: Illustration du réseau d'antennes.[10]

La figure I.14 montre les paramètres S simulés et mesurés de l'antenne. D'après les résultats obtenus, on constate que la largeur de bande mesurée ($|S_{11}| < -10$ dB) est comprise entre 2,15 et 2,56 GHz. À la fréquence de 2,45 GHz, la valeur mesurée de $|S_{11}|$ est inférieure à -20 dB.

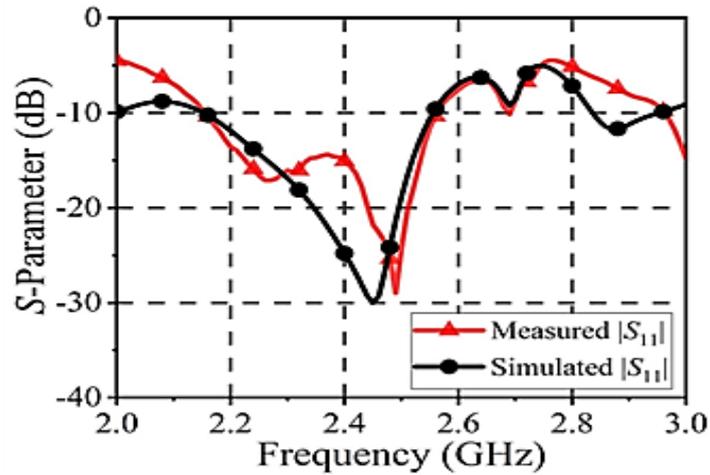


Figure I.14: Simulation et mesure $|S_{11}|$ de l'antenne 1.[10]

La conception de redresseur unique fonctionnant à 2,45 GHz est présentée, imprimée sur un substrat RO4350B de 0,762mm d'épaisseur et utilisant une diode Schottky HSMS-2860. L'alimentation inégale des redresseurs est analysée en utilisant une combinaison de deux redresseurs placés en parallèle et connectés à une résistance de charge R (400Ω) (voir la figure I.15).

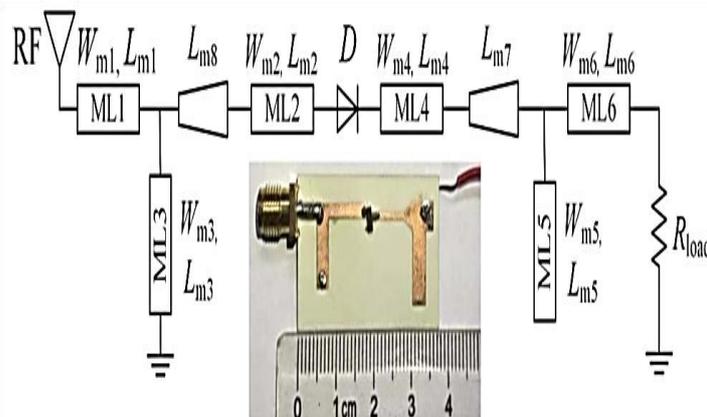


Figure I.15: Schéma et photographie du redresseur proposé.[10]

La figure I.16 présente les PCE (Power conversion efficiency) simulés en fonction de la puissance d'entrée pour différentes résistances de charge. On constate que la plage de puissance d'entrée opérationnelle pour un PCE supérieur à 50 % se rétrécit lorsque la résistance de charge dépasse $0,8k\Omega$. En revanche, lorsque la résistance de charge est inférieure à $0,8k\Omega$, la plage de puissance d'entrée opérationnelle est à peu près la même, mais le PCE maximal devient plus petit.

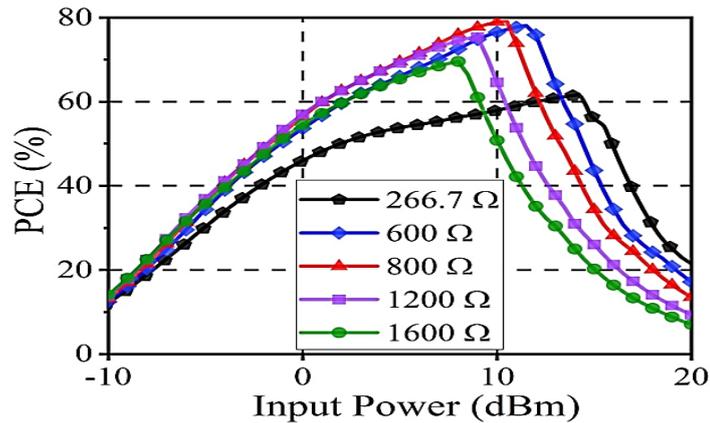


Figure I.16: PCE simulés du redresseur sous différentes résistances de charge.[10]

I.6.3. Nouvelle conception d'un élément Rectenna à 2,45 GHz et de la matrice pour la transmission d'énergie sans fil

Dans [11], Xi Li et Lin Yang et al ont proposé une nouvelle conception de rectenna qui peut être utilisée pour la transmission de puissance sans fil à 2.45 GHz. Elle est composée d'un élément d'antenne, d'un réseau alimenté en série à deux éléments et d'un réseau en cascade à quatre éléments. Un réseau d'antennes à deux éléments alimenté en série a été conçu en premier. Afin de réduire les pertes de transmission, la structure alimentée en série a été introduite dans la conception de l'antenne en rendant la ligne de transmission aussi courte que possible. Une ligne de transmission longue de $\lambda/2$ est ajoutée afin que les deux éléments rayonnent avec la même phase.

Par la suite, un ensemble d'antennes à quatre éléments a été conçu. Le réseau en cascade à quatre composants se compose de deux réseaux série avec deux composants et un diviseur de puissance à jonction en T, comme le montre la figure I.17.

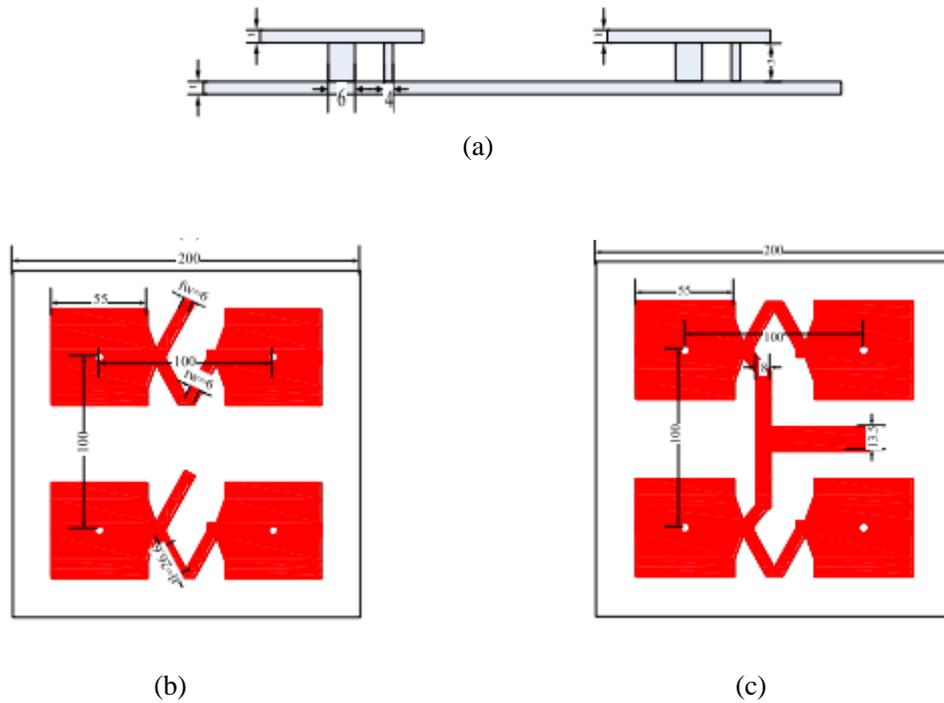


Figure I.17: la configuration de l'antenne : (a) Vue latérale de l'antenne Vue de face de : (b) deux éléments réseau alimenté en série. (c) quatre éléments .[11]

La figure I.18 (a) donne le S_{11} simulé et mesuré pour un réseau à deux éléments alimenté en série, la largeur de bande d'impédance relative de l'antenne est de 3,7% pour $S_{11} < -10$ dB.

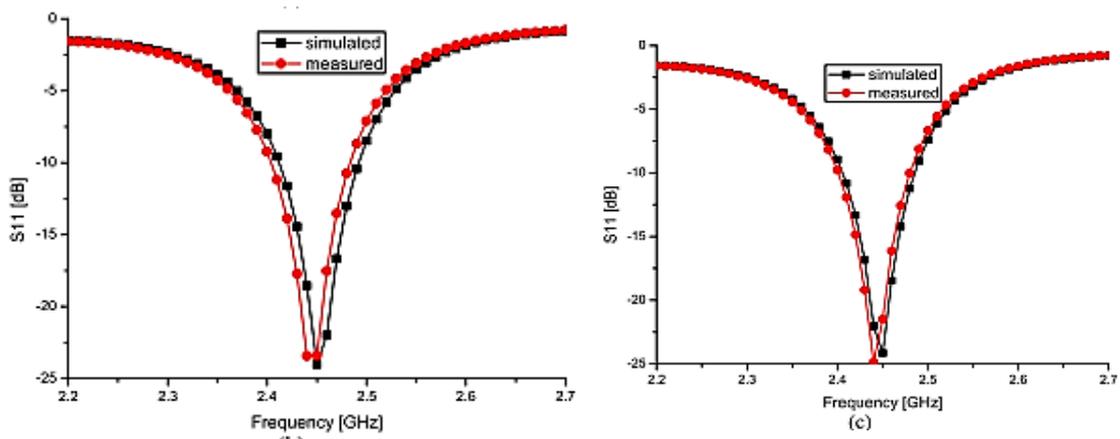


Figure I.18: S_{11} simulé et mesuré pour l'antenne conçue : (a) à deux éléments, (b) à quatre éléments.[11]

Chapitre I : Généralités sur les Rectennas

La figure I.18 (b) présente les valeurs simulées et mesurées de S_{11} du réseau à quatre éléments, la largeur de bande mesurée à -10dB est de 4%.

Dans ce travail, une diode de type (HSMS-282c) a été utilisée pour la conception du circuit de redressement sous forme de série. La figure I.19 illustre le circuit de redressement qui est imprimé sur le substrat ARLON AD255A avec $\epsilon_r = 2.55$ et 1mm d'épaisseur. Un transformateur micro-ruban en forme de T à trois sections sert de filtre passe-bas à faible entrée.

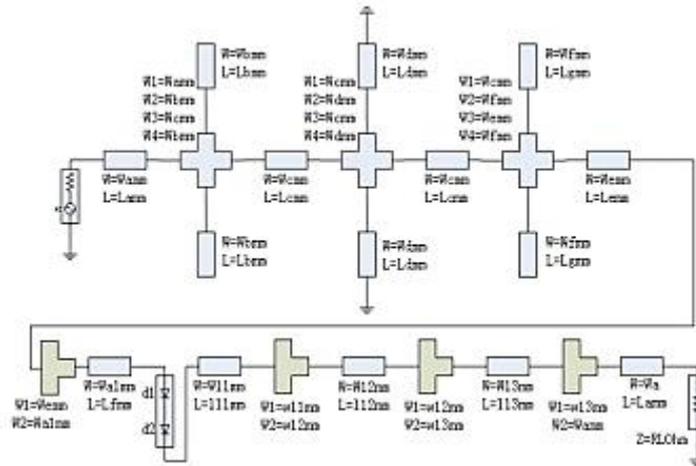


Figure I.19: Schéma du circuit de rectification conçu.[11]

La figure I.20 montre l'efficacité de conversion RF-DC mesurée avec différentes charges et puissances d'entrée à la fréquence de résonance 2,45 GHz. Les résultats mesurés montrent que l'efficacité de conversion maximale du circuit redresseur conçu peut atteindre 80 % pour une charge de 3500 Ω et une puissance d'entrée de 21 dBm à la fréquence de fonctionnement de 2,45 GHz.

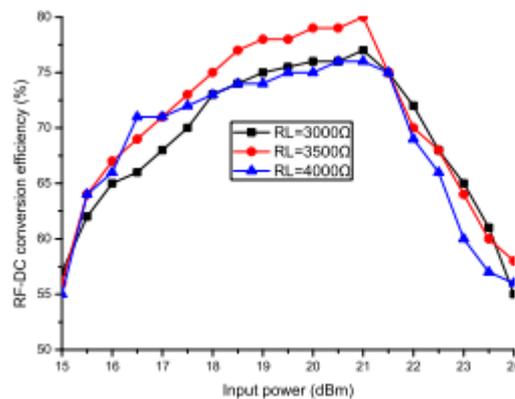


Figure I.20: Efficacité de conversion RF-DC mesurée avec différentes RL.[11]

La figure I.21 présente les caractéristiques d'efficacité de conversion de trois types de rectenna en fonction de différentes densités de puissance lorsque la charge résistive de 3500Ω est connectée au circuit. On constate que le rendement de conversion maximal peut atteindre près de 77,2 % sous différentes densités de puissance.

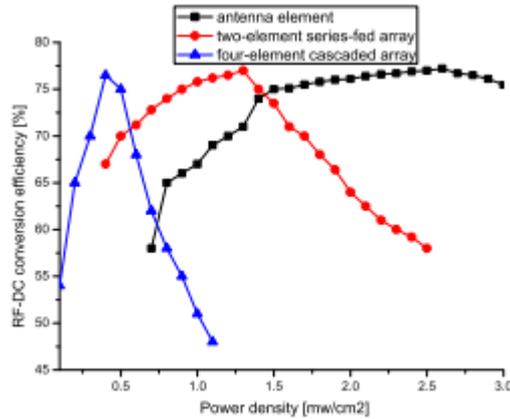


Figure I.21: L'efficacité de conversion de trois types de rectenna différentes densités de puissance.[11]

I.6.4. Une antenne à fente large bande pour le transfert d'énergie sans fil à la bande LTE

Le travail publié en [12], propose une conception pour une rectenna à fente large bande qui peut récolter efficacement la puissance sans fil dans la bande Long-Term Evolution (LTE). Trois antennes à géométrie conventionnelle (CG), à fentes rectangulaires (RS) et à (AS)(deux fente annulaires) sur le patch de rayonnement sont conçues et comparées. Le redresseur est conçu en intégrant un nouveau réseau d'adaptation large bande à deux branches avec un circuit redresseur doubleur.

L'évolution de la structure étudiée est présentée dans la figure I.22. On utilise une antenne large bande, dont la conception est basée sur un patch à fente et un plan de masse. L'antenne est imprimée sur un substrat FR4 mince et est alimentée par une ligne micro-ruban de 50Ω . En gravant des fentes sur le patch de rayonnement, le chemin du courant de surface de l'antenne est modifié par l'introduction du (RS) et de l'AS.

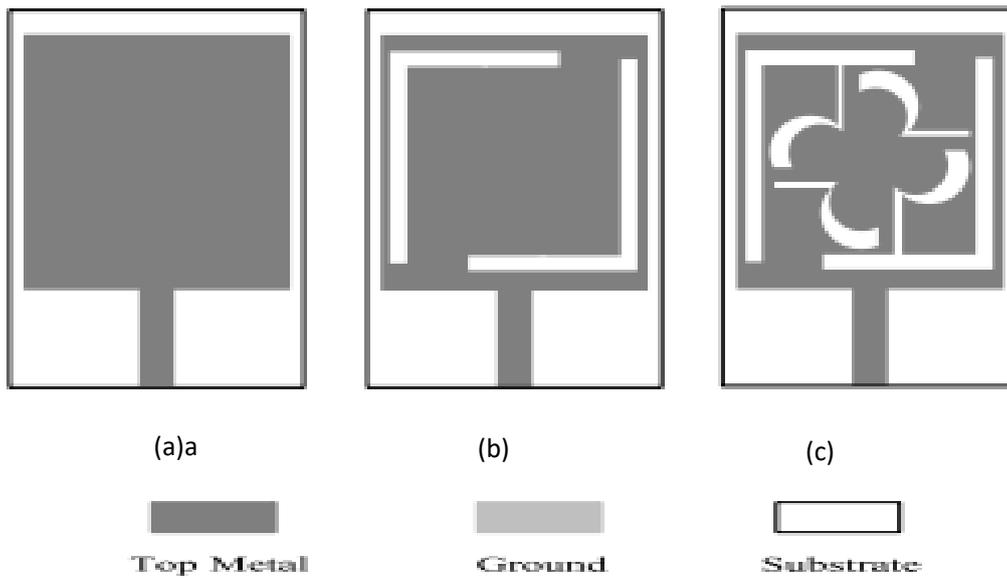


Figure I.22: Antenne avec trois patches différents.

(a) Patch avec CG. (b) Patch avec RS. (c) Patch avec AS.[12]

Les performances simulées de l'antenne en termes de caractéristiques d'adaptation et de résonance sont étudiées et comparées.

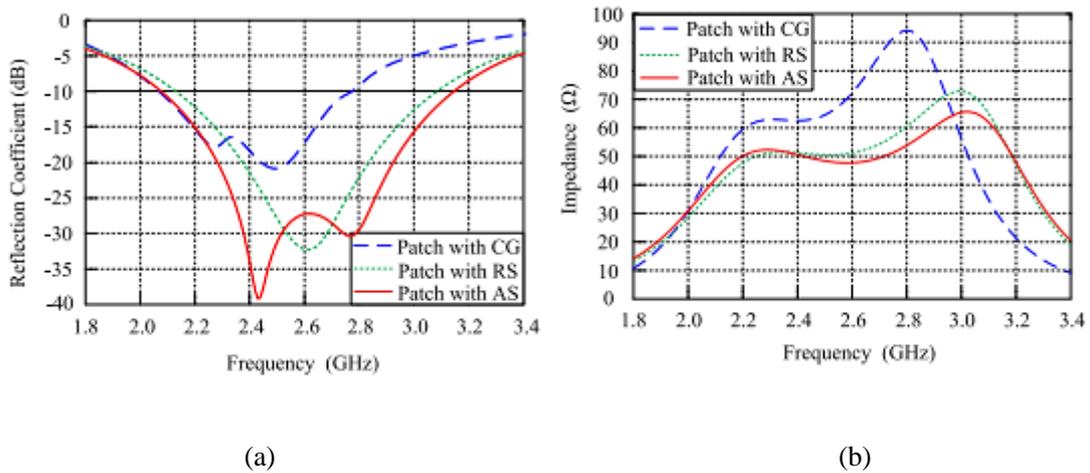


Figure I.23: Performance simulée de l'antenne des trois cas.[13]

La figure I.23(a) montre que l'antenne avec le patch conventionnel a un coefficient de réflexion inférieur de -20,6 dB à 2,51 GHz avec une largeur de bande allant de 2,15 à 2,8 GHz. En gravant les RS, le coefficient de réflexion est ramené à -32 dB à 2,6 GHz, et la largeur de bande est portée à 910 MHz, Cependant, l'antenne avec AS a un coefficient de réflexion optimal de -39 dB à 2,42 GHz et une largeur de bande de plus de 1 GHz.

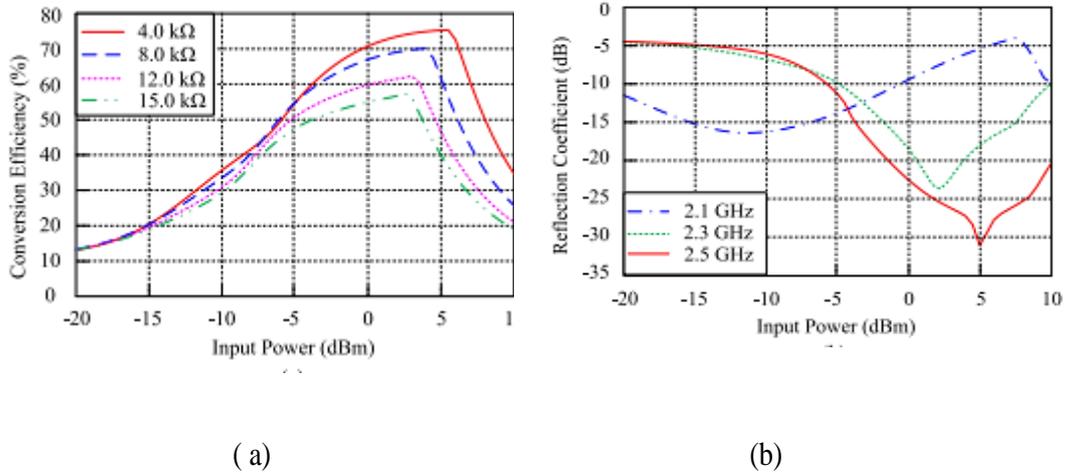


Figure I.25: Performances simulées du redresseur par rapport à la puissance d'entrée. [13]

On peut voir que l'efficacité augmente progressivement puis diminue avec l'accroissement de la puissance d'entrée allant de 20 à 10 dBm. L'efficacité de conversion du redresseur est supérieure à 30% sous la puissance d'entrée de 10 à 7,5 dBm lorsque la charge varie. Avec la diminution de la charge, l'efficacité de conversion est améliorée, et la performance optimale est atteinte avec la valeur de pointe de 71% à environ 5 dBm lorsque la résistance de charge est de 4kΩ.

La figI.25(b) montre la comparaison du coefficient de réflexion simulé du redresseur par rapport à la puissance d'entrée pour différentes fréquences avec la charge optimale de 4 k Ω. Le niveau de puissance d'entrée optimal est d'environ 12,5 dBm à la fréquence de 2,1 GHz. Avec l'augmentation de la fréquence, le niveau de puissance d'entrée optimal est également augmenté entre 5 et 0 dBm dans la bande LTE-2300/2500.

I.6.5. Un Rectenna Compact Avec Diagramme de rayonnement Plat :

Dans la référence [14], les auteurs ont étudié une rectenna intégrée à un circuit de de redressement. Cette conception est dédiée aux applications de capteurs sans fil intérieurs autoalimentés placés dans les coins des bibliothèques ou des salles de classe pour surveiller la température et l'humidité.

L'antenne patch carrée en réseau avec diagramme de rayonnement à plan plat est imprimée sur un substrat fin et flexible RT/duroid5880 avec une couverture angulaire frontale de 90° de

Chapitre I : Généralités sur les Rectennas

rayonnement le plus plat possible. L'antenne patch en micro ruban fonctionne à 5,8 GHz. N dipôles, qui représentent les sources d'énergie, sont répartis uniformément dans le champ lointain du réseau de réception à six éléments, comme le montre la figure I.26

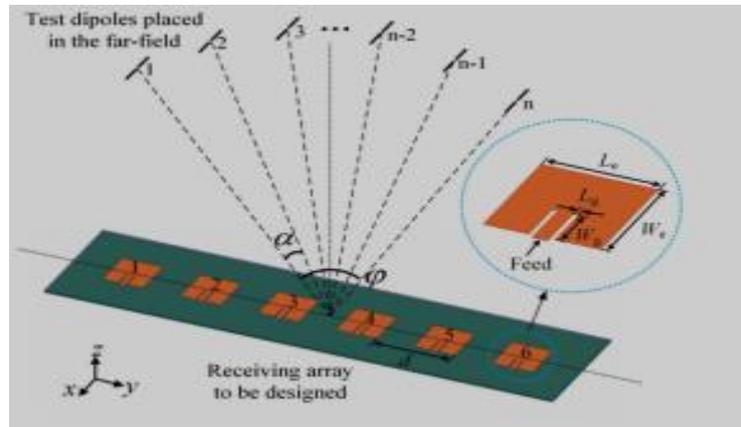


Figure I.26: Modèle de rayonnement simulé du plan H.[14]

La figure I.27 représente les diagrammes de rayonnement de la structure proposée. D'après cette figure, on peut voir que le diagramme de rayonnement est plat avec moins de 1 dB de fluctuation sur une couverture angulaire de -45° à 45° . Le gain du diagramme de rayonnement planaire est systématiquement supérieur de 4,7 dB à celui d'une antenne dipôle unique.

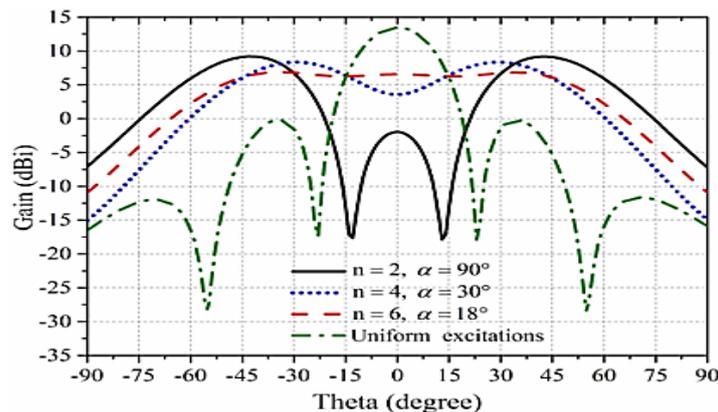


Figure I.27: Diagramme de la conception proposée.[14]

Le circuit de redressement est réalisé à l'aide de quatre diodes Schottky. Le rectenna fonctionne dans la bande de fréquence ISM2.4GHz, et la taille globale est de 5*4 patches (la figure I.28), ce qui peut réaliser une collecte de puissance efficace.

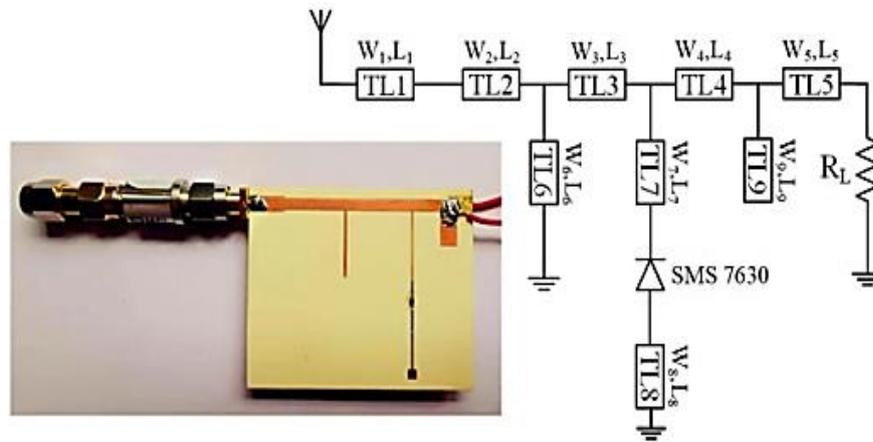


Figure I.28: Schéma et photo graphique du redresseur proposé[14]

Les résultats de simulation et de mesure de la figure I.29 montrent que le redresseur atteint son efficacité maximale de 61 % lorsque la densité de puissance d'entrée est de 382 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Toutefois, si la densité de puissance diminue, la tension de sortie DC et l'efficacité de redressement diminuent toutes deux en conséquence

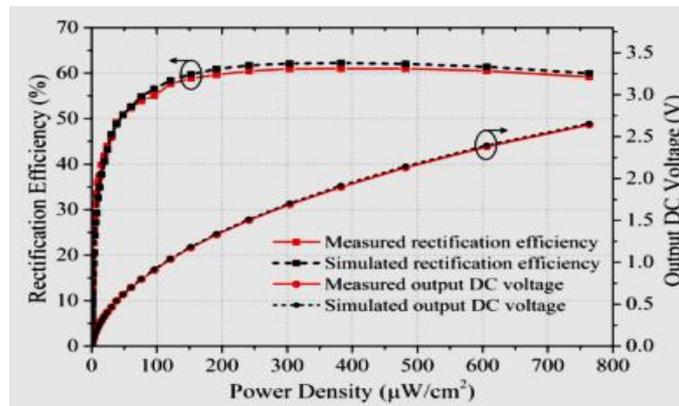


Figure I.29: Tension de sortie CC et l'efficacité de rectification[14]

I.6.6. Rectenna avec antenne dipôle compacte intégrée avec une structure Méta surface

Le document [15], décrit une antenne dipolaire compacte, bipolarisée et assistée par une structure méta surface pour la collecte d'énergie RF. La conception proposée comprend une surface métamérique qui améliore la largeur de bande et l'efficacité du rayonnement de l'antenne. La couverture spatiale de la rectenna est également discutée, et les mesures montrent que la rectenna est capable de collecter de l'énergie RF à partir de sources avec différents angles d'incident. La structure finale est présentée dans la figure I.30.

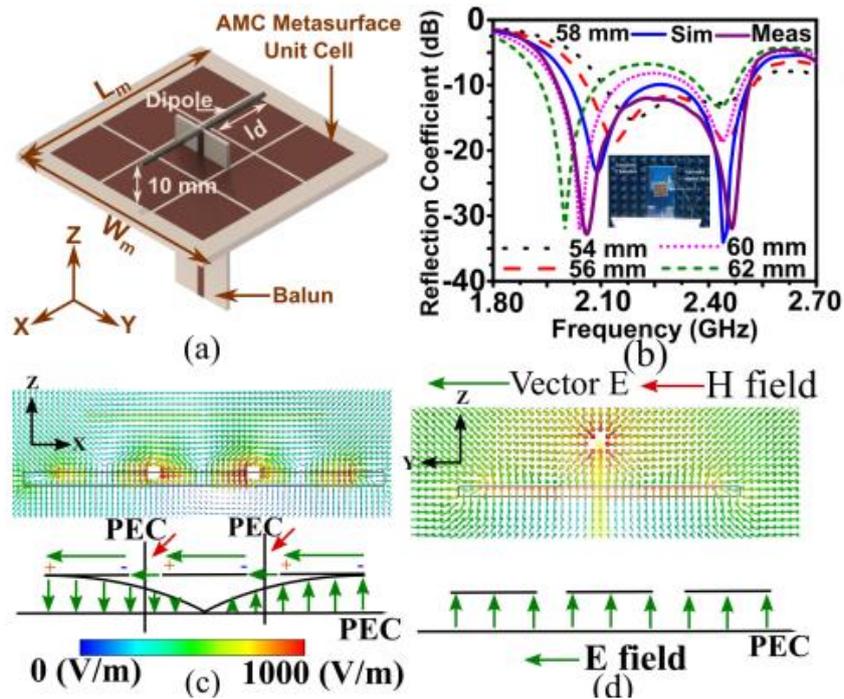


Figure I.30: (a) Configuration de l'antenne (b) Variation de $|S_{11}|$ (c) Distribution du champ électrique dans le plan XZ (d) dans le plan YZ.[15]

Les paramètres de conception de l'antenne sont optimisés pour atteindre une bonne adaptation d'impédance et un gain élevé. Les résultats issus de simulations et de mesures sont donnés dans la figure I.31. Une légère différence entre les valeurs simulées et mesurées à 2,1 GHz en raison des effets des tolérances de fabrication. L'efficacité de rayonnement est supérieure à 70,8 % sur toute la plage de fonctionnement de l'antenne, atteignant une valeur maximale.

L'analyse paramétrique montre qu'un PCE est maximal à 0 puissance d'entrée dBm à environ 2,4 GHz. La charge optimale de $1\text{ K}\Omega$ et la puissance d'entrée de 0 dBm sont utilisés pour concevoir un circuit de redressement mono série. Les résultats montrent que la rectenna atteint un PCE de 55%, et la LED connectée à travers les redresseurs est alimentée avec succès en utilisant l'énergie récoltée. Ainsi, l'ajout de la structure méta surface améliore considérablement la performance de la récolte d'énergie RF.

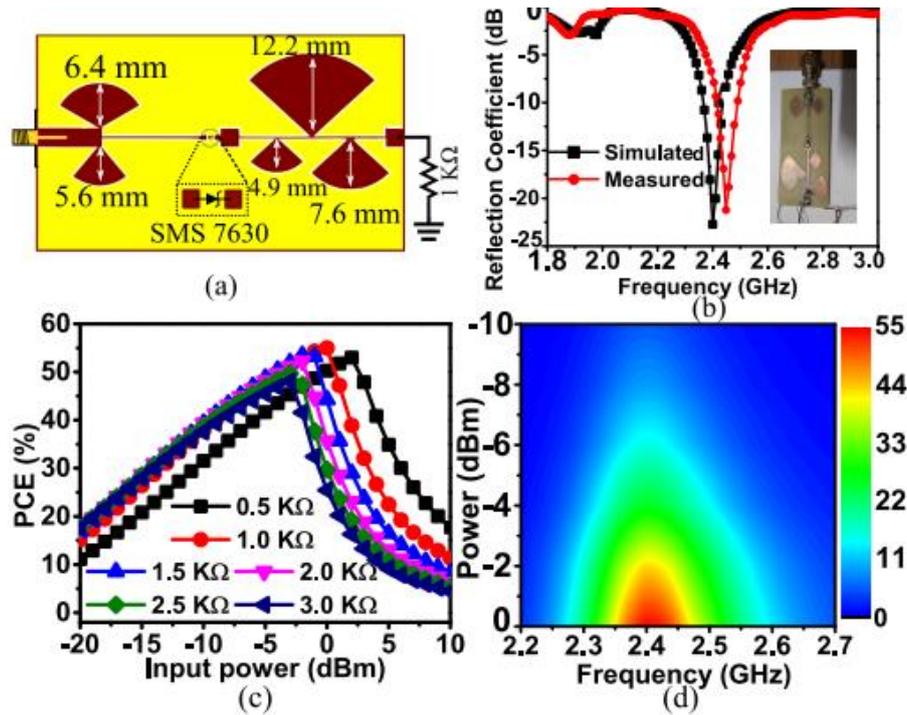


Figure I.31: Paramètres de conception du redresseur

(a)Prototype du redresseur, (b) $|S_{11}|$ (dB), (c) paramétrique du PCE, (d) la carte couleur 2D.[15]

I.7.Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté une brève sur le rectenna et de leur composantes et leur rôle importance pour la récupération d'énergie. Et on a présente l'état de l'art sur l'évolution des rectenna et il résume les résultats des activités de recherche des chercheurs dans le domaine de la conception des rectenna.

CHAPITRE 02 : Conception et simulation des Rectennas à 2.4 GHz

II.1.Introduction

Dans ce chapitre on va étudier deux Rectenna fonctionnant à une fréquence de 2.45 GHz. L'étude est constituée de deux parties :

- La conception d'une antenne via le logiciel HFSS.
- La conception et la simulation d'un circuit de conversion RF-DC via le logiciel ADS.

II.2. Outils de simulation

La réalisation et la mesure des antennes nécessitent l'utilisation d'outils de simulation électromagnétique pour réduire les coûts. Dans cette étude, deux logiciels ont été utilisés pour obtenir les résultats de simulation : ADS (Advanced Design System) et HFSS (High Frequency Structure Simulator). Les caractéristiques de ces logiciels sont présentées ci-dessous.

a) Advanced Design System (ADS)

ADS, développé par Keysight Technologies, est un logiciel de conception électronique 2.5D utilisant la méthode des moments (MoM). Il offre un environnement optimisé pour la conception de produits électroniques, en particulier pour les applications RF. Ce logiciel prend en charge toutes les étapes de conception, du dimensionnement du circuit à la simulation fréquentielle et temporelle, en passant par la vérification des règles de conception et la simulation électromagnétique. Ces fonctionnalités permettent de caractériser et d'optimiser un circuit électronique sans avoir besoin de changer d'outil. Le module Momentum d'ADS est spécifiquement dédié à la simulation électromagnétique. Toutes ces fonctionnalités sont essentielles dans le développement des circuits de récupération d'énergie RF.

b) High Frequency Structure Simulator (HFSS)

HFSS, développé par ANSYS, est un logiciel de simulation électromagnétique 3D basé sur la méthode des éléments finis (FEM). Il est largement utilisé pour la conception des structures électromagnétiques telles que les lignes de transmission et les antennes. Dans notre cas, ce logiciel nous permet d'optimiser tous les paramètres

de nos antennes afin de répondre à nos exigences spécifiques. Il prend en charge l'ensemble du processus de conception de l'antenne, depuis le dimensionnement jusqu'à la simulation de ses performances.

II.3. Conception et modélisation d'un rectenna avec antenne compacte à résonateur diélectrique (DRA)

Dans ce section on va étudier une rectenna composée une antenne Dra cylindrique et redresseur, qui fonctionnes dans la fréquence 2.45 GHz.

II.3.1. Antenne DRA de forme cylindrique

a. Configuration de l'antenne

L'antenne DRA omnidirectionnel miniaturisé proposée comprend deux résonateurs diélectriques cylindriques qui ont le même rayon mais des hauteurs différentes avec une région d'air à l'intérieur. Ces deux résonateurs sont placés sur deux substrats.

À l'intérieur de la région d'air, un cylindre diélectrique relié à la couche diélectrique inférieure est conçu pour fixer la sonde d'alimentation, a des paramètres de $G_L \times G_L \times H_3 = 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. Ils sont fabriqué ensemble par un matériau diélectrique imprimable avec $\epsilon_{r3} = 8$ et $\tan \delta = 0,0033$. Le plan de masse est sous le substrat inférieur qui est de type RO4003C. La structure est alimentée par une ligne micros-trip avec une impédance de 50 ohms, voir la figure II.1.

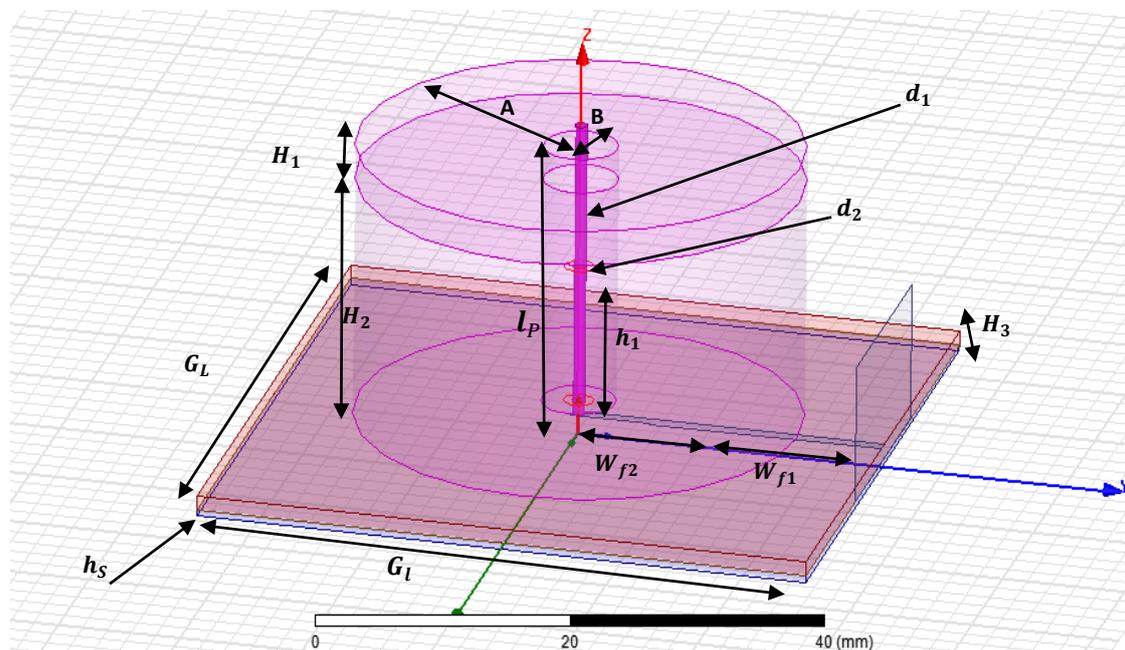


Figure II.1 : Géométrie de l'antenne

Chapitre II : Conception et simulation des Rectennas à 2.4 GHz

Les dimensions et les matériaux utilisés lors de la conception de cette antenne sont listés dans les tableaux II.1, II.2 et II.3.

Tableau II.1 : Dimensions et paramètres des matériaux utilisés dans la conception d'antenne.

Couche	Type du Matériau	permittivité	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Hauteur (mm)
Substrat	RO4003C	3.55	50	50	0.508
LA couche diélectrique inférieure	Matt couche infère	8	50	50	1

Tableau II.2 : Dimensions de l'antenne DRA.

couche	Type du matériau	Loss tangente	Permittivité	longueur (mm)	Diamètre (mm)
cylindre diélectrique	Matt Diele	0.0033	8	10	1.5
La couche diélectrique supérieure	Matt super	0.00065	92	2.5	
La couche diélectrique moyenne	Matt couche moyenne	0.00015	16	17.5	
probe	Cuivre	1	1	21.508	1

Tableau II.3 : Dimensions de l'antenne DRA.

Paramètres	Valeurs (mm)	Paramètres	Valeurs (mm)
a	15	h1	10
H1	2.5	h2	1
H2	17.5	GL	50
Wf1	1.2	Lf1	18
Wf2	1	Lf2	7
b	3	H3	1
d2	2.4	d1	1
LP	21.508		

2. Résultats de la Simulation

a. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est tracé sur la figure II.2. D'après cette figure, on constate que l'antenne résonne autour de la fréquence 2.45 GHz, en allant de 2,23 GHz à 2.65 GHz.

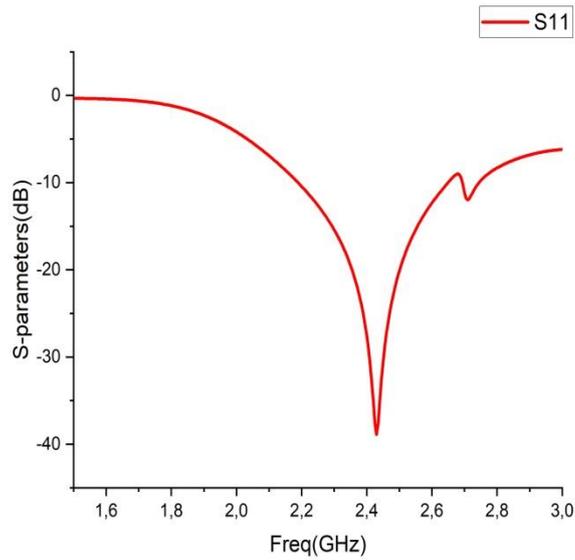


Figure II.2 : Coefficient de réflexion de l'antenne.

b. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement 2D du concept proposé est représenté dans la figure II.3. Le diagramme de rayonnement est tracé à la fréquence 2.45GHz. Il a une forme bidirectionnelle dans le plan YZ

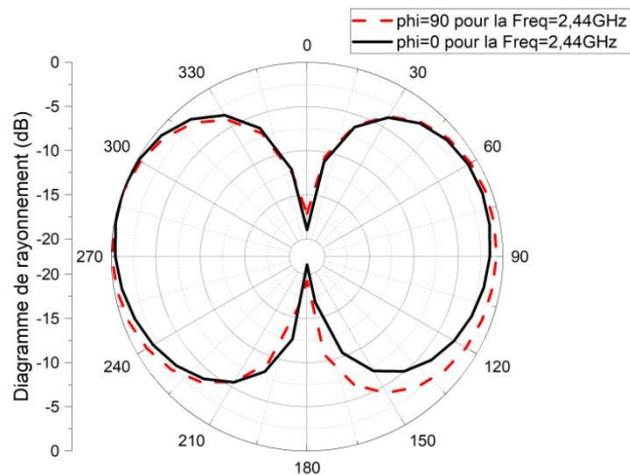


Figure II.3 : diagramme de rayonnement en 2D.

II.3.2. Circuit de conversion RF-DC

1. Conception de redresseur

Dans la référence [16] pour faire correspondre l'impédance du redresseur à l'impédance source, on a construit un réseau correspondant composé d'un condensateur C_1 et d'une inductance L_1 entre la source et le redresseur. Une charge résistive R_1 est ajoutée à la borne de sortie du circuit complet pour mesurer la puissance de sortie CC voir La figure II.4.

La topologie utilisée pour notre redresseur est Grainacher circuit doubleur de tension. La principale caractéristique de ce circuit est qu'il double simplement la tension d'entrée à sa borne de sortie. Les diodes utilisées pour le redresseur sont des diodes de type HSMS2850 Schottky à polarisation nulle. La tension seuil de cette diode est de 0,15 V.

Tableau II.4 : paramètres de circuit de conversion.

Paramètre	Valeur	PARAMATER	VALER
Fréquence	2.4GHZ	Puissance RF en entre	[0 ; -15] dBm
C5	0.27Pf	L1	5.35nH
C6	150 pF		
C7	150 pF		

2. Le type de diode utilisé

Dans ce travail, on a utilisé une diode Schottky de la famille Agilent HSMS285x. Les différents paramètres du modèle ADS de la diode Schottky, obtenus à partir du Datasheet de la diode, sont donnés dans le tableau 5.

Tableau II.5 : Paramètres de la diode Schottky HSMS2850 et leurs valeurs.

Nom du Paramètre	Symbole	Valeur
Tension de claquage	B_v	3.8 V
Capacité de jonction au repos	C_{j0}	0.18 pF
Energie de gap	E_g	0.69 eV
Courant de claquage inverse	I_{BV}	3e-4 A
Courant de saturation	I_s	3e-6

Chapitre II : Conception et simulation des Rectennas à 2.4 GHz

Coefficient d'émission	N	1.06
Résistance série	R_s	25 Ω
Potentiel de jonction	P_B (Vj)	0.35
Exposant de la température	P_T (XTI)	2
Coefficient de jonction	M	0.5

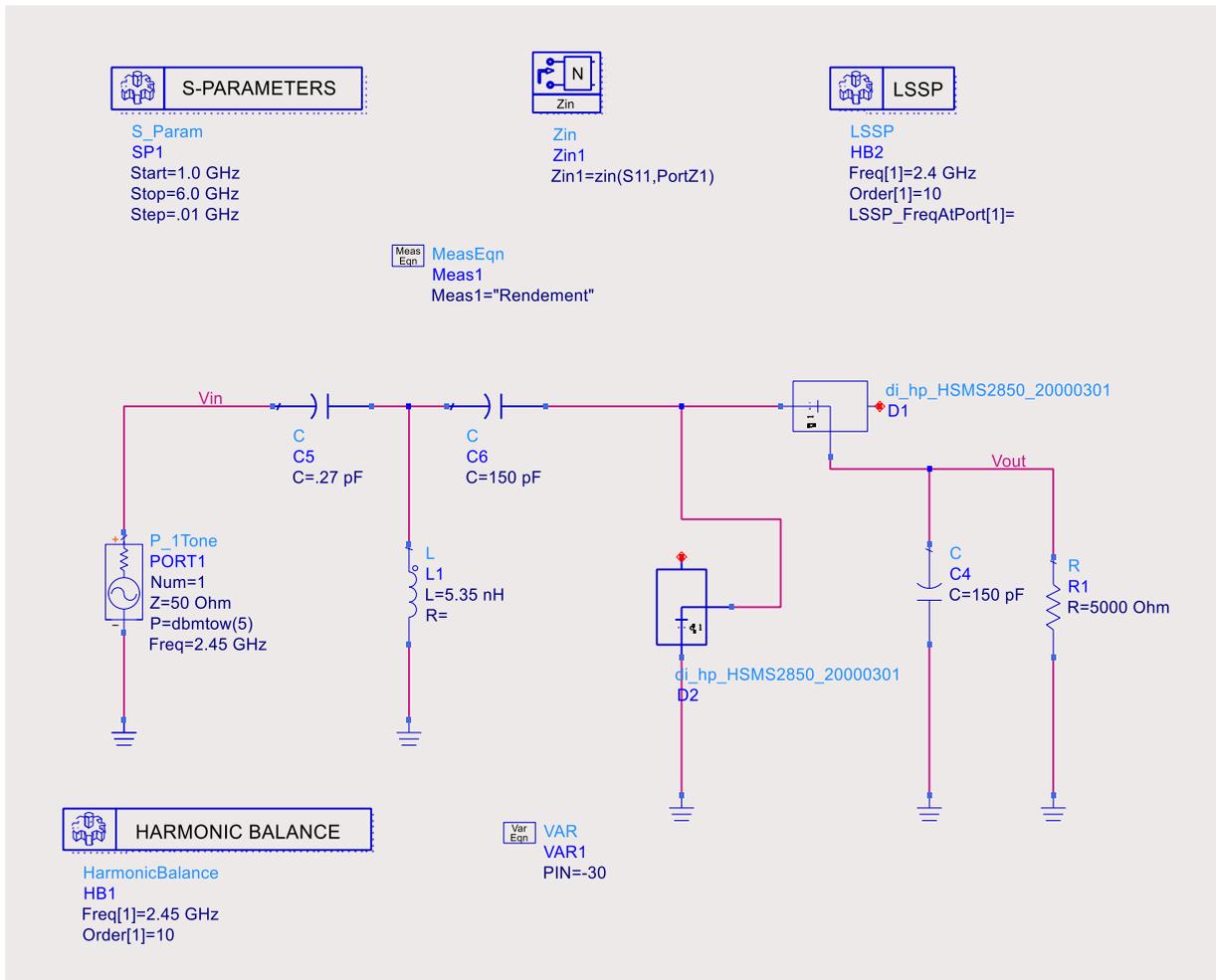


Figure II.4 : Circuit de conversion RF-DC sous ADS.

3. les Simulateurs de Logiciel ADS

a. Harmonic Balance

Harmonic Balance est une technique de simulation utilisée dans le domaine de la conception des circuits électroniques et de systèmes non linéaires. Elle permet

Chapitre II : Conception et simulation des Rectennas à 2.4 GHz

d'analyser et de résoudre des circuits qui contiennent des éléments non linéaires et qui fonctionnent aux différentes fréquences. Contrairement à la méthode classique de résolution des équations différentielles, Harmonic Balance représente les signaux périodiques par leur contenu harmonique, simplifiant ainsi les calculs.

b. LSSP (Large-Signal S-Paramètre)

LSSP (Large-Signal S-Paramètre) est une extension des paramètres S (S-Paramètres) traditionnels utilisés pour caractériser les circuits électriques linéaires. Les paramètres S décrivent la relation entre les signaux incident et réfléchi dans un circuit. LSSP, en revanche, est utilisé pour caractériser les circuits non linéaires et prendre en compte les effets de la distorsion harmonique, en particulier lorsque les signaux atteignent des niveaux importants.

c. Paramètres S

Les paramètres S (S-Paramètres) sont utilisés pour caractériser le comportement d'un circuit électrique linéaire. Ils décrivent la relation entre les signaux qui entrent et sortent d'un réseau électrique ou d'un composant. Les paramètres S sont souvent utilisés dans les domaines de la conception de circuits haute fréquence, des télécommunications et des systèmes de transmission de signaux. Ils peuvent être utilisés pour analyser les propriétés de réflexion, de transmission et de dispersion d'un circuit.

4. Résultats de simulation

Par l'utilisation du simulateur S-Paramètres du logiciel ADS, les résultats obtenus sont illustrés sur la figure II.5. D'après cette figure, on remarque que le coefficient réflexion S_{11} atteint une valeur de -25 dB à la fréquence de 2.4 GHz ce qui montre que ce redresseur est bien adaptée à cette fréquence.

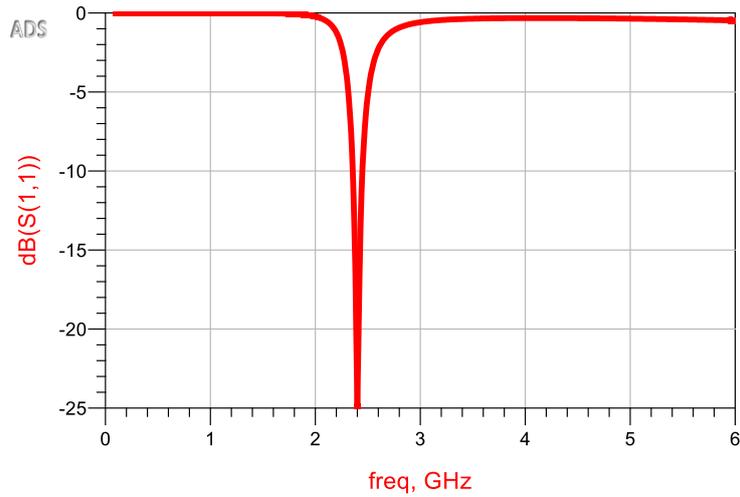


Figure II.5: Coefficient de réflexion S11.

La figure II.6 présente les résultats de simulation non-linéaire du circuit de redressement à la fréquence de 2,4 GHz avec une puissance RF en entrée de -15dBm à 0dBm. Ces résultats montrent que la puissance du signal d'entrée concentrée principalement dans la fondamentale à 2.4 GHz ($V_{in} \approx 10\text{dBm}$) est transférée vers la composante continue du signal de sortie ($V_{out} = 15 \text{ dBm}$).

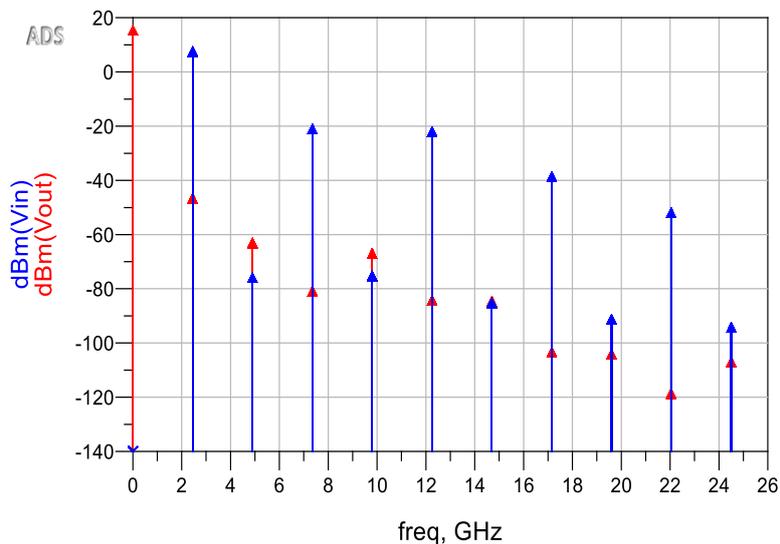


Figure II.6: Spectre des signaux d'entrée et de sortie du redresseur simulé.

Chapitre II : Conception et simulation des Rectennas à 2.4 GHz

La figure II.7 montre l'évolution dans le temps de la tension d'entrée et de sortie du convertisseur RF-DC à la fréquence 2.4 GHz. La tension d'entrée maximale est 120 mV tandis que la tension de sortie redressée est d'environ 430 mV.

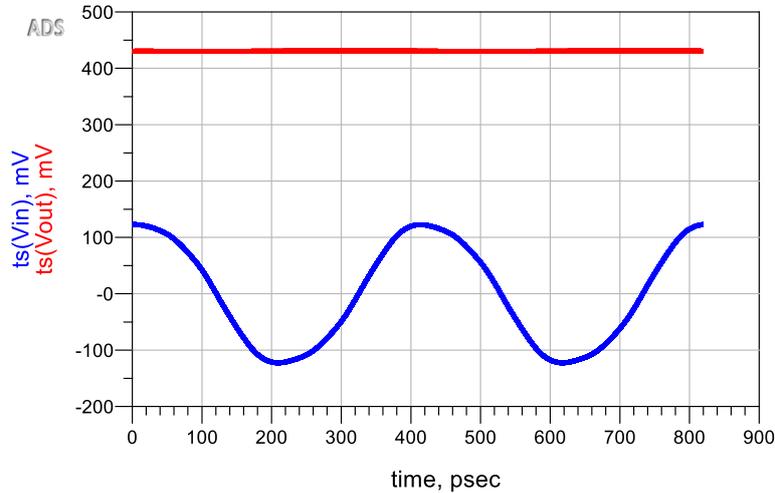


Figure II.7: Forme temporelle du signal en entre et en sortie du redresseur.

Après la conception et l'intégration du filtre d'adaptation dans le circuit de redressement, il est possible de montrer son effet sur le comportement de celui-ci. Les résultats de simulation illustrés sur la figure II.8 confirment que l'impédance d'entrée est modifiée après adaptation à cause du changement de la puissance réellement injectée dans la diode et que le redresseur est adapté à une fréquence égale à 2.44 GHz qui est légèrement différente de notre fréquence de conception.

Les résultats obtenus montrent aussi que le circuit redresseur en topologie doubleur de tension présente une impédance d'entrée qui vaut $42.379+j8.83$ à la fréquence 2.45 GHz

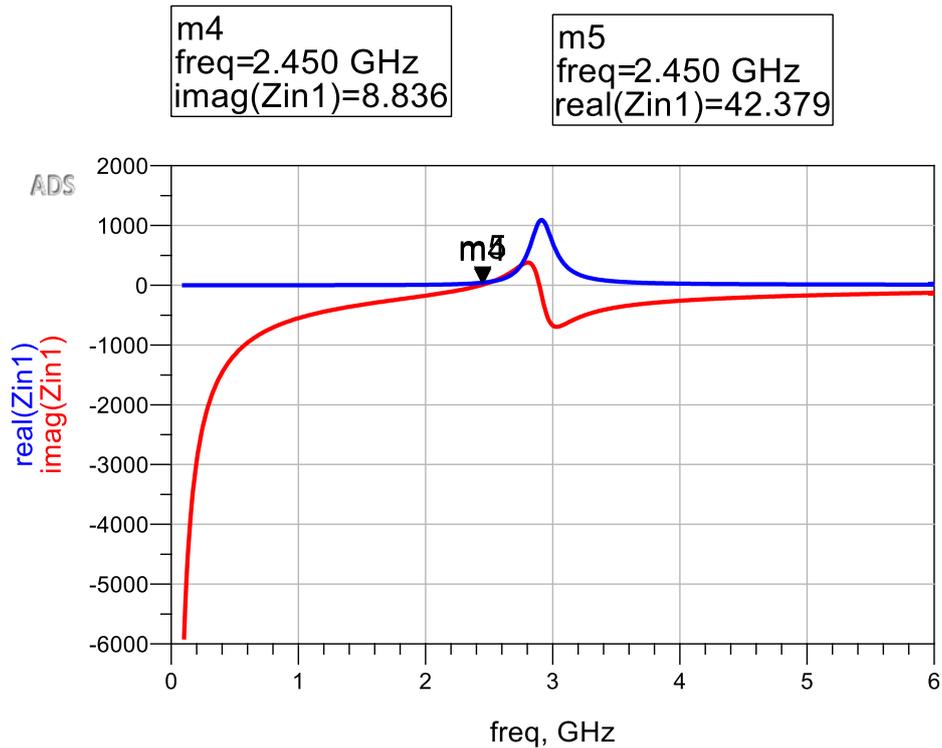


Figure II.8: parties réelle et imaginaire

II.4. Analyse et conception d'une rectenna à polarisation circulaire CP

Dans ce section, on va étudier une rectenna composée d'une antenne Dra rectangulaire et d'un redresseur qui fonctionne à la fréquence 2.45 GHz. Et on a étudié les caractéristiques de structure à face spirale qui sont étudiées pour les applications de captage d'énergie RF (RFEH) et récupération d'énergie radiofréquence, visant à augmenter la puissance de captage de l'atmosphère sur-circulaire, L'utilisation de spirales métalliques pour réaliser des caractéristiques multi-résonance et créer des caractéristiques CP dans le DRA s'inspire des bandes métalliques chargées de DRA triangulaire

II.4.1. Antenne DRA rectangulaire

1. Configuration de l'antenne

L'antenne proposée est une antenne à résonateur diélectrique rectangulaire (RDRA), sa structure est illustrée à la figure II.9.

Chapitre II : Conception et simulation des Rectennas à 2.4 GHz

Le DR proposé, avec la dimension $W_{dr} \times L_{dr} \times h_{dr}$, est fabriqué du matériau HIK K10 ($\epsilon_r = 10$). Le DR est placé sur un substrat de type époxy FR4 avec une permittivité diélectrique $\epsilon_r = 4,4$ et une épaisseur de 1,6 mm . L'élément rayonnant est excité par une sonde coaxiale.

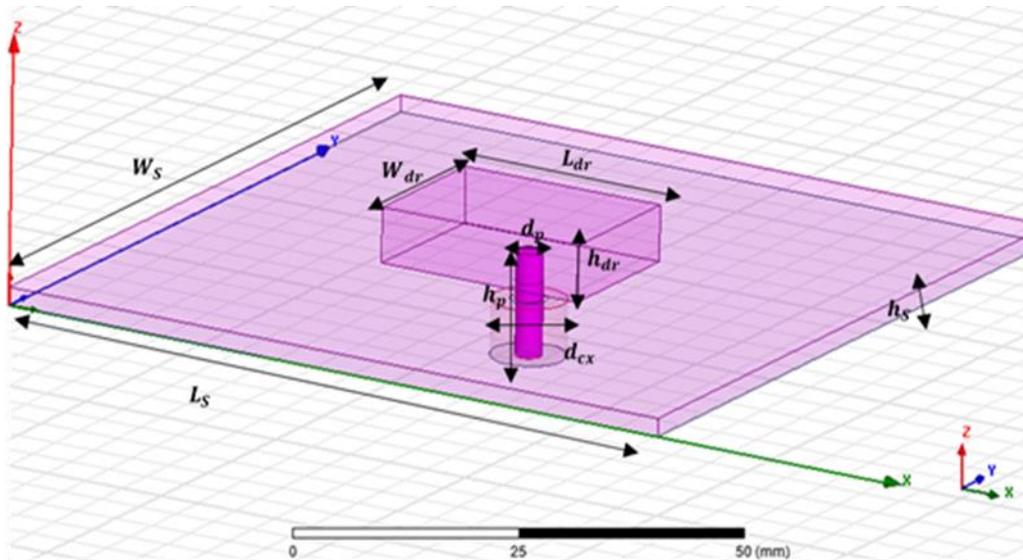


Figure II.9 : Géométrie de l'antenne

Les dimensions et les matériaux utilisés lors de la conception de cette antenne sont résumés dans les tableaux II.6 et II.7.

Tableau II.6 : Dimensions et paramètres des matériaux utilisés dans la conception d'antenne.

	Type du matériau	Permittivité	Longueur (mm)	Hauteur (mm)	Longueur (mm)	diamètre (mm)	dimension
substrat	FR4	$\epsilon_r = 4.4$	64.6	1.6	68.2		$W_s * L_s * h_s$
Grounds	(2D)		64.6		68.2		$W_s * L_s * h_s$
DRA	HIK K10	$\epsilon_r = 10$	14	6.3	12		$W_{Dr} * L_{Dr} * H_{Dr}$
PROB	pec	$\epsilon_r = 1$		11.6		1.5	
COAX	téflon	$\epsilon_r = 2.1$		6.3		4.3	

Tableau II.7 : Dimensions de l'antenne DRA

Paramètres	Valeurs (mm)
L_{Dr}	15

L_s	68.2
W_s	64.6
W_{Dr}	12
H_s	1.6
H_{Dr}	3
D_p	2.4
dc	1.15

2. Résultats de simulation

a. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est tracé sur la figure II.10. D'après cette figure, on constate que l'antenne résonne autour de la fréquence 5.8 GHz. avec une bande passante de 5.37GHz à 7.14GHz (17.7 %).

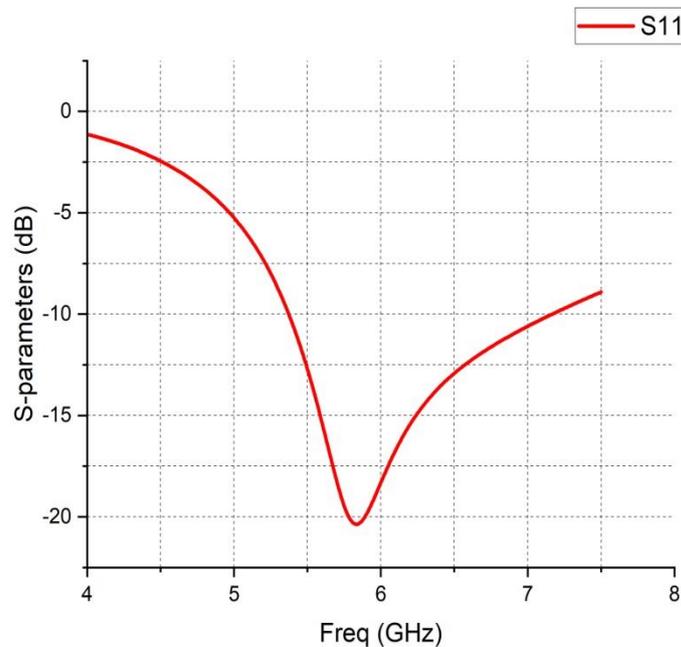


Figure II.10: Coefficient de réflexion de l'antenne.

On a remarqué que l'utilisation des matériaux à faible permittivité en DRA entraîne un fonctionnement à large bande d'impédance, mais avec un grand volume pour l'antenne. D'autre part, une permittivité élevée donne un design compact ou profil bas de DRA.

Chapitre II : Conception et simulation des Rectennas à 2.4 GHz

Pour concevoir un DRA compact, on a ajouté une plaque métallique de cuivre (Figure II.11) sur la surface supérieure du DRA avec une épaisseur de 0.01 mm, cette technique est basée sur la théorie d'image.

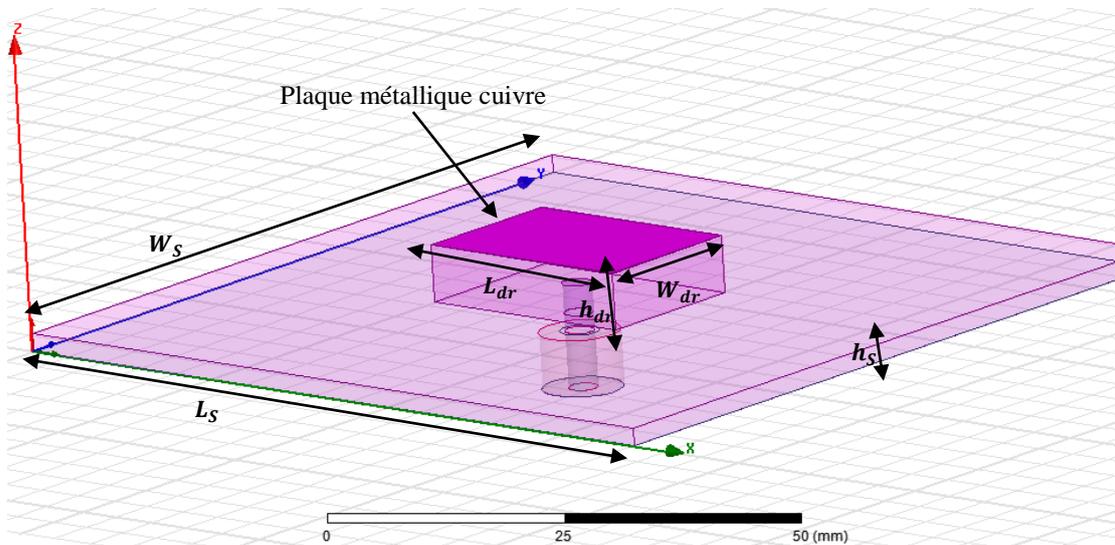


Figure II.11 : Miniaturisation de l'antenne proposée

Après avoir ajouté la plaque métallique sur le DRA, on a calculé le coefficient de réflexion est le tracé sur la figure II.12. Il a été démontré que la fréquence de résonance et la bande passante fractionnée sont réduites en ajoutant cette plaque métallique. On constate aussi que l'antenne résonne autour de la fréquence 2.45 GHz avec une largeur de bande (de 2.418 à 2.503 GHz).

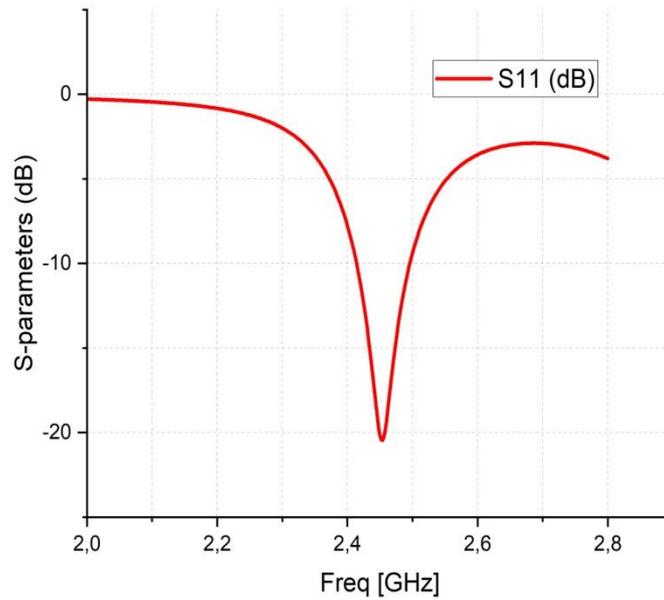


Figure II.12 : Coefficient de réflexion de l'antenne.

Pour obtenir les caractéristiques souhaitées en termes de polarisation circulaire, adaptée à l'application RFEH (récupération d'énergie radiofréquence) on a placé des spirales rectangulaires métalliques sur la surface latérale du résonateur diélectrique (DR) sur l'axe $-Y$ (comme l'illustre la figure II.14).

La structure en spirale utilisée à la figure 13 comprend 8 bandes de coupe métalliques de différentes longueurs et largeurs. Pour comprendre le comportement de performance caractéristique de la structure en spirale, une approche de conception étape par étape est étudiée.

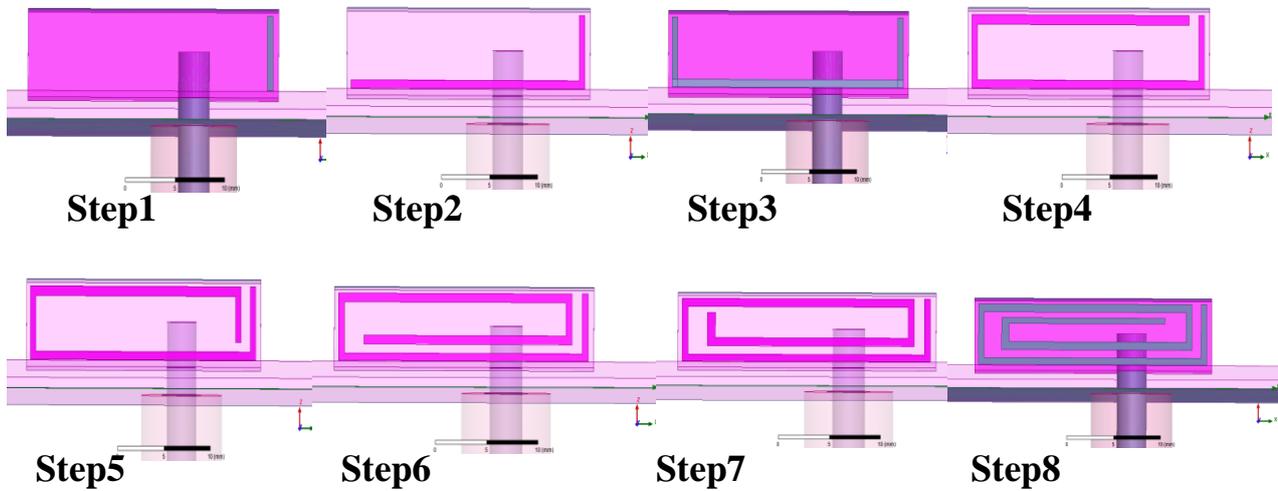


Figure II.13 : les étapes de la conception finale.

Après avoir effectué la simulation d'antenne à chaque spirale (figure II.14) on a remarqué que qu'en ajoutant huit pièces le Coefficient de réflexion n'est pas effectué et l'antenne fonctionne dans 2.45GHz.

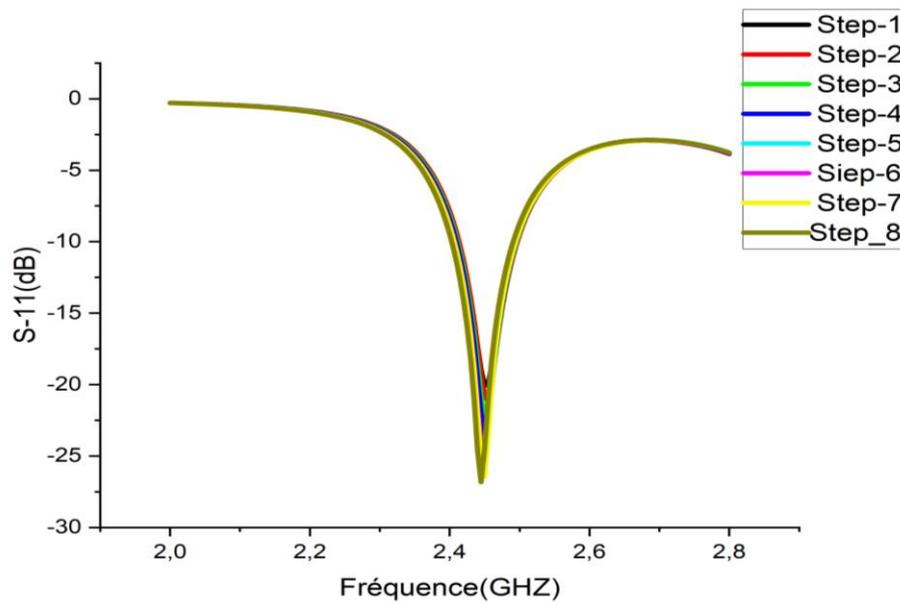


Figure II.14 : Coefficient de réflexion de chaque spirale dans l'antenne.

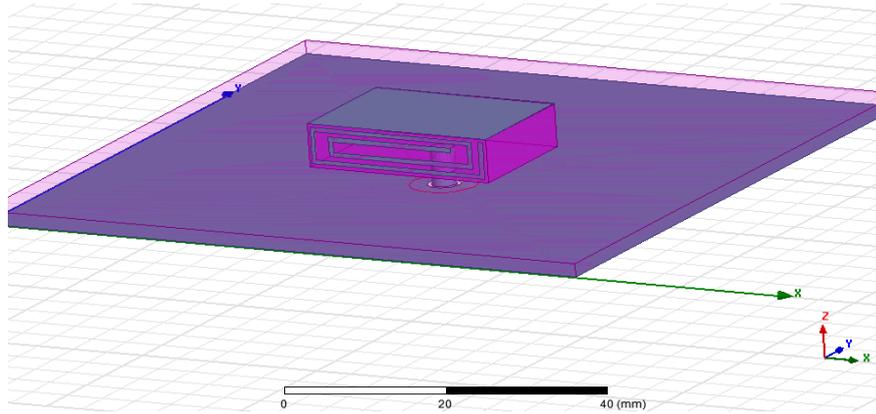


Figure II.15 : conception finale

Après avoir effectué la simulation de la structure finale d'antenne, on remarque que le coefficient réflexion S_{11} (figure II.15) a une valeur d'environ -26.8 dB à la fréquence de 2.45 GHz avec une largeur de bande de 2.40 à 2.48 GHz, ce qui montre que cette antenne est bien adaptée à cette fréquence. et le coefficient réflexion S_{11} a une valeur d'environ -25.5db à la fréquence 2.45GHz on remarque que l'antenne et bien adapter avec les spirale.

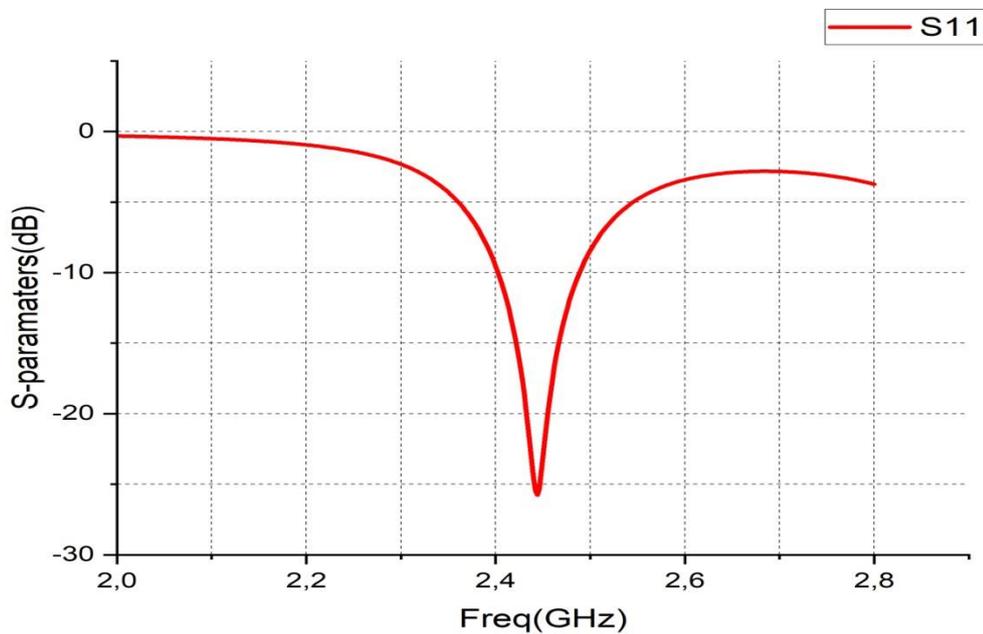


Figure II.16 : Coefficient de réflexion de l'antenne finale.

2. Rapport axial

Chapitre II : Conception et simulation des Rectennas à 2.4 GHz

Après avoir effectué la simulation de la structure d'antenne finale, on a calculé le rapport axial AR de chaque bande de coupe métallique et le tracé sur la figure II.16.

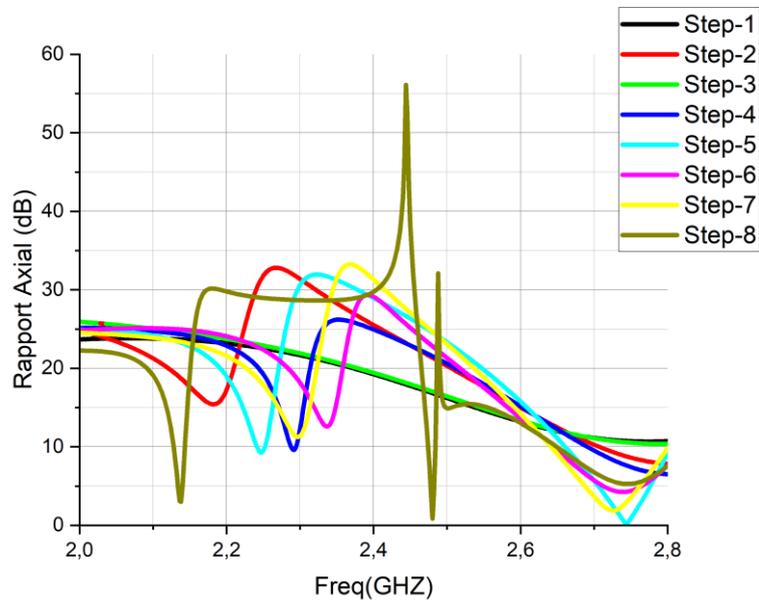


Figure II.16 : Rapport axial pour les Step

On a remarqué qu'en ajoutant sept pièces, le rapport axial est supérieur à 3dBm signifiant qu'il n'y a pas de polarisations circulaire, et en ajoutant la huitième pièce on a remarqué qu'il y a un rapport axial inférieur à 3dbm, ce qui indique la présence de polarisation circulaire en direction normale.

Après avoir effectué la simulation de la structure d'antenne finale, on a calculé le rapport axial AR et le tracé sur la figure II.17. La caractérisation du rapport axial est effectuée ici en direction normale ($\theta = 0^\circ$) de l'antenne DRA.

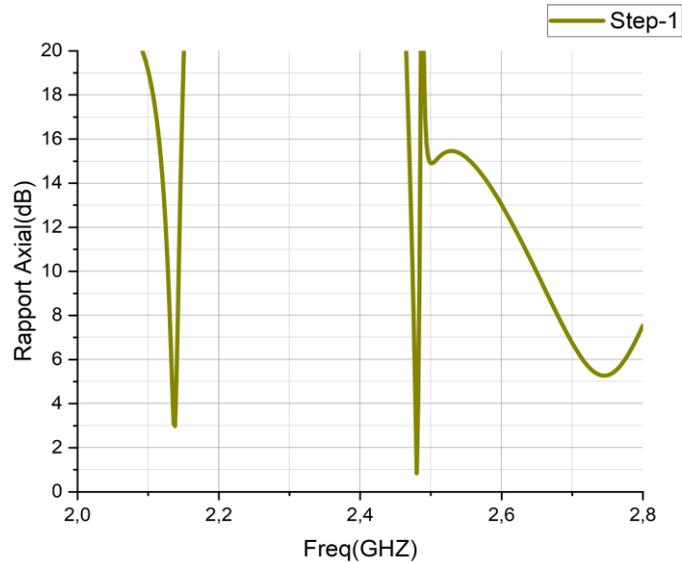


Figure II.17 : Rapport axial de l'antenne finale.

D'après ces résultats, on remarque que le rapport axial est inférieur à 3 dB pour deux bandes différentes ce qui assure une polarisation circulaire. Pour la première bande, la polarisation circulaire est mesurée à partir de la fréquence 2.14 GHz jusqu'au 2.18 GHz avec un rapport axial 2.89 dB. Malheureusement, on ne s'intéresse pas de cette bande puisque l'antenne fonctionne dans la bande ; 2.418-2.503 GHz. Concernant la deuxième bande, On constate qu'à partir de la fréquence 2.42 GHz jusqu'à 2.49 GHz, l'AR est situé à 1 dB, donc on a un rapport axial inférieur à 3 dB (Figure II.17).

3. Comportement de polarisation

La Figure II.18 montre le comportement de polarisation circulaire de la conception finale. L'orientation du champ électrique de DRA à facettes en spirale est étudiée pour différents angles de phase de « φ » avec une différence de phase de 90° . Il est clairement montré que les lignes du champ électrique tournent dans le sens horaire lorsque la phase passe de 0° à 360° , ce qui correspond au rayonnement à polarisation circulaire droite (RHCP).

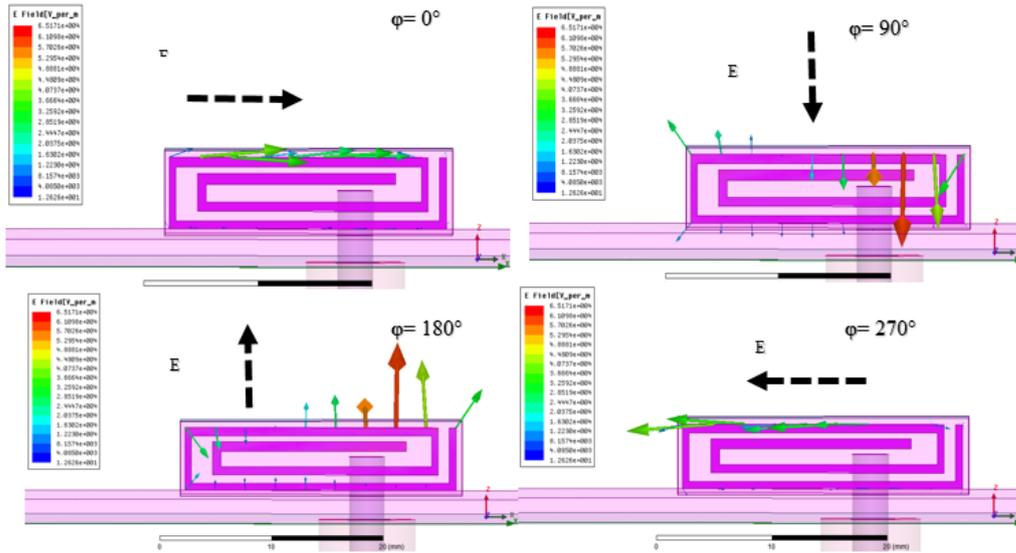


Figure II.18 : Le comportement de polarisation avec de phase variable a : (a)=0°, (b)= 90°, (c)=180°, (d)=270°

II.4.2. Circuit de conversion RF-DC

1. Conception de redresseur

L'article [17] décrit la conception d'un circuit de redressement pour convertir l'énergie RF récupérée autour de 2,45 GHz. Contrairement aux conceptions classiques où le circuit de redressement est séparé de l'antenne, les auteurs ont intégré le circuit de redressement directement dans la borne de l'antenne.

Le circuit de redressement a été optimisé à l'aide du logiciel Keysight Advanced Design System (ADS). Il comprend un doubleur de tension, une capacité de source, et une résistance et une capacité de charge, pour extraire la puissance continue. La diode Schottky choisie (HSMS-2852) à une tension de claquage de 3,8 V, une tension directe et une résistance série (La figure II.19), Pour obtenir un transfert maximal de puissance entre l'antenne et le redresseur, un réseau d'adaptation est utilisé. L'impédance d'entrée de l'antenne et l'impédance d'entrée de la diode à une puissance d'entrée de -20 dBm sont prises en compte. Une adaptation conjuguée est réalisée à l'aide d'un réseau en L comprenant un condensateur en dérivation et une bobine en série, voir le tableau II.8.

Chapitre II : Conception et simulation des Rectennas à 2.4 GHz

Tableau II.8 : paramètres de circuit de conversion.

paramètre	valeur	PARAMATER	VALER
fréquence	2.4GHZ	Puissance RF en entre	-20dBm
C5 une capacité de source	100pF	L1	9 nH
C3	1.6 pF	R	5 KOhm
C4 capacité de charge	100 pF		

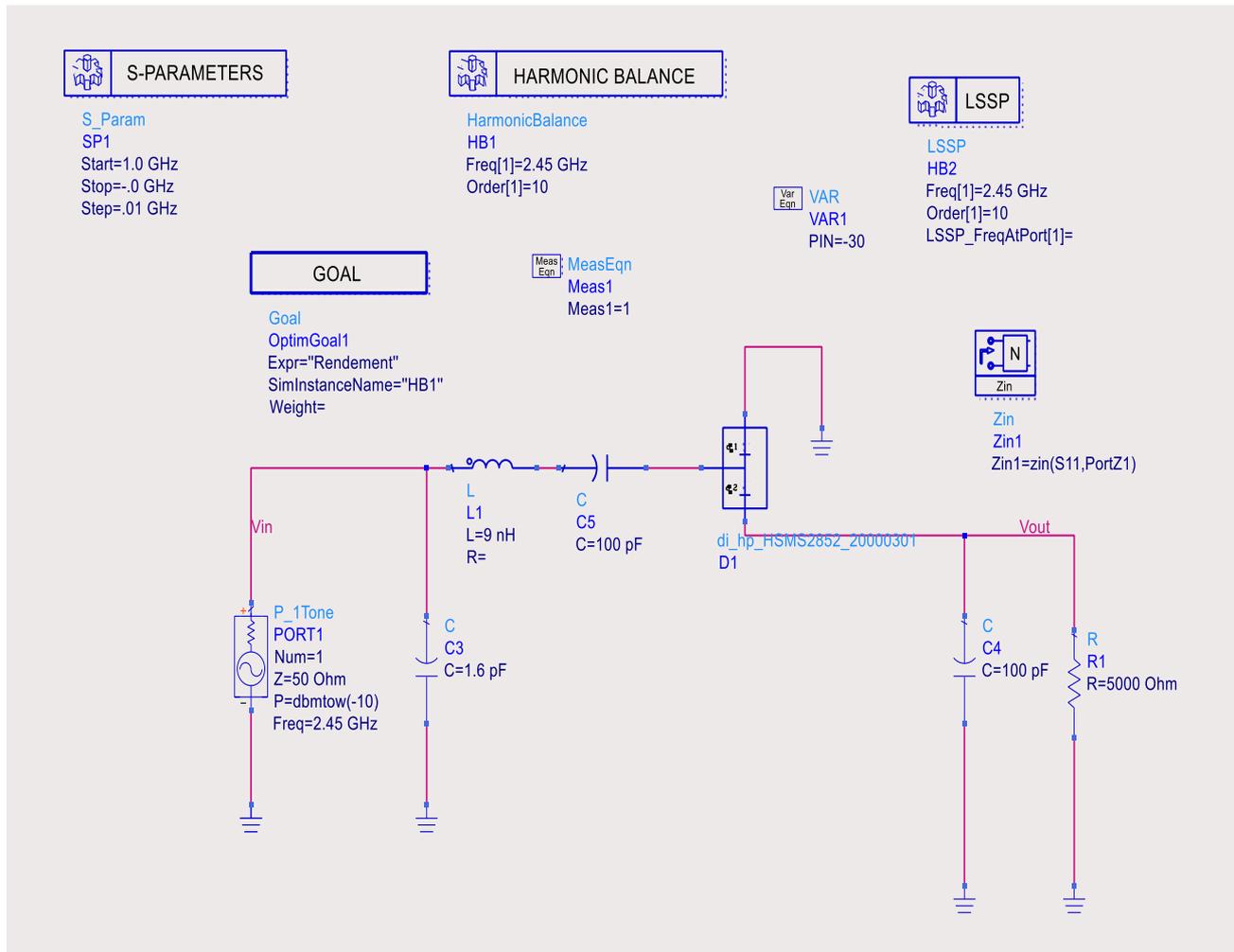


Figure II.19 : Circuit de conversion RF-DC sous ADS.

2. Résultats de simulation

L'utilisation du simulateur LSSP d'ADS, qui prescrit compte le comportement non linéaire des diodes, le coefficient de réflexion S est simulé en fonction de la fréquence de 30 dBm. Cette simulation est illustrée sur la figure II.20 pour une plage de puissance et de fréquence allant, respectivement, de 0 à -11.5 à la fréquence de 2.4 GHz ce qui montre que cette redresseur est bien adaptée à cette fréquenc.

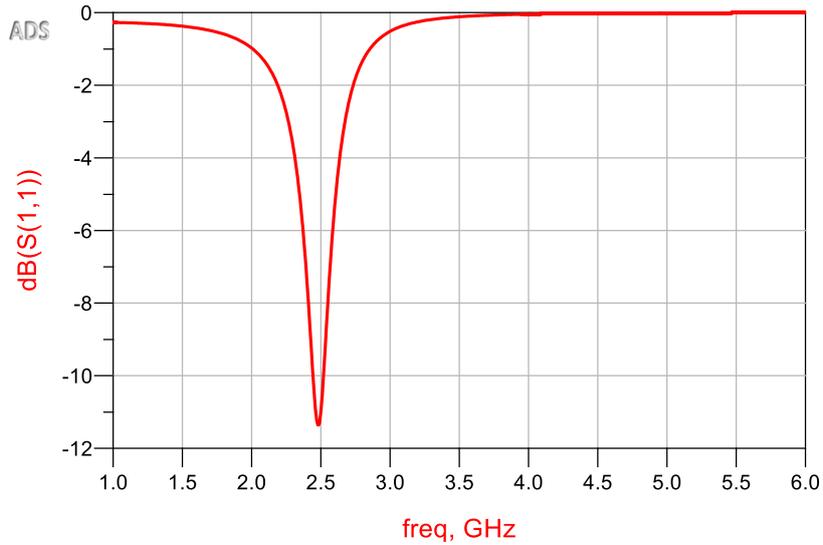


Figure II.20 : Coefficient de réflexion.

Le spectre simule des signaux d'entrée et la sortie de redresseur, illustrée par la figure II.21, montrant que les puissances incident du signal d'entré concentré dans le fondamental à 2,45 GHz ($V_{in} = 3 \text{ dBm}$) est transféré vers la Composante continue du signal de sortie ($V_{on} = 18 \text{ dBm}$).

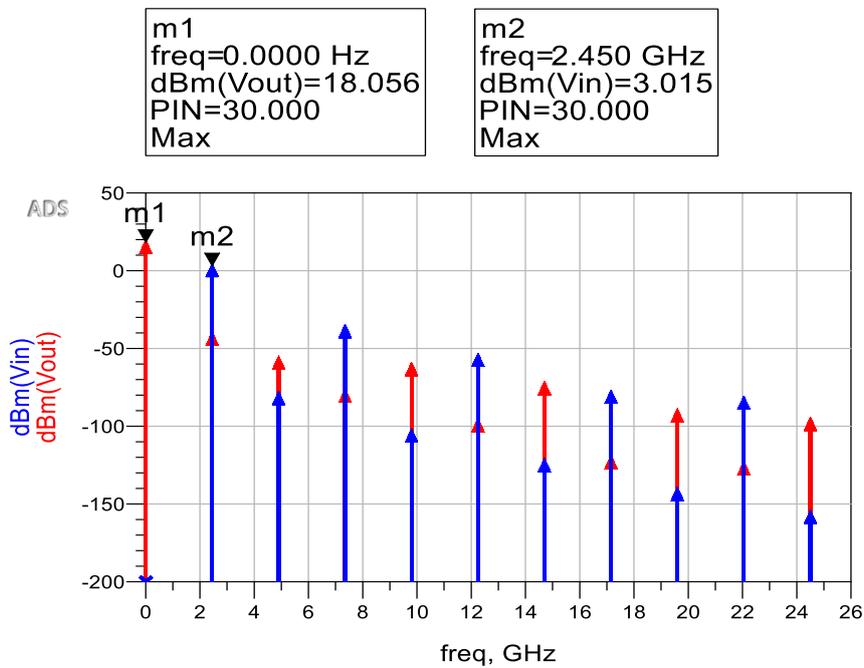


Figure II.21 : Spectre des signaux d'entrée et de sortie du redresseur simulé

Chapitre II : Conception et simulation des Rectennas à 2.4 GHz

L'évolution dans les temps de la tension d'entrée et de sortie du redresseur mono-diode à 2,45 GHz a également mis en évidence dans la figure II.22. Les résultats ont montré une tension d'entrée maximale de 75 mV et une tension ambiante de 450 mV.

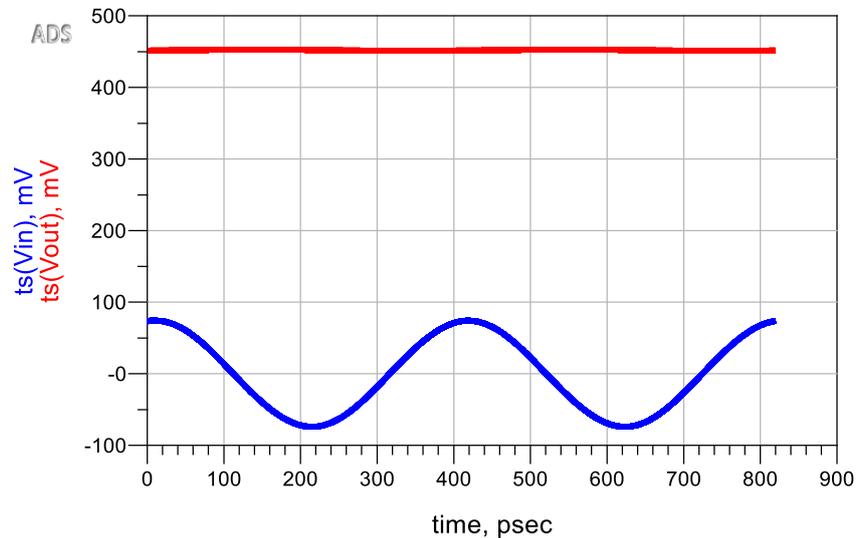


Figure II.22 : Forme temporelle du signal en entre et en sortie du redresseur

II.5. Etude comparative

Dans cette section, on a étudié deux rectennas avec des antennes et redresseurs différentes, Les tableaux 9 et 10 montres la comparaison entre les deux rectennas :

Tableau II.9 : comparaison rentre les antennes Dra utilise.

Références	Dimension (m ³)	Permittivité de Dra	Coefficient de réflexion S11 (dB)	Polarisation	Fréquence de résonances (GHz)
CDRA	1130,4	3.55	-40	linéaire	2.45
RDRA	1080	10	-22	circulaire	2.45

Tableau II.10 : comparaison entre les circuits de conversions.

Références	diode De redresseur	Type de circuit	Coefficient de réflexion S11 (dB)	Fréquence de résonances (GHz)
29	Deux diodes HSMS2850 Schottkey	Circuit doubleur	-25	2.45

Chapitre II : Conception et simulation des Rectennas à 2.4 GHz

30	HSMS-2852	Circuit doubleur	-11.5	2.45
----	-----------	------------------	-------	------

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude des performances de deux rectennas est achevée. Tout d'abord, on a expliqué la conception de l'antenne DRA cylindrique avec une polarisation linéaire et en évaluant ses performances en termes du coefficient de réflexion, diagramme de rayonnement par le logiciel HFSS, puis on a expliqué le travail du redresseur avec deux diodes HSMS2850 par le logiciel ADS.

Deuxièmement, on a abordé la conception d'une antenne DRA rectangulaire avec polarisation circulaire en évaluant ses caractéristiques en terme du coefficient de réflexion, diagramme de rayonnement et de rapport axial par le logiciel HFSS, puis on a expliqué le travail du redresseur avec une diode HSMS2852 par le logiciel ADS.

Conclusion générale

Conclusion générale

La récupération d'énergie sans fil est un domaine passionnant qui offre de nombreuses possibilités pour améliorer l'efficacité énergétique et prolonger la durée de vie des dispositifs électroniques.

Le but de ce travail de master est l'étude, la conception et la simulation d'un système de récupération d'énergie RF « rectenna ». Il s'agit d'un système constitué d'une antenne (RDRA ou CDRA) et d'un circuit de conversion RF-DC destiné à être utilisé pour la récupération de l'énergie électromagnétique ambiante à la fréquence 2.45 GHz.

Ce travail comporte deux parties. Dans la première partie, on a effectué une étude et une conception de deux antennes. La première antenne CDRA conçue est une antenne fonctionnant à 2.45 GHz et la deuxième antenne RDRA rectangulaire à facette spirale fonction à 2.45 GHz. La simulation de ces antennes a été réalisée en utilisant le logiciel HFSS. Les résultats obtenus concernent les caractéristiques les plus importantes de l'antenne, tels que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement et le rapport axial.

La deuxième partie a été consacrée à l'étude et à la conception des circuits de conversion RF-DC. Dans ce contexte, on a conçu deux circuits de conversion RF-DC avec deux diode Schottky (HSMS-2850, HSMS-2852) dans la bande 2.45. La simulation de ces circuits a été faite en utilisant le logiciel ADS avec la méthode de simulation non-linéaire harmonique Balance (HB). Cette simulation a permis de mettre en évidence les effets des différents paramètres du circuit (la charge et la puissance d'entrée RF Pin) sur le rendement et sur la tension de sortie du circuit de conversion et aussi elle a permis de déterminer les caractéristiques et les performances optimales de ces circuits de conversion telles que l'adaptation, le rendement et la tension continue de sortie.

Références

- [1] V. KUHN, Capture opportuniste d'énergie micro-onde pour l'autonomie des objets communicants, 2016.
- [2] H. TAKHEDMIT, Modélisation et Conception de Circuits de Réception Complexes pour la Transmission d'Énergie Sans Fil à 2.45 GHz.
- [3] A. Okba, Conception et réalisation de rectennas utilisées pour la récupération d'énergie électromagnétique pour l'alimentation de réseaux de capteurs sans fils, toulouse, 2017.
- [4] Z. Saddi, Conception d'un dispositif de récupération d'énergie mixte vibratoire-électromagnétique pour l'alimentation des dispositifs à faible consommation, Paris-Est, 2016.
- [5] M. A. e. B. Hafeda, Étude et Simulation d'une Rectenna, Application à la Récupération d'énergie RF, Tlemcen, 2017..
- [6] S.-E. Adami, Optimisation de la récupération d'énergie dans les applications de rectenna., Lyon, 2013.
- [7] M. K. H. A. Z. Kouzani, «Design and analysis of efficient rectifiers for wireless power harvesting in DBS devices,» 2013.
- [8] W. Haboubi, «Développements de circuits Rectenna bi-polarisation, bi-bande pour la récupération et conversion d'énergie électromagnétique à faible niveau,» Paris-Est, 2014.
- [9] V. S. Humberto Pereira da Paz, «A 2.4 GHz Rectenna Based on a Solar Cell Antenna Array,» vol. 18, n° 112, 2019.
- [10] S. Z. Abdul Quddious, «Dual-Band Compact Rectenna for UHF and ISM Wireless Power Transfer Systems,» *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS*, vol. 69, n° 14, 2021.
- [11] J. H. Hucheng Sun, «An Omnidirectional Rectenna Array With an Enhanced RF Power Distributing Strategy for RF Energy Harvesting,» *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, vol. 70, n° 16, 2022.
- [12] Y. F. Y. L. Yanyan Shi, «An Efficient Broadband Slotted Rectenna for Wireless Power Transfer at LTE Band,» *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, vol. 67, n° 12, FEBRUARY 2019.
- [13] L. Y. XI LI, «Novel Design of 2.45-GHz Rectenna Element and Array for Wireless Power Transmission,» 18 3 2019.
- [14] W. G. G. Xiao Cai, «A Compact Rectenna With Flat-Top Angular Coverage for RF Energy Harvesting,» *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*, vol. 20, no. 7, JULY 2021.

- [15] S. Changjun Liu, «Compact Patch Rectennas Without Impedance Matching Network for Wireless Power Transmission,» *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, vol. 70, n° 15, 5 2022.
- [16] M. S. U. a. S. M. S. B. Alam, «Design of A Low Power 2.45 GHz RF Energy Harvesting Circuit for Rectenna,» 2013.
- [17] J. T. M. L. M. Koohestani, «A miniaturized printed rectenna for wireless RF energy harvesting around 2.45 GHz,» 17 10 2022.