

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث  
العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمس - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En : Télécommunications**

**Spécialité : Réseaux et Télécommunications**

**Par : Hanane METAHRI & Safia MOUGAS**

### **Sujet**

**Etude et conception d'un dispositif de récupération d'énergie  
électromagnétique multi-bandes fonctionnant dans les gammes de fréquences  
5G.**

Soutenu, le **04 / 07 / 2021**, devant le jury composé de :

Mr BENDIMERAD Fethi Tarik	Professeur à l'université de Tlemcen	Président
Mr MERIAH Sidi Mohammed	Professeur à l'université de Tlemcen	Examineur
Mr BOUSAHLA Miloud	MCB à l'université de Tlemcen	Encadreur

# *Dédicaces*

*Du fond de mon cœur et avec un énorme plaisir je dédie mon travail :*

*À mon cher père,*

*En exprimant ma gratitude, mon profond d'amour et ma passion, pour sa confiance, son soutien moral et matériel et pour son amour infini.*

*À ma chère mère,*

*En exprimant de ma profonde gratitude et de mon incontestable reconnaissance, pour tous les sacrifices qu'elle me contente, toute la confiance qu'elle m'accorde et tous l'amour dont elle m'entoure.*

*À mes chères sœurs : Leyla, Imene, Hadjer et mon petit adorable frère Amine*

*Aucune dédicace ne serait exprimer assez profondément ce que je ressens envers vous. Merci d'être toujours là pour me soutenir dans les moments difficiles. Je vous dirais tout simplement, un grand merci, je vous aime.*

*A mon cher binôme : Safia qui m'a vraiment aidé à réaliser ce travail*

*A ma chère grand-mère*

*Fatma Zohra*

*A mes très chères amies : Ikram B, Fadja B*

*En témoignage de l'amitié sincère qui nous a liées et des bons moments passés ensemble. Je vous dédie ce travail en vous souhaitant un avenir radieux et plein de bonnes promesses. En souvenir de nos éclats de rire, et de tout ce qu'on a vécu ensemble.*

*J'espère de tout mon cœur que notre amitié durera éternellement.*

*À tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration de ce travail.*

*Hanane Metafiri*

# *Dédicaces*

*Je remercie Allah de m'avoir donné le courage et la patience pour aller jusqu'au bout du parcours de nos études. Je dédie ce mémoire :*

*À mon cher père,*

*Aucune dédicace ne serait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation. « Merci papa »*

*À ma chère mère,*

*En exprimant de ma profonde gratitude et de mon incontestable reconnaissance, pour tous les sacrifices qu'elle me contente, toute la confiance qu'elle m'accorde et tous l'amour dont elle m'entoure*

*À mon cher mari : Abderrahmane,*

*En exprimant ma gratitude, mon profond d'amour et ma passion, pour sa confiance, qui m'a soutenu moralement et matériellement tout au long des épreuves. Je vous dirais tout simplement, un grand merci, je vous aime*

*À mes chères sœurs : Malika, Douaà et ma chère fille Selma Lina*

*Je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.*

*A mon cher binôme : Hanane qui m'a vraiment aidé à réaliser ce travail*

*À toute ma grande famille et la famille de mon cher mari.*

*À mes très chères amies : Ibtissem.M Asma.N Selma.R*

*En témoignage de l'amitié sincère qui nous a liées et des bons moments passés ensemble. Je vous dédie ce travail en vous souhaitant un avenir radieux et plein de bonnes promesses.*

*À celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail,*

*Safia Mougas*

# Remerciements

*Nous exprimons d'abord nos profonds remerciements à Allah qui nous a donné le courage et la volonté d'achever ce travail.*

*Nous tenons à remercier particulièrement notre encadreur M. BOUSAHLA MILOUD Maitres de conférences, tout d'abord pour nous avoir donné cette chance d'étendre notre horizon professionnel par la réalisation d'un mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en télécommunications, pour la confiance qu'elle nous a accordé pour sa disponibilité et pour ses conseils avisés. Notre enthousiasme ne suffisait pas, ton expérience était nécessaire pour arriver là où nous devons arriver. Travailler avec vous est un puissant exercice de développement intérieur.*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à M. BENDIMERAD FETHI TARIK professeur à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté de présider ce travail, ainsi que MERIAH SIDI MOHAMMED maître de conférences à l'université de Tlemcen d'avoir bien voulu faire partie de ce jury et d'examiner ce travail.*

*Enfin, nous profitons aussi de ce mémoire pour exprimer nos plus vifs remerciements envers tous les professeurs qui nous ont apportés leurs soutiens durant nos études. Que le corps professoral et administratif et surtout le doyen de la faculté de technologie,*

*Trouvent ici nos plus vifs remerciements, pour tout le travail effectué durant notre formation. A nos chers parents pour leur soutien, leur patience, leur sacrifices et leurs amours, vous méritez toutes les éloges, vous avez fait de nous ce que nous sommes maintenant.*

*Nous espérons être l'image que vous vous êtes faite de nous, que Dieu vous garde et vous bénisse. Nous remercions nos chers frères et sœurs, pour leurs affections et leurs encouragements qui ont toujours été pour nous un soutien des plus précieux. Que ce travail soit pour vous le gage de notre profond amour à tous nos amis et à tous ceux qui nous ont aidés.*

*Merci.....*

# *Résumé*

Le but de ce travail est l'étude, la simulation et la conception d'un dispositif de récupération d'énergie électromagnétique multi-bandes fonctionnant dans les gammes de fréquences 5G.

La phase de conception et caractérisation d'une antenne, à l'aide d'un logiciel adapté, est une étape incontournable dans un souci de gain de temps et d'optimisation de structure aux paramètres désirés. En utilisant le logiciel CST, nous avons étudié et conçu une antenne multi-bandes qui fonctionne à trois fréquences de la 5G. Puis nous avons étudié et conçu deux circuits de conversion RF-DC en utilisant le logiciel ADS avec la méthode de simulation non-linéaire Harmonic Balance (HB). Cette simulation a permis de mettre en évidence les effets des différents paramètres du circuit de conversion (la capacité de filtrage, la charge et la puissance d'entrée RFPin) sur le rendement et sur la tension de sortie du circuit de conversion.

Mots clés : Antenne 5G, Multi-bandes, rectenna, récolte d'énergie

# *Abstract*

The aim of this work is the study, simulation and design of a multi-band electromagnetic energy harvesting device operating in the 5G frequency ranges.

The design and characterization phase of an antenna, using suitable software, is an essential step in order to save time and optimize the structure at the desired parameters. Using CST software, we have researched and designed a multi-band antenna that operates at three frequencies of 5G. Then We studied and designed two RF-DC conversion circuits using ADS software with the non-linear Harmonic Balance (HB) simulation method. This simulation made it possible to highlight the effects of the various parameters of the conversion circuit (the filtering capacity, the load and the input power RFPin) on the efficiency and on the output voltage of the conversion circuit.

Keywords: 5G antenna, Multi-band, rectenna, energy harvesting

# ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة وتصميم جهاز لحصاد طاقة كهرومغناطيسية متعدد النطاقات يعمل في نطاقات تردد 5G.

تعد مرحلة التصميم والتوصيف بالهوائي، باستخدام برنامج مناسب، خطوة أساسية لتوفير الوقت وتحسين الهيكل بالمعلومات المرغوبة. باستخدام برنامج CST، بحثنا وصممنا هوائيا متعدد النطاقات يعمل بثلاثة ترددات من 5G. ثم درسنا وصممنا دائرتي تحويل RF-DC باستخدام برنامج ADS مع طريقة محاكاة Harmonic Balance (HB) غير الخطية. مكنت هذه المحاكاة من ابراز تأثيرات المعلومات المختلفة لدائرة التحويل (سعة الترشيح، الحمولة وقوة الإدخال RFPin) على الكفاءة وعلى جهد الخروج لدائرة التحويل.

**الكلمات المفتاحية:** هوائي 5G، متعدد الموجات، حصاد الطاقة.

# Liste des tables

Tableau I - 1: Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobile.....	1
Tableau I - 2 : Quelques propriétés physiques des bandes de fréquences 5G .....	3
Tableau II - 1: Classe de puissances des émetteurs Bluetooth .....	12
Tableau II - 2: Limites d'exposition aux champs électrique et magnétique pour le grand public [6].....	14
Tableau II - 3: Comparaison des différents scénarios de récupération .....	18
Tableau III - 1: Dimensions de l'antenne patch conçue.....	31

# Liste des figures

Figure I - 1: Bandes de fréquences 5G .....	2
Figure I - 2: Techniques utilisées dans la technologie 5G.....	4
Figure I - 3: Spectres des fréquences (ondes millimétriques). .....	4
Figure I - 4: Petites cellules.....	5
Figure I - 5: Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO.....	7
Figure I - 6: Illustration de MIMO massive.....	8
Figure I - 7: Single-User Massive MIMO.....	9
Figure II - 1: Schéma pour la communication sans fil tiré de <a href="http://electronicmaffia.weebly.com/">http://electronicmaffia.weebly.com/</a> .....	11
Figure II - 2: Puissance maximale de la norme GSM 900 [3].....	12
Figure II - 3: Principe d'un système de transmission d'énergie sans fil .....	15
Figure II - 4: Schéma bloc d'une rectenna .....	16
Figure II - 5: Photo recto verso du réseau de récupérateur télé-alimentant un capteur de température et d'humidité [13]. .....	17
Figure II - 6: Schéma de transmission d'énergie à partir d'objets connectés du quotidien .....	18
Figure II - 7: Architecture globale d'un récupérateur d'énergie [14] .....	19
Figure II - 8: Architecture d'un système de TESF.....	20
Figure II - 9: Illustration de la bande passante $\alpha$ -10 dB d'une antenne.....	23
Figure II - 10: Structure de base d'une antenne imprimée. ....	23
Figure II - 11: Différentes formes de l'antenne patch. ....	24

Figure II - 12: Techniques d'alimentation.....	26
Figure II - 13: structure d'une rectenna .....	26
Figure II - 14: Topologie de la rectenna mono diode série .....	27
Figure II - 15: Topologie de la rectenna mono diode en parallèle .....	28
Figure II - 16: Topologie de la rectenna en doubleur de tension .....	28
Figure II - 17: Topologie a) multiplieur et b) pont de diodes .....	29
Figure III - 1: Structure de l'antenne conçue (a) Vue de dessus (b) Vue de dessous.....	30
Figure III - 2: Paramètres de l'antenne conçue.....	31
Figure III - 3: étapes de conception de l'antenne conçue. ....	32
Figure III - 4: Coefficient de réflexion simulé de l'antenne dans les différentes étapes du développement de la conception. ....	32
Figure III - 5: Représentation du coefficient de réflexion en fonction du paramètre $W_2$ de la fente .....	33
Figure III - 6: Représentation du coefficient de réflexion en fonction du paramètre $W_1$ de la fente .....	33
Figure III - 7: Représentation du coefficient de réflexion en fonction du paramètre $L_2$ de la fente.....	34
Figure III - 8: Représentation du coefficient de réflexion en fonction du paramètre $L_1$ de la fente.....	34
Figure III - 9: Représentation du coefficient de réflexion en fonction du paramètre $W_{g1}$ de plan de masse.....	35
Figure III - 10: Représentation du coefficient de réflexion .....	35
Figure III - 11: Diagramme de rayonnement à 10 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire ( $\phi=90$ ) (c) plan polaire ( $\phi=0$ ) .....	36
Figure III - 12: Diagramme de rayonnement à 28 GHz (a) plan 3D(b) plan polaire ( $\phi=90$ ) (c) plan polaire ( $\phi=0$ ) .....	37
Figure III - 13: Diagramme de rayonnement à 38 GHz (a) plan 3D(b) plan polaire ( $\phi=90$ ) (c) plan polaire ( $\phi=0$ ) .....	38
Figure III - 14: Résultat du VSWR à la fréquence $f=10$ GHz et à $f=28$ GHz et $f=38$ GHz.....	39
Figure III - 15: Schéma du circuit de conversion .....	40
Figure III - 16 : Représentation du coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ). ....	40
Figure III - 17: Spectre des signaux d'entrée et de sortie du circuit de conversion .....	41
Figure III - 18: Allures temporelles du signal d'entrée et de sortie du circuit de conversion .....	41
Figure III - 19: Représentation du rendement et de la tension de sortie en fonction de la charge $R_L$ .....	42
Figure III - 20: Représentation du rendement et de la tension de sortie en fonction de la capacité de filtrage .....	42
Figure III - 21: Représentation du rendement et de la tension de sortie en fonction de la puissance d'entrée .....	43
Figure III - 22: Schéma du circuit de conversion .....	44
Figure III - 23: Représentation du coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ). ....	44
Figure III - 24: Spectre des signaux d'entrée et de sortie du circuit de conversion .....	45
Figure III - 25: Allures temporelles du signal d'entrée et de sortie du circuit de conversion .....	45
Figure III - 26: Représentation du rendement et de la tension de sortie en fonction de la charge $R_L$ .....	46
Figure III - 27: Représentation du rendement et de la tension de sortie en fonction de la capacité de filtrage .....	46
Figure III - 28: Représentation du rendement et de la tension de sortie en fonction de la puissance d'entrée .....	47

# *Liste des abréviations*

**3GPP:** 3rd Group Partnership Project

**LTE:** Long Term Evolution

**UDN:** Ultra Dense Network

**D2D:** Device-To-Device

**M2M:** Machine-To-Machine

**SDN:** Software Defined Network

**NFV:** Network Fonction Virtualisation

**MIMO:** Multiple Inputs - Multiple Outputs

**SIMO:** Single Input Multiple Output

**MISO:** Multiple Input Single Outputs

**SISO:** Single Input Single Output

**RF-DC :** Régime alternatif -continue.

**GSM:** Global System for Mobile communications

**ISM:** Industrial Scientific and Medical band

**WLAN:** Wireless Local Area Network

**ICNIRP:** International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

**WHO:** World Health Organization

**TESF:** Transmission d'Énergie Sans Fil.

**CST:** Computer Simulation Technology.

**ADS:** Advanced Design System

# Table des matières

<i>Dédicaces</i> .....	I
<i>Dédicaces</i> .....	II
<i>Remerciements</i> .....	III
<i>Résumé</i> .....	IV
<i>Abstract</i> .....	IV
ملخص .....	V
<i>Liste des tables</i> .....	VI
<i>Liste des figures</i> .....	VI
<i>Liste des abréviations</i> .....	VIII
<i>Table des matières</i> .....	IX
<i>Introduction générale</i> .....	XIII
CHAPITRE I : Généralités sur la 5G.....	1
I.1.Introduction .....	1
I.2.Historique .....	1
I.3. Objectif et Principe de la 5G .....	2
I.4. Spectre pour la 5G .....	2
I.5.Technologies Émergentes Pour réseaux 5G.....	3
I.5.1. Les ondes millimétriques .....	4
I.5.2. Petites cellules.....	4
I.5.3. Formation de faisceaux (Beamforming) .....	5
I.5.4. Full duplex .....	5
I.5.5. Internet des objets (IoT).....	5
I.5.6. Communication Device-to-Device (D2D).....	6

I.5.7. Prise en charge native de la communication machine-to-machine (M2M).....	6
I.5.8. Software Defined Network (SDN).....	6
I.5.9. Network Fonction Virtualisation (NFV) .....	6
I.5.10. CloudRAN (C-RAN).....	6
I.5.11. Le Massive MIMO .....	7
I.5.11.1. La technologie MIMO.....	7
I.5.11.2. La technologie Massive MIMO.....	7
I.5.11.3. Les avantages des systèmes Massive MIMO.....	8
I.5.11.4. Types Massive MIMO .....	9
I.6. Conclusion.....	10
CHAPITRE II :.....	11
Généralités sur les antennes et les rectennas .....	11
II.1. Introduction.....	11
II.2. Les communications sans fil.....	11
II.2.1. Norme de téléphonie mobile.....	11
II.2.2. Bluetooth .....	12
II.2.3. Wifi .....	12
II.2.3.1. Limites d'exposition aux champs électromagnétiques .....	13
II.3. La récolte d'énergie .....	14
II.4. Spectre électromagnétique .....	14
II.5. Transmission d'énergie sans fil.....	15
II.5.1. Principe.....	15
II.5.1.1. Module de récupération d'énergie .....	16
II.5.2. Scénario de récupération .....	16
II.5.2.1. Récupération opportuniste .....	16
II.5.2.2. Transfert de puissance .....	17
II.5.2.3. Bilan.....	18

II.6. Techniques de récupération d'énergie électromagnétique.....	18
II.6.1. Architecture globale d'un récupérateur d'énergie .....	18
II.6.2. Transfert non radiatif d'énergie .....	20
II.6.3. Transfert radiatif d'énergie .....	20
II.7. Définition d'une Antenne .....	21
II.7.1. Paramètres Caractéristiques d'une Antennes .....	21
II.7.1.1. Impédance d'entrée.....	21
II.7.1.2. Coefficient de réflexion .....	21
II.7.1.3. Rapport d'onde stationnaire (ROS).....	21
II.7.1.4. Diagramme de rayonnement .....	22
II.7.1.5. Directivité.....	22
II.7.1.6. Gain.....	22
II.7.1.7. Fréquence de résonance et bande passante .....	22
II.7.2. Antennes imprimées (micro-ruban) .....	23
II.7.3. Techniques d'alimentation .....	24
II.7.3.1. Alimentation par ligne micro ruban [25] .....	24
II.7.3.2. Alimentation par sonde coaxiale .....	24
II.7.3.3. Alimentation par couplage par fente [25] .....	25
II.7.3.4. Alimentation par couplage de proximité.....	25
II.8. Rectenna.....	26
II.8.1. Définition.....	26
II.8.2. Schéma de principe .....	26
II.8.3. Topologies de circuit de conversion RF-DC .....	27
II.8.3.1. Topologie série .....	27
II.8.3.2. Topologie parallèle .....	28
II.8.3.3. Topologie en doubleur de tension .....	28
II.8.3.4. Topologie multi-diodes.....	28

II.8.4. Efficacité de conversion RF-DC.....	29
II.9. Conclusion .....	29
CHAPITRE III : Conception et simulation de circuit rectenna.....	30
III.1. Introduction.....	30
III.2. Conception d'une antenne patch 5G multi-bandes [10 - 28 - 38] GHz.....	30
III.2.1 Structure de l'antenne .....	30
III.2.2 Résultats obtenus avec le logiciel CST Microwave Studio .....	31
III.3 Etudes paramétriques (effet des paramètres géométriques) .....	33
III.3.1. Effet du paramètre W2 de la fente .....	33
III.3.2. Effet du paramètre W1 de la fente .....	33
III.3.3. Effet du paramètre L2 de la fente .....	34
III.3.4. Effet du paramètre L1 de la fente .....	34
III.3.5. Effet du paramètre Wg1 de plan de masse .....	34
III.4 Performances de l'antenne optimisée.....	35
III.4.1. Diagramme de rayonnement .....	36
III.4.2. Rapport d'onde stationnaire (ROS) .....	39
III.5 Conception de Circuits de conversion RF-DC .....	39
III .5.1 Étude et conception du circuit de conversion fonctionnant à la fréquence 10GHz..	40
III.5.1.1 Influence de la charge RL.....	41
III.5.1.2 Influence de la capacité de filtrage.....	42
III.5.1.3 Influence de la puissance RF d'entrée.....	43
III.5.2 Étude et conception du circuit de conversion bi-bande .....	43
III.5.2.1 Influence de la charge RL.....	45
III.5.2.2 Influence de la capacité de filtrage.....	46
III.5.2.3 Influence de la puissance RF d'entrée.....	47
III .6 Conclusion .....	47



# *Introduction générale*

La 5G est censée changer notre vie grâce à sa vitesse et sa réactivité révolutionnaires. Cette nouvelle génération de communications mobiles se distingue des générations précédentes en ce qu'elle vise, dès sa conception, à intégrer un nombre de cas d'usages inédit".

La récupération de l'énergie RF est une technique potentielle pour répondre à la préoccupation de recharger ou de remplacement des batteries afin de mettre en œuvre des dispositifs autonomes dans le domaine des Internet des objets (IoT). Les systèmes de récupération d'énergie électromagnétique nécessitent une antenne de réception des ondes reliée à un système de conversion RF/DC formant ainsi une antenne redresseuse ou « Rectenna » (RECTIFIER-ANTENNA).

Le développement des micro-technologies, et notamment de la micro-électronique de puissance, a permis la réduction considérable de la consommation des dispositifs électroniques (du Watt au Micro Watt).

Notre objectif principal dans le cadre de ce mémoire est l'étude, la simulation et la conception d'un dispositif de récupération d'énergie électromagnétique multi-bandes fonctionnant dans les gammes de fréquences 5G.

Le présent manuscrit comporte trois chapitres Dans le premier chapitre, nous allons présenter un large aperçu sur la 5<sup>ème</sup> génération. Nous présenterons, dans un premier temps un bref historique sur les générations de technologie de télécommunications. Nous aborderons, dans un deuxième temps, les objectifs de la 5G. Nous présenterons, dans un troisième temps, les technologies émergentes pour réseaux 5G.

Le second chapitre, nous présenterons, dans un premier temps la récolte d'énergie, le principe de la transmission d'énergie sans fil ainsi que les techniques existantes de récupération d'énergie électromagnétique. Nous aborderons, dans un deuxième temps, les antennes imprimées et leurs caractéristiques. Nous présenterons, dans un troisième temps, la rectenna et les différentes topologies de convertisseurs RF-DC.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous présenterons dans un premier temps la conception et l'optimisation d'une antenne 5G multi-bandes conçue avec le logiciel CST. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'étude et à la conception de deux circuits de conversion RF-DC en utilisant le logiciel ADS avec la méthode de simulation non-linéaire Harmonic Balance (HB). Nous présenterons donc la méthodologie de conception que nous avons mise en place, puis exploitée

## **Introduction générale**

---

toute au long de ce travail, ainsi que les résultats de simulations obtenus des deux circuits de conversion simulés et conçus.

Et nous allons terminer par une conclusion générale.

---

# **CHAPITRE I : Généralités sur la 5G**

---

### I.1.Introduction

Les réseaux sans fil doivent être améliorés pour répondre à la demande d'augmentation du débit de données, de la qualité de service, de la réduction du temps de latence et de l'amélioration de la capacité. Des recherches sont menées pour développer de nouvelles normes, et la 4G sera définitivement remplacée par la 5G à l'aide de technologies de pointe. Ce nouveau standard ne s'intéresse pas uniquement à l'accroissement des débits mais plutôt à être un système puissant et fiable.

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter un large aperçu sur la 5ème génération. Nous présenterons, dans un premier temps un bref historique sur les générations de technologie de télécommunications. Nous aborderons, dans un deuxième temps, les objectifs de la 5 G. Nous présenterons, dans un troisième temps, les technologies émergentes pour réseaux 5G.

### I.2.Historique

Les technologies de communication mobile [1] sont prises en charge par des organisations de développement des standards à l'échelle globale comme le 3GPP (3rd Group Partnership Project), ils sont souvent divisés en générations. Ainsi, la (1G) est le système mobile analogique des années 1980s du siècle dernier. La (2G) est le premier système mobile numérique et la 3G le premier des systèmes pouvant supporter des données à haut débit (Broadband data). L'évolution à long terme ou la LTE (Long Term Evolution) souvent appelée "4G", est la LTE Advanced est l'étape de l'évolution réelle vers la 4ème génération, avec la première version de la LTE : version (release) 8 comme étant la "3.9G". D'après le tableau I.1, nous voyons un écart de 10 ans entre les principales générations des technologies de communication sans fil. Le **tableau I.1** décrit aussi les caractéristiques spécifiques des cinq générations.

*Tableau I - 1: Comparaisons entre les caractéristiques des générations mobile.*

	1G	2G	3G	4G	5G
Date approximation de déploiement	Années 1980	Années 1990	Années 2000	Années 2010	Années 2020
Vitesse de téléchargement théorique	2 kbit/s	384 kbit/s	56 Mbit/s	1 Gbit/s	10 Gbit/s
Temps de latence	Sans objet	629 ms	212 ms	60-98 ms	<1 ms

### I.3. Objectif et Principe de la 5G

Parmi les principaux objectifs :

- Le volume de données devra être 1000 fois plus élevé.
- Le nombre de terminaux pouvant être connectés par antenne devra être 100 fois supérieur, mais le nombre d'antennes dépend surtout des fréquences utilisées.
- Les meilleurs débits (1 Gb par seconde)
- Un temps de « latence » plus court donne l'impression que le réseau est très réactif.
- Moins de consommation.

### I.4. Spectre pour la 5G

La 5G conduira à une meilleure utilisation du spectre électromagnétique avec l'exploitation de plusieurs bandes de fréquences dont celles des ondes millimétriques, entre 24 et 300 GHz, mais aussi les bandes comprises entre 3 et 30 GHz qui ne sont pas exploitées dans la 4G. Elles apportent un très haut débit sur une courte portée, associé à la densification du réseau et à des antennes directives MU-MIMO et Massive-MIMO.

La 5G se déploiera sur les mêmes fréquences que la 4G, mais aussi sur des bandes plus élevées que la 4G, soit sur les bandes 3,4-3,8 GHz et 26 GHz. Le schéma ci-dessous met en bleu les fréquences déjà attribuées et en rose celles qui seront attribuées, dans le spectre radio électrique.

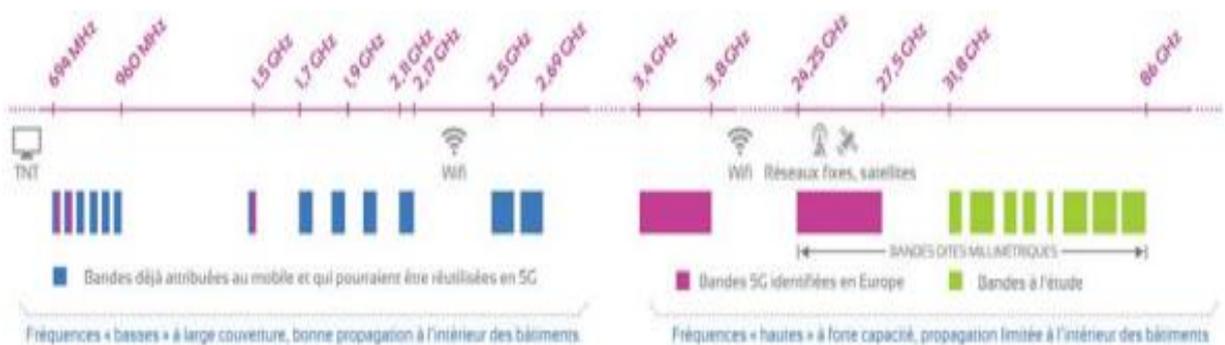


Figure I - 1: Bandes de fréquences 5G

*Tableau I - 2 : Quelques propriétés physiques des bandes de fréquences 5G*

	<b>Pénétration des ondes en intérieur</b>	<b>Portée</b>	<b>Débit</b>
<b>Bande 700 MHz</b>	++	++	
<b>Bande 3400 - 3800 MHz</b>	-	+	+
<b>Bande 26 GHz (Bande dite "millimétrique")</b>	--	--	++

Une des nouveautés de la 5G consiste en l'utilisation de bandes de fréquences élargies (largeurs de spectres bien supérieures à 20 MHz), ces fréquences étant disponibles dans des bandes plus élevées que la 4G. Pour la première fois, la 5G est une norme internationale sur laquelle tout le monde s'accorde, quelle que soit la plaque continentale. Par exemple, un avionneur qui propose de télécharger avec la 5G les données d'un vol d'avion à son arrivée, souhaite pouvoir effectuer ce téléchargement sur les mêmes fréquences quel que soit l'aéroport dans le monde. C'est un avantage indéniable pour offrir un service ou produit « sans couture » à l'échelle planétaire ainsi que de nouveaux cas d'usage. Les bandes de fréquences du spectre radioélectrique allouées pour la 5G sont au niveau mondial, assez cohérent et similaire. Cependant les conditions d'utilisation de certaines bandes de fréquences sont susceptibles de différer d'un pays à l'autre, ce qui peut générer des complexités, surtout pour les industriels qui choisiront de devenir leur propre opérateur de réseau mobile au niveau mondial [2].

### **I.5. Technologies Émergentes Pour réseaux 5G**

Ces dernières années, les réseaux mobiles et sans fil ont connu une croissance remarquable. La technologie 5G consiste à utiliser des téléphones mobiles dans une très large bande passante [3]. Pour comprendre la différence entre la 5G et les réseaux 4G d'aujourd'hui, il est utile de passer en revue ces technologies et d'examiner leur signification pour les utilisateurs sans fil.

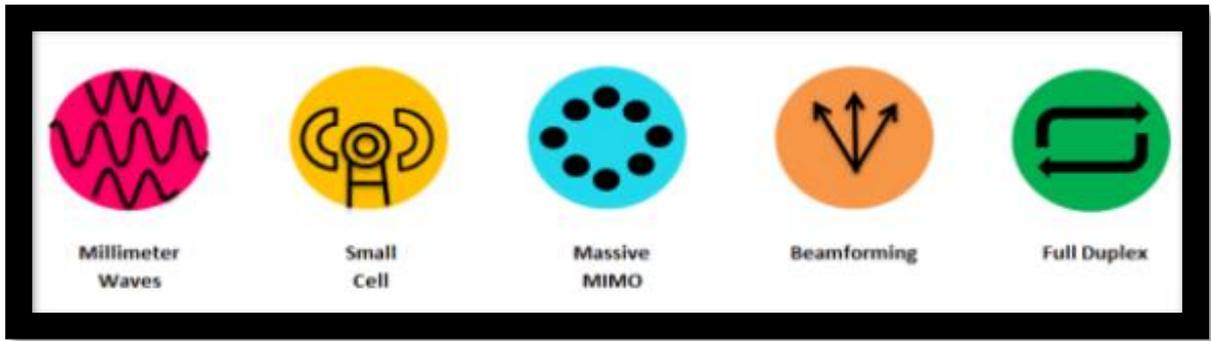


Figure I - 2 : Techniques utilisées dans la technologie 5G.

**I.5.1. Les ondes millimétriques**

Le spectre des micro-ondes, qui a été utilisé pour la plupart des réseaux commerciaux, est actuellement presque entièrement occupé. Heureusement, il existe un large spectre disponible dans la gamme des ondes millimétriques. Cette partie du spectre comprend des fréquences de 30 à 300 GHz **figure (I.3)** avec des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre (de 1 à 10 mm), qui est destinée à être exploitée pour des futures communications mobiles et nombreuses applications, y compris le transfert de données à haute vitesse, l'imagerie radar, le dépistage de sécurité, l'identification de substances ainsi que beaucoup d'autres [4].

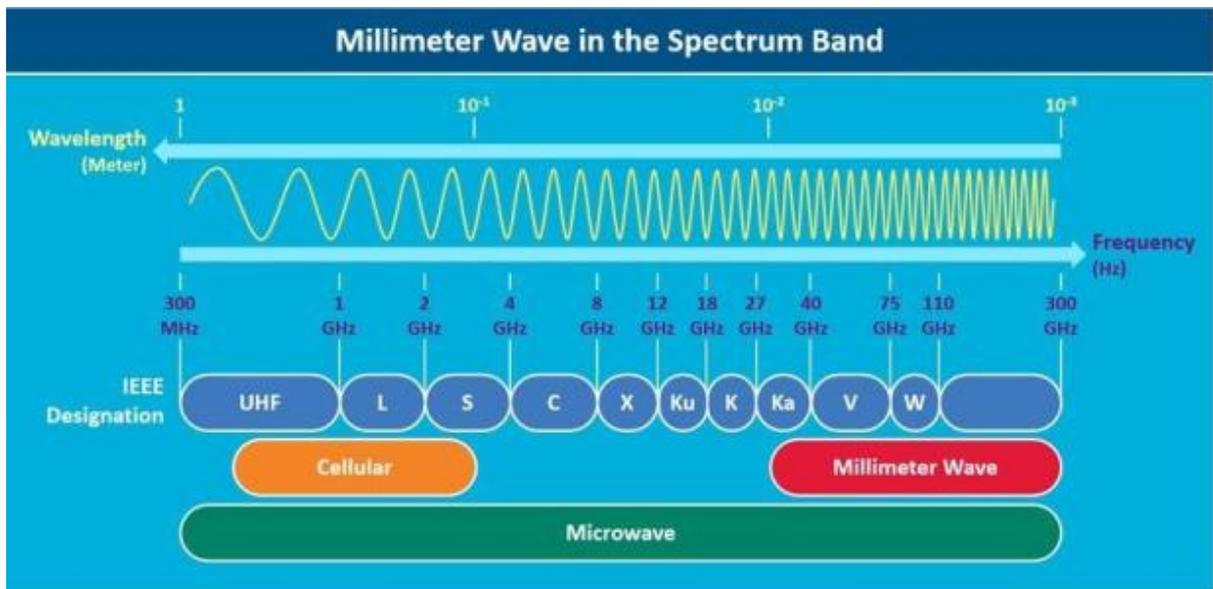
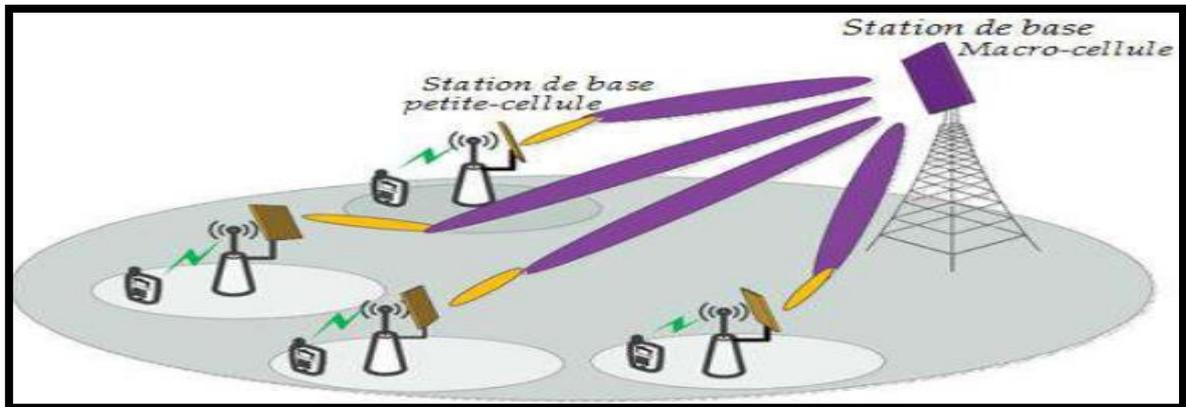


Figure I - 3 : Spectres des fréquences (ondes millimétriques).

**I.5.2. Petites cellules**

Les petites cellules ou plus précisément les UDN (Ultra Dense Network) des petites cellules promettent de jouer un rôle central dans la 5G en tant que puissante réponse à la densification du réseau et au besoin d'augmentation massive de l'efficacité spectrale ou du débit

binaire par unité de surface. Les petites cellules sont également un composant essentiel des réseaux hétérogènes (Het Nets) [5]. Les estimations évoquent pour satisfaire la demande et permettre l'introduction de la 5G. Un nombre d'au moins 10 petites cellules par macro site, dans un environnement urbain où les cellules sont déjà relativement serrées, peut faire face à la densité d'utilisation.



*Figure I - 4 : Petites cellules.*

### **I.5.3. Formation de faisceaux (Beamforming)**

Le Beamforming [6] est la possibilité d'adapter le diagramme de rayonnement du réseau d'antennes selon un certain modèle. Cette technologie consiste à focaliser les ondes en direction de chaque objet spécifique. Cette précision réduit les interférences et augmente l'efficacité du signal et donc consomme moins d'énergie, en même temps économise de la bande passante et de l'énergie. La fréquence de chaque faisceau s'adaptera aux besoins des applications.

### **I.5.4. Full duplex**

Le mode full-duplex (le duplexage complet) est destiné à permettre la transmission et la réception simultanées d'informations à la même fréquence, au même moment et au même endroit ce qui assure une augmentation de 90 % du débit du système par rapport aux modes (half-duplex) traditionnellement utilisés.

### **I.5.5. Internet des objets (IoT)**

L'internet des objets est axé sur la communication entre les choses, entre les choses et les personnes. Les types de services IoT sont très divers ; la maison intelligente, le réseau intelligent, la surveillance environnementale, l'agriculture intelligente et le comptage intelligent. Le réseau devra prendre en charge un nombre considérable de connexions de périphériques et de petits paquets de données. Des services comme la vidéo surveillance et la santé mobile, permettant à des centaines de

milliards d'appareils de se connecter à un réseau créant un véritable "Internet of Everything" [7]. Le but donc, de l'internet des objets est effectivement de connecter non seulement les smart phones et les tablettes mais plus globalement l'ensemble des objets.

### **I.5.6. Communication Device-to-Device (D2D)**

La communication D2D de périphérique à périphérique est considérée comme l'un des ingrédients clés des réseaux sans fil 5G. En général, les avantages résultant du fonctionnement D2D comprennent, entre autres, une efficacité spectrale fortement accrue, un débit de données pour utilisateur et une capacité par zone améliorés, une couverture étendue, une latence réduite et une efficacité accrue en termes de coût et de puissance [7].

### **I.5.7. Prise en charge native de la communication machine-to-machine (M2M)**

La considération essentielle pour la communication M2M en 5G implique de satisfaire trois exigences fondamentalement différentes associées à différentes classes de services à bas débit : un nombre important d'appareils connectés, une fiabilité de liaison très élevée, une faible latence et un fonctionnement en temps réel [8].

### **I.5.8. Software Defined Network (SDN)**

L'approche SDN dispose d'une entité logiquement centralisée, appelée Controller, qui gère le plan de données réseau sous-jacent en utilisant une API service orientée qui lui permet de configurer les tables de transfert des équipements réseau (commutateurs par exemple) afin de réagir aux paquets entrants et aux flux [5]. Le SDN facilite la configuration, la mise à l'échelle et la gestion de l'infrastructure déployée de réseau [9].

### **I.5.9. Network Fonction Virtualisation (NFV)**

Le NFV est le complémentaire du SDN. Il promet d'importantes économies de coûts, de flexibilité et de facilité dans le déploiement de l'infrastructure réseau. Le NFV s'appuie sur l'infrastructure de centre de données qui alimente d'une manière très efficace de nombreux services d'applications Internet, tels que Google et Amazon [9].

### **I.5.10. CloudRAN (C-RAN)**

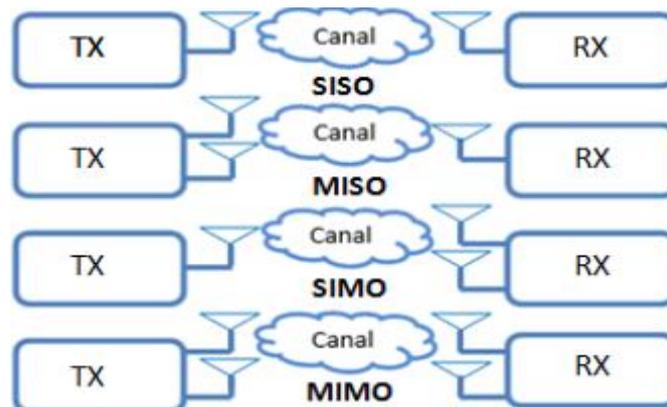
Le C-RAN est aussi connu sous le nom de RAN central. C'est une évolution en SDN. L'architecture de C-RAN décompose la station de base traditionnelle en deux entités ; des têtes radio distantes placées sur les sites cellulaires et des unités de traitement bande de base (BBU) mises en communs dans un pool centralisé. Les deux entités sont liées au moyen d'un réseau de fibre optique (Fibre Radio). Cette nouvelle technologie permet d'augmenter la capacité et la

couverture de réseau. Elle permet également une gestion globale des ressources, une gestion efficace des interférences et une meilleure utilisation de la technologie d'accès radio (RAT).

### I.5.11. Le Massive MIMO

#### I.5.11.1. La technologie MIMO

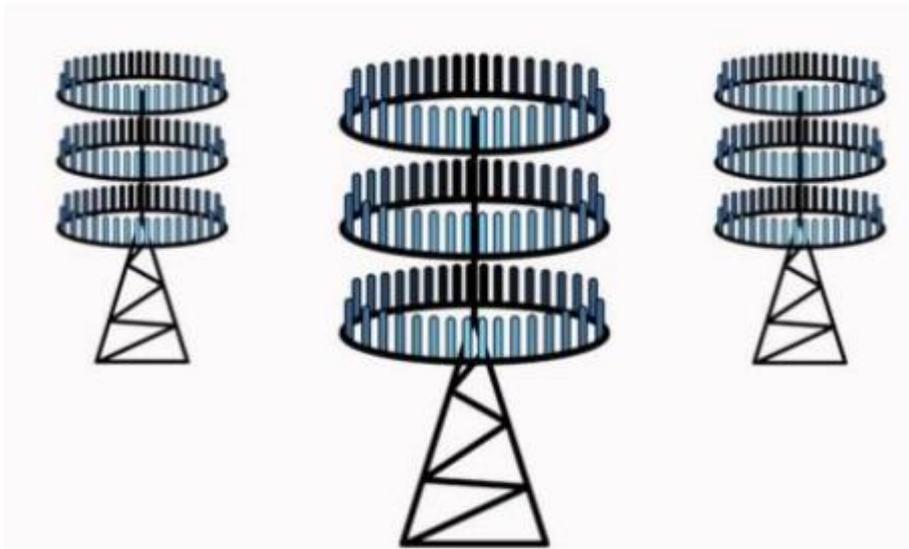
Les systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output) ; consistent à utiliser plusieurs antennes à l'émission et à la réception. Ils sont considérés comme une technologie capable de résoudre les problèmes d'encombrement et de limitation de capacité des réseaux sans fil large bande [10]. Ils permettent une amélioration de la fiabilité et des débits dans la communication sans fil. Lorsqu'un système MIMO comprend, seulement, une seule antenne à l'émission et plusieurs antennes à la réception, il est nommé SIMO (Single Input Multiple Output). De même, lorsqu'il comprend plusieurs antennes à la réception et une seule antenne à l'émission, il est nommé MISO (Multiple Input Single Output). Finalement, si les deux côtés comptent une antenne chacun, le système est dit SISO (Single Input Single Output) [11].



*Figure I - 5: Schémas représentatifs du SISO, MISO, SIMO et MIMO.*

#### I.5.11.2. La technologie Massive MIMO

Le Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs) est une technologie sans fil, qui utilise la technologie de communication multiutilisateur. Elle a suscité d'énormes intérêts de recherche ces dernières années. Chaque station de base (BS) utilise plusieurs antennes pour desservir des dizaines d'utilisateurs dans chaque cellule simultanément (figure I.6) [12]. Par conséquent, le massive MIMO est l'une des technologies clés pour la prochaine génération des réseaux sans fil (5G).



*Figure I - 6 : Illustration de MIMO massive.*

Son principe consiste à multiplier le nombre de canaux entre l'antenne et les objets connectés, les futures antennes 5G pourront gérer plusieurs centaines de canaux, pour connecter des milliers d'objets. La multiplication de ces signaux dans toutes les directions peut générer des interférences gênantes que la 4<sup>ème</sup> génération. Ainsi, cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « intelligentes », situées sur le même panneau (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquences supérieures à 30 GHz, mmWave). L'attrait de l'utilisation du massive MIMO est double : d'une part, cette technologie permet d'augmenter les débits, grâce au multiplexage spatiotemporel ; d'autre part, elle permet de focaliser l'énergie sur un terminal, pour améliorer son bilan de liaison, grâce à la formation de faisceau, ou beamforming. Le Massive MIMO augmente aussi le nombre d'antennes d'émission (des dizaines ou plus de 100 éléments) sur une station de base.

### **I.5.11.3. Les avantages des systèmes Massive MIMO**

Les principaux avantages des systèmes Massive MIMO peuvent être résumés comme suit [13] :

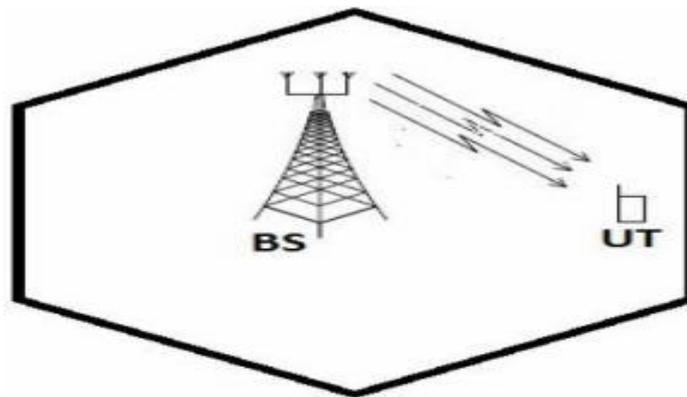
- Gain d'efficacité spectrale élevé.
- Gain d'efficacité énergétique élevé.
- Traitement simple.
- Augmentation du débit de données.
- Augmentation du rapport signal sur bruit de liaison de base.

-Renforcement des canaux.

### I.5.11.4. Types Massive MIMO

#### I.5.11.4.1. SU-MIMO (Single User – Multiple Input Multiple Output)

La SU-MIMO est une technologie radio qui correspond à augmenter les capacités (principalement en débit) entre un émetteur et un récepteur en introduisant plusieurs antennes de chaque côté. Ces multiples antennes permettent, via des algorithmes de décalage temporel et via l'usage des rebonds naturels des ondes radios sur les obstacles (multipath), de créer ce qu'on appelle des flux spatiaux entre l'émetteur et le récepteur. Chacun de ces flux spatiaux permet de transférer des données de manière indépendante et dans le même laps de temps. Comme l'indique son nom, cette technique permet uniquement de focaliser la communication des antennes vers un seul récepteur à la fois depuis un seul émetteur [14].



*Figure I - 7 : Single-User Massive MIMO*

#### I.5.11.4.2. MU-MIMO (Multi User – Multiple Input Multiple Output)

Un système MIMO dit multi-utilisateurs (MU-MIMO ou multi-user MIMO) [15], correspond à un ensemble de liaisons MIMO entre un ou plusieurs points de l'espace à l'émission et un ou plusieurs points de l'espace en réception utilisant les mêmes ressources temps fréquence. Cette utilisation des mêmes ressources temps-fréquence permet d'accroître la capacité ou l'efficacité spectrale d'un réseau de transmission sans augmenter la bande.

Les systèmes MU-MIMO requièrent idéalement l'exploitation des informations de canal de tous les utilisateurs à l'émission de manière à optimiser les liens vers chacun des utilisateurs en limitant les interférences générées sur les autres liens. Cette lutte anti-interférences à l'émission peut être envisagée de différentes manières telles qu'à partir de l'exploitation de techniques

d'alignement d'interférences [16] par exemple. De tels systèmes sont intégrés dans les réseaux cellulaires 4G.

### **I.6. Conclusion**

Dans ce premier chapitre nous avons commencé par un bref historique sur les générations de technologie de télécommunications, ensuite nous avons décrit les clés de la 5G qui représente la prochaine génération de normes de téléphonie mobile et promet d'améliorer l'expérience de l'utilisateur final en offrant de nouveaux services et applications à des débits se mesurant en gigabits, et d'améliorer grandement la qualité de fonctionnement et la fiabilité des réseaux.

---

## **CHAPITRE II :**

### **Généralités sur les antennes et les rectennas**

---

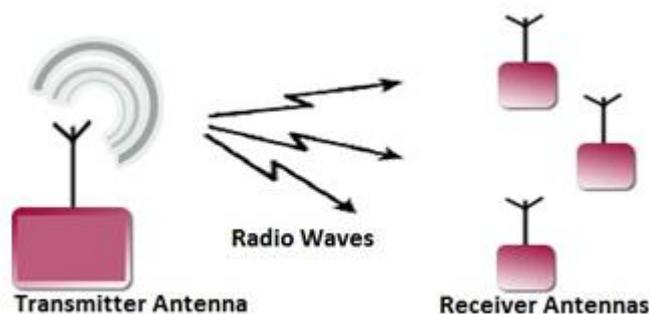
### II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des systèmes utilisés pour la récupération d'énergie électromagnétique, appelés « RECTENNA ».

Dans ce chapitre, nous présenterons, dans un premier temps la récolte d'énergie, le principe de la transmission d'énergie sans fil ainsi que les techniques existantes de récupération d'énergie électromagnétique. Nous aborderons, dans un deuxième temps, les antennes imprimées et leurs caractéristiques. Nous présenterons, dans un troisième temps, la rectenna et les différentes topologies de convertisseurs RF-DC.

### II.2. Les communications sans fil

Les communications sans fil remplacent les liens filaires figure (II.1) et sont utilisées avec succès dans diverses applications où les communications câblées ne sont pas physiquement possibles [1]. Remplacer le câblage physique par des connexions sans fil offre des avantages en termes de flexibilité, d'interopérabilité et de robustesse améliorée [2].



*Figure II - 1 : Schéma pour la communication sans fil tiré de <http://electronicmaffia.weebly.com/>*

#### II.2.1. Norme de téléphonie mobile

Les systèmes utilisés actuellement sont le réseau GSM (Global System for Mobile communications) aussi appelé de deuxième génération (2G) qui constitue au début du 21ème siècle le standard de téléphonie mobile le plus utilisé en Europe. Il permet la transmission de la voix et des textes courts. Le système UMTS dit de troisième génération (3G) permet en particulier un transfert rapide des images, sons et vidéos. Le système LTE dit de quatrième génération (4G) permet quant à lui d'accéder à des débits 50 fois supérieurs à celui de la 3G facilitant ainsi les

téléchargements de fichiers volumineux et la création de nouveaux services. En Europe, le standard GSM utilise les bandes de fréquences 880 MHz - 960 MHz et 1710 MHz - 1880 MHz.

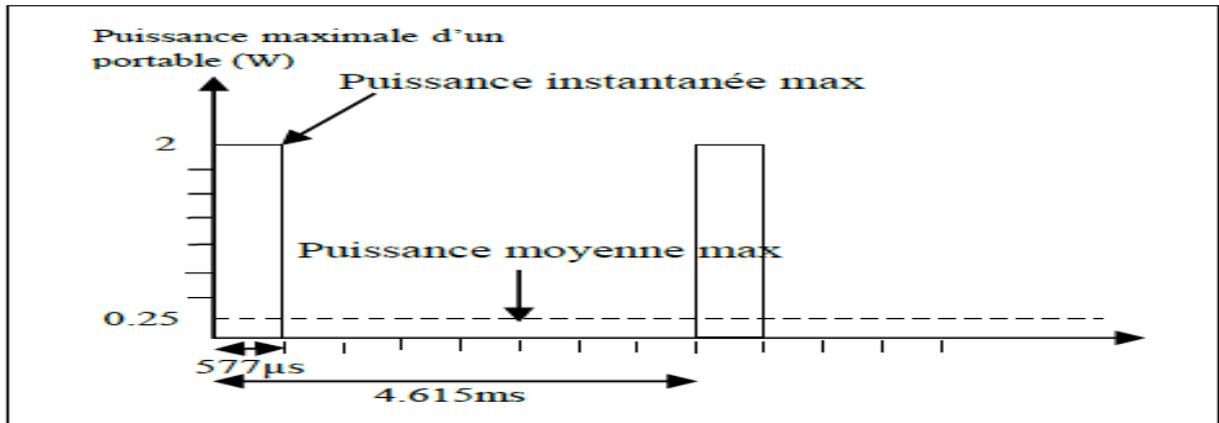


Figure II - 2 : Puissance maximale de la norme GSM 900 [3]

### II.2.2. Bluetooth

Bluetooth est une norme de communication sans fil basée sur un système radio conçu pour des communications à courte portée, appropriée pour remplacer les câbles pour imprimantes, fax, souris, claviers, etc. Les communications entre les ordinateurs portables peuvent être envisagées avec ce type de norme, servir de pont entre les autres réseaux, ou servir de nœuds de réseaux ad hoc. La norme Bluetooth exploite la bande ISM (Industrial, Scientific and Medical band) et plus précisément la fréquence 2.4 GHz.

Pour la norme Bluetooth, il existe trois classes de puissance ayant des portées différentes comme le montre le tableau II.1. La plupart des équipements sont équipés en classe 2 [4].

Tableau II - 1: Classe de puissances des émetteurs Bluetooth

Classe de puissance	Puissance crête (mW)	Portée (m)
1	100	100
2	2.5	40
3	1	10

### II.2.3. Wifi

Le Wi-Fi est une norme qui a été approuvée par IEEE en 1997 pour des applications WLAN (Wireless Local Area Network). La norme spécifie les transmissions dans la bande 2.4 GHz. Le spectre utilisé varie de 2.4 à 2.4835 GHz aux États-Unis et en Europe, tandis qu'au Japon, il varie

de 2.471 à 2.497 GHz. La bande de 5 GHz est aussi utilisée. Il s'agit d'une bande non agréée aux États-Unis, mais pas dans la plupart des autres pays. De ce fait, son utilisation demeure limitée. La puissance délivrée par un point d'accès Wi-Fi est stable.

La puissance électrique récupérée par une antenne de gain  $G_r$  à une distance  $D$  d'une source de puissance  $P_e$  émise avec une antenne de gain  $G_e$  est donnée par :

$$P_r = P_e * G_e * G_r * \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad \text{II.1}$$

$P_e * G_e$  Correspond à la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE).

La réglementation radioélectrique prévoit une puissance maximale (PIRE) de 100 mW pour les équipements Wi-Fi fonctionnant à 2,45 GHz [5]. Pour les équipements Wi-Fi utilisés dans les bandes de fréquences autour de 5 GHz, la réglementation radioélectrique prévoit une PIRE maximale de 200 mW dans la bande 5.150-5.350 GHz, uniquement pour une utilisation intérieure, et de 1 W dans la bande 5.470-5.725 GHz, pour une utilisation intérieure comme extérieure.

### II.2.3.1. Limites d'exposition aux champs électromagnétiques

Les limites d'exposition aux champs électromagnétiques ont été définies par l'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation protection), dans les années 1980s. C'est une organisation non gouvernementale (NGO) reconnue par l'organisation mondiale de la santé (World Health Organization « WHO »), son objectif principal est de protéger l'environnement et les gens des effets nocifs du rayonnement électromagnétique. Pour ce faire, l'ICNIRP développe et publie des articles, afin de donner les conseils et les nouveautés concernant les expositions aux champs électromagnétiques. Ces articles sont basés sur les recherches effectuées par des experts dans différents domaines (biologie, chimie, médecine...), qui travaillent ensemble au sein de l'ICNIRP et qui évaluent les risques aux expositions électromagnétiques et définissent les limites au-delà desquelles le rayonnement électromagnétique devient nocif. Les valeurs limites d'exposition du public sont définies en Europe par la recommandation européenne du 12 juillet 1999 et en France par le décret N° 2002-775 du 3 mai 2002. Le tableau II-2 donne les valeurs limites des champs électrique et magnétique pour le grand public [6].

*Tableau II - 2 : Limites d'exposition aux champs électrique et magnétique pour le grand public [6]*

Gamme de fréquences	E (V/m)	H (A/m)	B (μT)	Densité de puissance équivalente en onde plane Seq (W/m <sup>2</sup> )
0 – 1 Hz	-	3,2 x 10 <sup>4</sup>	4 x 10 <sup>4</sup>	-
1 – 8 Hz	10 000	3,2 x 10 <sup>4</sup> /f <sup>2</sup>	4 x 10 <sup>4</sup> /f <sup>2</sup>	-
8 – 25 Hz	10 000	4 000/f	5 000/f	-
0,025 – 0,8 kHz	250/f	4/f	5/f	-
0,8 – 3 kHz	250/f	5	6,25	-
3 – 150 kHz	87	5	6,25	-
0,15 – 1 MHz	87	0,73/f	0,92/f	-
1 – 10 MHz	87/f <sup>0,5</sup>	0,73/f	0,92/f	-
10 – 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 – 2 000 MHz	1,375 f <sup>0,5</sup>	0,0037 f <sup>0,5</sup>	0,0046 f <sup>0,5</sup>	f/200
2 – 300 GHz	61	0,16	0,20	10

### **II.3. La récolte d'énergie**

La récolte d'énergie est une technique qui capture et récupère l'énergie de l'environnement comme une source d'énergie pour la convertir à l'énergie électrique [7] [8]. Les sources communes d'énergies ambiantes pour la récolte d'énergie impliquent l'énergie mécanique résultant des vibrations et des déformations; l'énergie thermique des fours et des autres sources de chauffage; l'énergie solaire de toutes les formes des sources lumineuses tels que l'éclairage et le soleil; l'énergie électromagnétique qui est capturée par de bobines et de transformateurs; l'énergie éolienne et l'énergie fluide résultant du flux d'air et de liquide; l'énergie humaine générée par le mouvement humain à pied, la peau humaine et le sang; et l'énergie chimique des processus biologiques [9].

### **II.4. Spectre électromagnétique**

Le choix de la bande de fréquences utilisée dépend principalement des niveaux de puissances crête utilisés par les différents émetteurs présents dans le spectre électromagnétique et des protocoles de communication qui se traduisent par une puissance moyenne émise parfois bien plus faible que la valeur crête. L'objectif est d'identifier les niveaux de puissance récupérables les plus élevés et les plus stables, par plages fréquentielles.

Chaque application nécessitant l'émission d'ondes électromagnétiques doit être autorisée par l'agence chargée de planifier et gérer l'utilisation du spectre fréquentiel, qui lui attribue une bande de fréquence et définit le niveau de puissance nécessaire pour le bon fonctionnement de

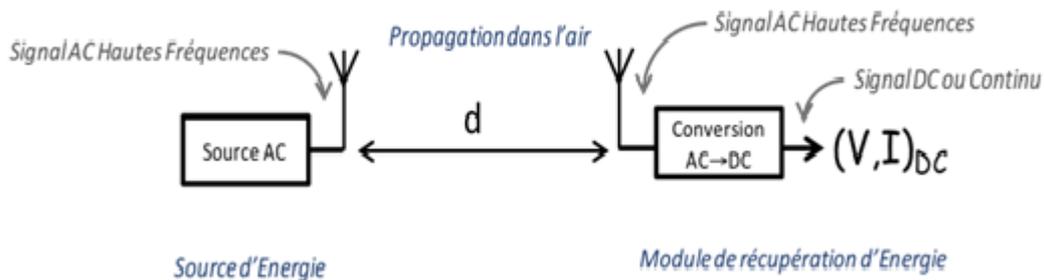
l'application, afin que cela ne perturbe pas le fonctionnement des autres appareils et respecte des gabarits fixés pour des considérations de santé publique.

### II.5. Transmission d'énergie sans fil

#### II.5.1. Principe

La transmission d'énergie sans fil ou télé alimentation consiste à transmettre de l'énergie sous forme électromagnétique. Elle met en jeu une source d'énergie (émission d'un signal AC), un milieu de propagation (l'air le plus souvent) et un module de récupération d'énergie **figure (II.3)**.

Ce principe a fait l'objet d'investissements importants notamment pour des applications de très forte puissance (quelques centaines à milliers de kW). Ces investigations ont montré que la puissance à émettre pour atteindre un tel niveau de puissance n'est pas réaliste. Cependant pour des applications dont le niveau d'énergie reste faible à modéré, la télé alimentation est une solution très attractive. C'est sur ce principe que s'est développée, à partir des années 90, la technologie d'identification par voies radiofréquences ou RFID. Un lecteur ou *reader* transmet à une étiquette ou *tag RF*, en même temps que sa requête, l'énergie nécessaire à leur communication.

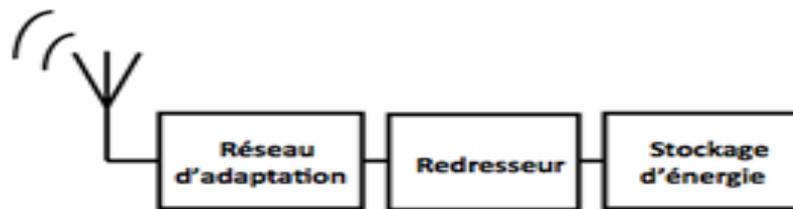


**Figure II - 3 : Principe d'un système de transmission d'énergie sans fil**

L'objectif ici n'est pas d'établir une communication, mais simplement de récupérer de l'énergie en utilisant la voie radiofréquence, puis de la stocker. Le rendement du système complet reste faible, notamment à cause de la forte atténuation du signal lors de sa propagation dans l'air. Cependant, les avancées technologiques en matière d'objets nomades ont aujourd'hui réduit leurs consommations en puissance à un point tel que des solutions à base de télé alimentation soient dans l'avenir capables de couvrir tout ou partie de leurs besoins énergétiques.

### II.5.1.1. Module de récupération d'énergie

Le module de récupération d'énergie se compose généralement d'une antenne et d'un circuit de conversion RF/DC, l'ensemble étant communément appelé "Rectenna" pour la contraction des mots anglais "rectifier" et "antenna" **figure (II.4)**. L'énergie électromagnétique rayonnée par l'antenne d'émission est captée par l'antenne de réception puis transmise au circuit de conversion sous forme d'une tension sinusoïdale haute fréquence. La mise en forme du signal électrique issu de l'élément rayonnant implique un effort particulier au niveau du transfert d'énergie. En effet, le fonctionnement en hautes fréquences, jusqu'à quelques Giga Hertz, nécessite la mise en place d'un circuit spécifique d'adaptation d'impédance avec l'antenne. Finalement la puissance disponible en sortie est utilisée directement pour alimenter un circuit électronique ou alors accumulée dans un élément de stockage jusqu'à son utilisation.



*Figure II - 4 : Schéma bloc d'une rectenna*

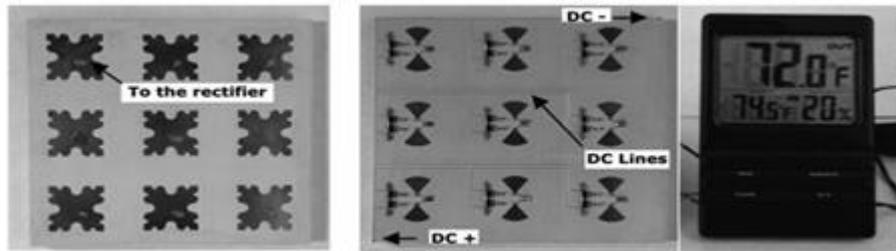
### II.5.2. Scénario de récupération

La mise en place de télé alimentation se développe actuellement suivant deux types de scénarios : la récupération d'énergie opportuniste [10] et le transfert d'énergie sans fil [11].

#### II.5.2.1. Récupération opportuniste

Dans le cas de la récupération dite opportuniste, l'énergie est collectée à partir du trafic des télécommunications locales (type GSM, Wi-Fi ou autre). Les niveaux d'énergie disponible sont donc très aléatoires et la plupart du temps faibles. En effet, dans une zone où il y a très peu d'utilisateur et/ou de source de communication les densités d'énergie disponible seront réduites. À l'inverse, les lieux de forte densité d'utilisateurs, comme une gare, possèdent des niveaux plus élevés d'énergie. Le principal avantage d'une telle récupération est que sa mise en œuvre reste peu coûteuse. En effet, le seul coût est l'achat et la mise en place du récupérateur.

A Khemar et al. Réalisent une rectenna complète capable de fonctionner dans un environnement urbain [12]. Le récupérateur, placé dans un lieu très fréquentée de Paris où les densités de puissance sont importantes, est capable d'obtenir une tension de sortie de presque 200 mV en continu avec des "pics" dépassant les 1 V. Le rectenna est donc capable de façon ponctuelle de télé alimenter un capteur. En 2012, U. Olgun et al. Placent un réseau de récupérateur dans une pièce où plusieurs objets sont connectés au réseau Wi-Fi. Après une charge de 5 min la rectenna peut alimenter un capteur de température/humidité [13] **figure (II.5)**.



*Figure II - 5 : Photo recto verso du réseau de récupérateur télé-alimentant un capteur de température et d'humidité [13].*

### II.5.2.2. Transfert de puissance

La puissance disponible dans l'environnement peut ne pas suffire à alimenter un circuit électronique. La densité de puissance au niveau de la rectenna doit donc être artificiellement augmentée. Cela peut se faire de deux façons pour parvenir à ce résultat :

Le premier est l'utilisation d'un objet du quotidien pour envoyer de l'énergie à la rectenna (figure II.6). Cet objet serait par exemple un téléphone portable ou une tablette. En procédant de la sorte, la puissance émise n'est limitée que par l'objet utilisé. Par rapport à la récupération opportuniste, cela n'engendre aucun surcoût d'installation, mais seulement un surcoût d'utilisation avec la décharge plus rapide de l'objet émetteur.

La deuxième solution est d'ajouter dans l'environnement une source d'énergie. Cette source est dimensionnée en fonction de l'application garantissant ainsi à la rectenna une densité de puissance suffisante. Il est alors possible de dimensionner cette source en fonction du besoin afin de garantir à la rectenna une densité de puissance suffisante. Dans ces conditions, il est certain que l'élément alimenté par la rectenna fonctionne, cependant cette installation a un coût non négligeable car la source devra être conçue et surtout alimentée en permanence pour assurer un bon fonctionnement du système.

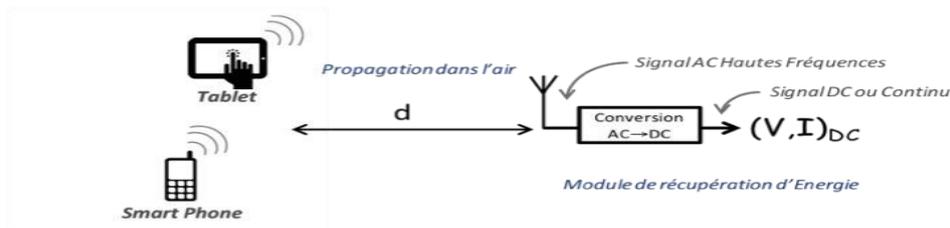


Figure II - 6 : Schéma de transmission d'énergie à partir d'objets connectés du quotidien

### II.5.2.3. Bilan

Les trois scénarios identifiés ont tous des avantages et des inconvénients. La récupération opportuniste permet pour un coût très faible de récupérer les ondes RF de l'environnement, cependant la fiabilité de la récupération est grandement dépendante de l'environnement. L'utilisation d'un objet connecté pour envoyer de l'énergie fiabilise la récupération, cependant cette solution est limitée par son autonomie et sa puissance maximale d'émission. Enfin, la dernière solution est la plus fiable, mais les coûts de production et d'alimentation de la nouvelle source RF peuvent être un frein et rendre le projet économiquement non viable. L'ensemble de ces caractéristiques est résumé dans le **tableau II.3.**

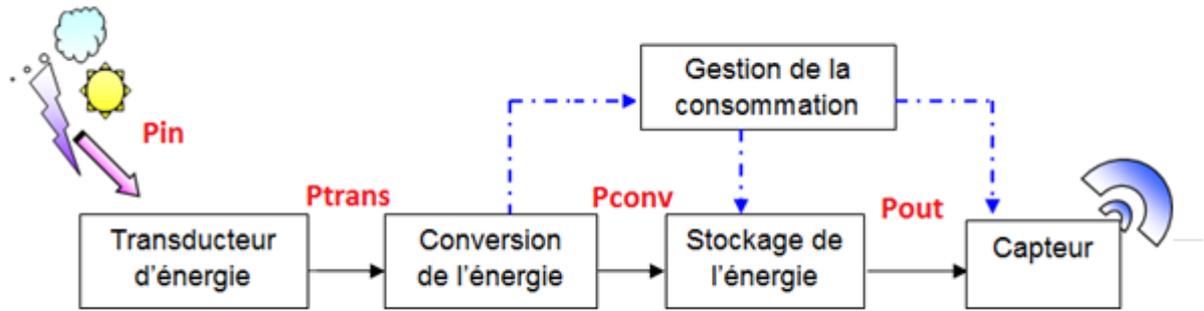
Tableau II - 3 : Comparaison des différents scénarios de récupération

Scénarios	Niveau d'énergie	Fiabilité	Prix
Opportuniste	Faible	Faible	Faible
Objet connecté du quotidien	Moyen	Moyenne	Faible
Source dédiée	Fort	Forte	Important

## II.6. Techniques de récupération d'énergie électromagnétique

### II.6.1. Architecture globale d'un récupérateur d'énergie

Un système de récupération d'énergie peut être décomposé en 5 blocs comme le montre la figure (II.7), l'objectif principal de ce système est de fournir l'énergie nécessaire au capteur afin qu'il puisse fonctionner [14].



*Figure II - 7 : Architecture globale d'un récupérateur d'énergie [14]*

Le transducteur d'énergie est le premier élément de la chaîne de récupération d'énergie, celui-ci permet de convertir une grandeur physique  $E$  en une grandeur physique  $S$ . Il fournit en sortie une grandeur électrique (tension, courant...) à partir d'une grandeur physique quelconque en entrée. Le capteur est un bon exemple de transducteur, celui-ci permet de mesurer, en utilisant le principe de transduction, des grandeurs physiques telles que la pression, l'accélération, la température, etc.

Le deuxième bloc est celui de la conversion d'énergie, son rôle est de convertir l'énergie électrique à la sortie du transducteur en un signal électrique continu. Cet élément de la chaîne est très important et doit assurer la meilleure efficacité, d'ailleurs les travaux qui sont effectués à ce niveau ont pour objectif principal d'augmenter le rendement de conversion, un rendement de 100% signifie que l'énergie a été convertie sans pertes.

La troisième entité est le stockage d'énergie, ce module a pour rôle de conserver toute l'énergie DC à la sortie du module de conversion afin de l'utiliser au moment opportun, l'élément de stockage peut être une super-capacité, une batterie, 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.

Dans le cadre de la récupération d'énergie électromagnétique, en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, on peut distinguer deux grandes techniques de transfert d'énergie : Le transfert non radiatif et le transfert radiatif.

### II.6.2. Transfert non radiatif d'énergie

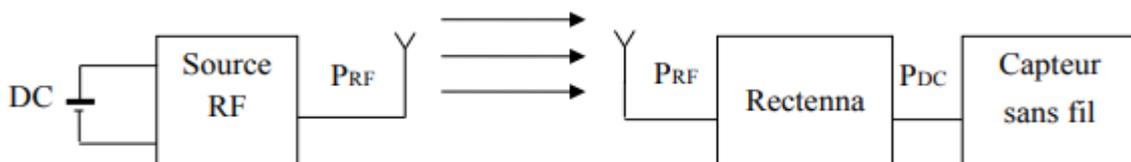
Le transfert non radiatif implique que l'on est en champ proche, la distance entre l'émetteur et le récepteur est très petite devant la longueur d'onde, l'énergie peut être transférée par l'intermédiaire du champ électrique, par couplage capacitif entre deux électrodes métallique [15] ou par l'intermédiaire du champ magnétique, par couplage inductif entre deux bobines [16]. Les systèmes de TESH basés sur le couplage magnétique se divisent en deux types : le couplage magnétique inductif (CMI) et le couplage magnétique résonnant (CMR).

L'exemple le plus répandu du couplage magnétique inductif est le transformateur. L'énergie est transférée du primaire au secondaire par induction magnétique. Toutefois, il est primordial que la bobine du secondaire soit positionnée au plus près de la bobine du primaire afin d'atteindre des efficacités élevées.

Le couplage magnétique résonnant consiste à transférer l'énergie entre deux dispositifs résonnants à la même fréquence. Les bobines sont chargées par des capacités qui viennent créer des circuits LC résonnants. Quand les deux bobines résonnent à la même fréquence, l'efficacité est largement augmentée. Par conséquent, la distance entre l'émetteur et le récepteur peut être augmentée.

### II.6.3. Transfert radiatif d'énergie

L'énergie peut également être transférée par propagation des ondes électromagnétiques grâce à l'utilisation d'antennes à la fois pour rayonner l'énergie et la recevoir. L'utilisation des antennes implique que l'on est en champ lointain. Par conséquent, le rendement est plus faible comparé au couplage magnétique inductif. Un système de TESH est représenté sur la **figure (II.8)**, la partie émettrice est composée d'une source d'énergie RF et d'une antenne d'émission. La partie réceptrice est composé d'un circuit de récupération d'énergie électromagnétique appelé « rectenna » et du module à alimenter qui peut être par exemple un capteur sans fil.



*Figure II - 8 : Architecture d'un système de TESH*

### II.7. Définition d'une Antenne

Une antenne est un dispositif qui permet de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique en émission et vice versa en réception afin d'assurer la transmission sans fil de l'information.

#### II.7.1. Paramètres Caractéristiques d'une Antennes

Une antenne est caractérisée par différents paramètres qu'on peut classer soit en caractéristiques électriques, soit en caractéristiques de rayonnement.

##### II.7.1.1. Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée est définie comme étant l'impédance présentée par une antenne à ses bornes ; elle est égale au rapport de la tension  $V_e$  sur le courant  $I_e$  présenté à l'entrée [17] :

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = R + jX \quad \text{II.1}$$

##### II.7.1.2. Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est un paramètre qui permet de quantifier la quantité du signal réfléchi par rapport au signal incident [17], généralement ce coefficient  $\Gamma$  est lié à l'impédance d'entrée de l'antenne  $Z_e$  et l'impédance caractéristique  $Z_c$  par la relation :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_c}{Z_e + Z_c} \quad \text{II.2}$$

Signalons qu'on peut représenter  $\Gamma$  sous forme de paramètre  $S$  en dB tel que :

$$S_{11}(\text{dB}) = 20 \log(\Gamma) \quad \text{II.3}$$

##### II.7.1.3. Rapport d'onde stationnaire (ROS)

Le Rapport d'Onde Stationnaire (ROS) ou, en anglais, VSWR pour Voltage Standing Wave Ratio tout comme le coefficient de réflexion traduit l'adaptation ou la désadaptation d'impédance entre deux éléments. Lorsque l'adaptation n'est pas parfaite, la partie de l'onde réfléchie se superpose à l'onde incidente pour ne former qu'une seule onde, appelée onde stationnaire. Il se définit comme le rapport des valeurs maximales (+V) et minimales (-V) de l'amplitude de l'onde stationnaire, il est donné par la relation suivante [18] :

$$ROS = \frac{(+v) + (-v)}{(+v) - (-v)} \quad \text{II.4}$$

Il est lié au coefficient de réflexion  $\Gamma$  par la relation :

$$ROS = \frac{(1+|\Gamma|)}{(1-|\Gamma|)} \quad \text{II.5}$$

### II.7.1.4. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'une antenne présente les variations de la puissance rayonnée par unité d'angle solide dans les différentes directions de l'espace. En dehors du cas des antennes omnidirectionnelles dans certains plans, les antennes ne rayonnent pas leurs puissances de façon uniforme dans toutes les directions de l'espace [19].

Il est donné par la relation suivante :

$$R(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p(\theta, \varphi)} \quad \text{II.6}$$

### II.7.1.5. Directivité

La directivité  $(\theta, \varphi)$  d'une antenne dans une direction  $(\theta, \varphi)$  est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $(\theta, \varphi)$  et la puissance que rayonnerait une antenne isotrope. [20].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_r}{4\pi}} = 4\pi \frac{P(\theta, \varphi)}{P_r} \quad \text{II.7}$$

### II.7.1.6. Gain

Le gain  $G(\theta, \phi)$  [21] d'une antenne dans une direction  $(\theta, \phi)$  est le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée  $P(\theta, \phi)$  sur la puissance que rayonne la source isotrope par unité d'angle solide. Il est exprimé en dB et présenté par l'équation [22] :

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\left(\frac{P_a}{4\pi}\right)} \quad \text{II.8}$$

### II.7.1.7. Fréquence de résonance et bande passante

La bande passante de l'antenne détermine la bande de fréquences où le coefficient de réflexion est inférieur au seuil arbitrairement défini. La bande passante est généralement proportionnelle à la bande de fréquence avec un facteur de réflexion inférieur à -10 dB. Dans certaines applications, ce niveau peut être augmenté à -6 dB, ce qui permet certaines limitations dans la conception de l'antenne, par exemple, pour certaines antennes mobiles. La fréquence de résonance, correspond à la fréquence pour laquelle l'antenne est la mieux adaptée, c'est-à-dire pour laquelle le coefficient de réflexion est le plus faible. Sur une bande passante donnée, il est possible d'observer plusieurs minimas donc plusieurs fréquences de résonance [23].

La bande passante est définie par la formule suivante :

$$BP = \frac{f_2 - f_1}{f_c} \quad \text{II.9}$$

Avec  $f_2$  la fréquence maximale et  $f_1$  la fréquence minimale entre lesquelles le coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB (voire -6dB) et  $f_c$  la fréquence centrale [24].

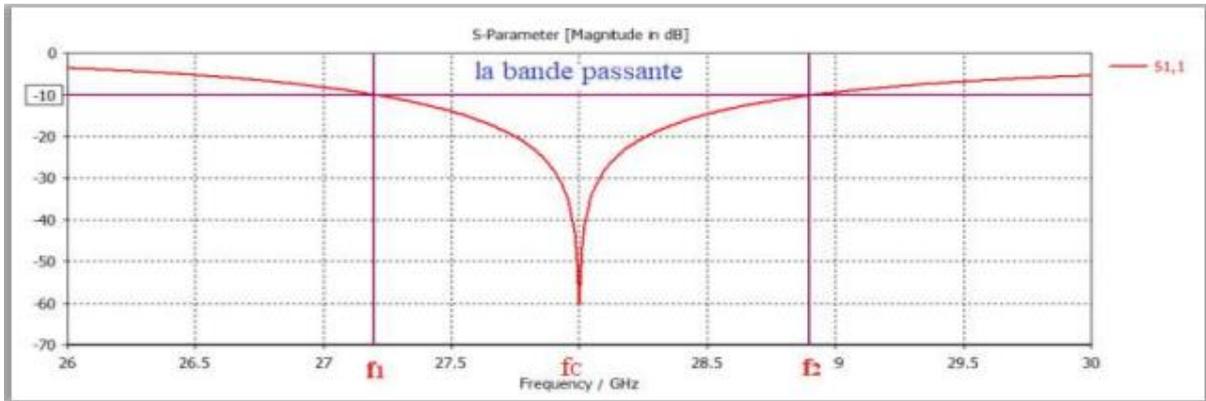


Figure II - 9: Illustration de la bande passante a -10 dB d'une antenne.

### II.7.2. Antennes imprimées (micro-ruban)

L'antenne imprimée, appelée aussi antenne patch est un type récent d'antenne dont le développement et l'utilisation sont de plus en plus fréquents. Elle est constituée d'un diélectrique (substrat), possédant un plan de masse métallique sur une face. Sur l'autre face une gravure métallique permet de supporter des courants de surface (patch) qui créent le rayonnement électromagnétique **figure (II.10)**.

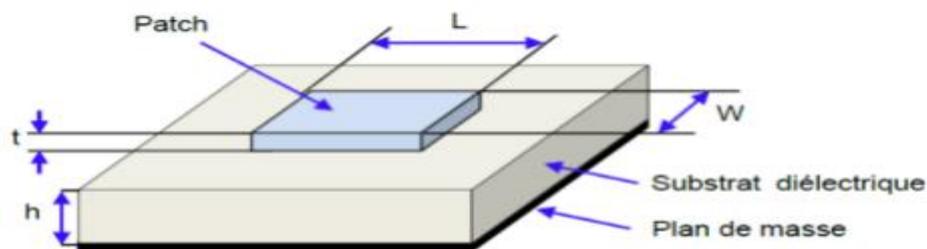
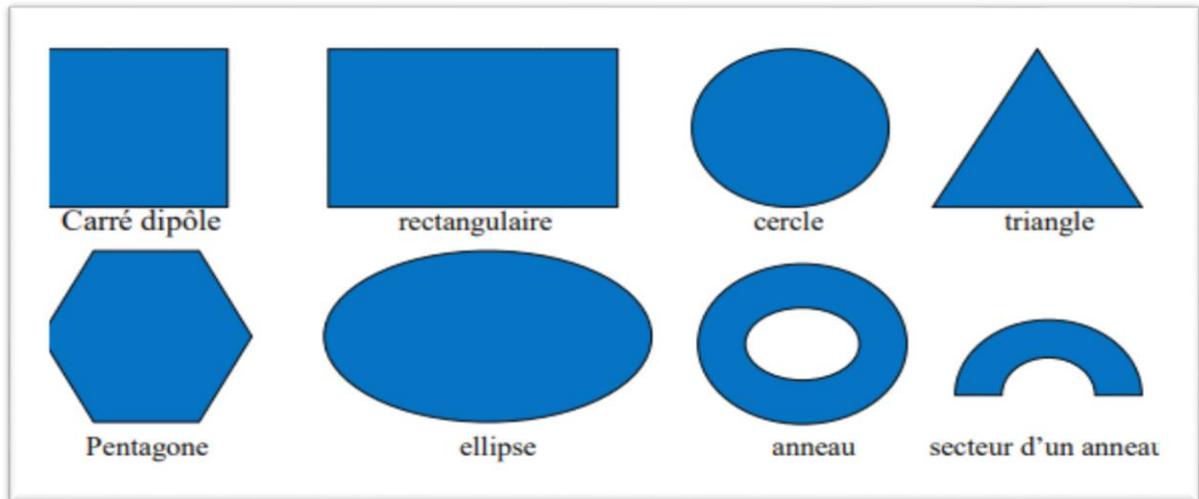


Figure II - 10: Structure de base d'une antenne imprimée.

L'antenne patch peut prendre plusieurs formes comme suivants **figure (II.11)** :



*Figure II - 11: Différentes formes de l'antenne patch.*

### **II.7.3. Techniques d'alimentation**

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

#### **II.7.3.1. Alimentation par ligne micro ruban [25]**

Une ligne micro ruban est directement connectée à l'élément rayonnant comme le montre figure II.12.a, le point de jonction peut être sur l'axe de symétrie du patch ou complètement décalé pour permettre une meilleure adaptation d'impédance. Ce type d'alimentation est facile à mettre en œuvre et à modéliser, mais peut engendrer un rayonnement parasite qui peut devenir considérable et une bande passante typiquement entre 2 et 5%.

#### **II .7.3.2. Alimentation par sonde coaxiale**

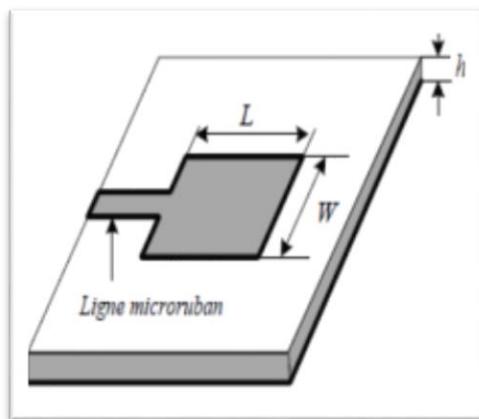
L'alimentation par sonde coaxiale est réalisée par un contact direct de l'élément rayonnant au conducteur central d'une ligne coaxiale, tandis que son conducteur externe est relié au plan de masse (figure II.12.b). L'adaptation d'impédance est réalisable en déplaçant le point d'alimentation sur le patch. L'inconvénient de ce type d'alimentation réside dans la bande passante étroite et la difficulté de modélisation surtout pour des substrats électriquement épais [25].

### II.7.3.3. Alimentation par couplage par fente [25]

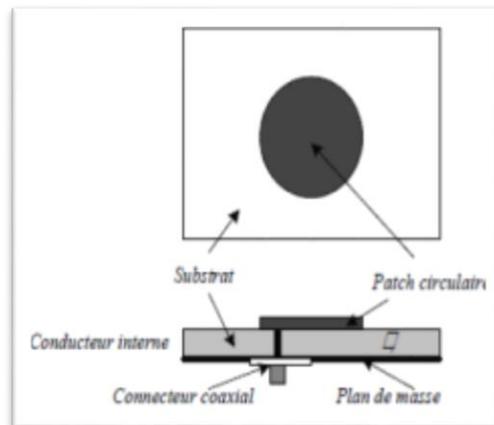
L'alimentation par ligne micro ruban ou par ligne coaxiale présentent une asymétrie qui génère des modes d'ordres supérieurs produisant un rayonnement de polarisation croisée, pour y remédier à cet état de fait l'alimentation par fente a été introduite. Un couplage électromagnétique est introduit à travers une petite fente réalisée dans le plan de masse qui sépare deux substrats l'un portant l'élément rayonnant et l'autre la ligne micro ruban comme le montre la **figure (II.12.c)**. Cette configuration permet une optimisation indépendante entre la ligne d'alimentation et le patch, facile à modéliser et présente un rayonnement parasite modéré. Cependant, elle est la plus difficile à mettre en œuvre et présente une bande passante étroite.

### II .7.3.4 Alimentation par couplage de proximité

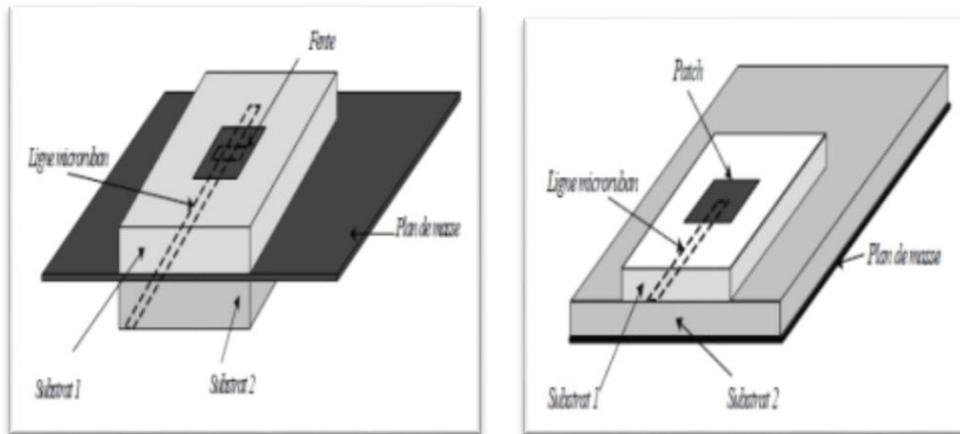
La meilleure bande passante pouvant atteindre 13% est réalisable en utilisant l'alimentation par couplage de proximité illustrée par la figure II.12.d. L'avantage de cette technique d'alimentation réside dans l'affaiblissement du rayonnement parasite et la facilité du couplage, ce dernier peut être optimisé par l'ajustement des dimensions de la ligne. Cependant elle est très difficile à mettre en œuvre [25].



a) Par ligne micro ruban.



b) Par ligne coaxiale.



c) Par couplage par fente

d) Par couplage par fente.

Figure II - 12 : Techniques d'alimentation

## II.8. Rectenna

### II.8.1. Définition

Le terme rectenna est un mot anglais composé de « rectifier + Antenne ». La rectenna est un dispositif permettant la récupération d'énergie électromagnétique. Son principe consiste à collecter cette énergie d'une ou plusieurs sources à travers une antenne réceptrice, la puissance récupérée étant convertie avec un rendement le plus grand possible en puissance continue (DC) à travers un circuit redresseur constitué d'une ou de plusieurs éléments semi-conducteurs actifs non linéaires, ceci afin d'alimenter des dispositifs électroniques à basse consommation. Il convient de noter à ce stade qu'on peut chercher, selon le dispositif à alimenter, à maximiser soit le courant continu, soit la tension continue ou encore la puissance DC elle-même [26].

### II.8.2. Schéma de principe

Une rectenna est formée par une association d'une antenne de réception, d'un filtre HF, d'un redresseur RF-DC, d'un filtre DC et d'une charge résistive.

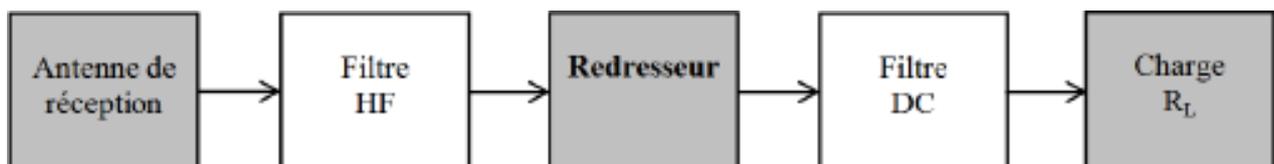


Figure II - 13 : structure d'une rectenna

Tout d'abord, l'antenne de réception capte l'énergie microonde et la transmet au circuit de conversion. Puis le redresseur, constitué d'une ou de plusieurs diodes, convertit cette énergie RF en énergie électrique continue et la transmet à son tour à la charge résistive  $R_L$ . Toutefois, le redresseur génère en plus de l'énergie DC, des harmoniques d'ordre supérieur qui sont indésirables. La rectenna contient aussi deux filtres HF et DC, situés de part et d'autre du redresseur. Le filtre HF à l'entrée est un filtre passe bas, il remplit deux fonctions. Il filtre les harmoniques générées par les diodes pour les empêcher d'être rayonnées par l'antenne et il assure une adaptation conjuguée entre l'antenne et le circuit de conversion pour un transfert maximum de puissance entre les deux. Pour ce qui est du filtre de sortie DC, c'est un filtre passe bas qui bloque toutes les composantes RF, y compris la composante fondamentale, et ne laisse passer que la composante DC vers la charge. La charge résistive à l'autre bout de la rectenna modélise généralement l'impédance d'entrée du dispositif à alimenter [27].

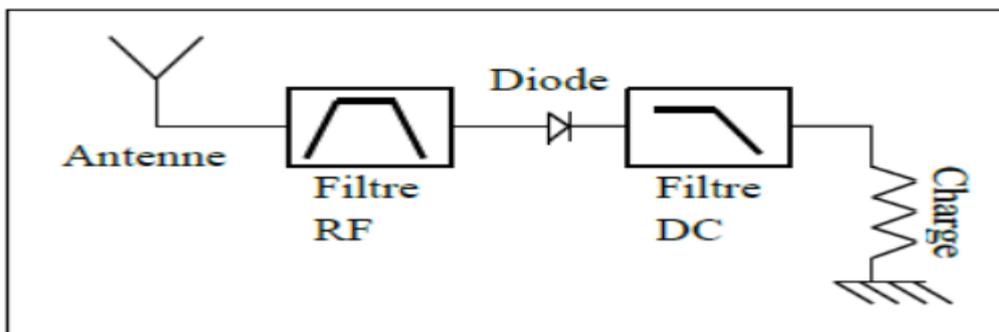
### II.8.3. Topologies de circuit de conversion RF-DC

Plusieurs topologies de convertisseurs RF-DC ont été développées en fonction du nombre de diodes et de l'emplacement de la (ou des) diode(s).

#### II.8.3.1. Topologie série

Dans cette configuration, présentée à la figure II.14, la diode est placée entre le filtre RF et le filtre DC.

L'avantage de cette topologie est essentiellement lié à la facilité de réalisation et permet la récupération de faibles niveaux de puissances (il y a moins de composants et par conséquent moins de pertes).



*Figure II - 14 : Topologie de la rectenna mono diode série*

### II.8.3.2. Topologie parallèle

Dans cette configuration, la diode est placée en parallèle entre les deux blocs de filtrage comme le décrit la figure II.15. Cette topologie permet aussi la récupération de faibles niveaux de puissances, pour la même raison que la topologie série, avec des rendements élevés. L'anode ou la cathode de la diode est connectée à la masse.

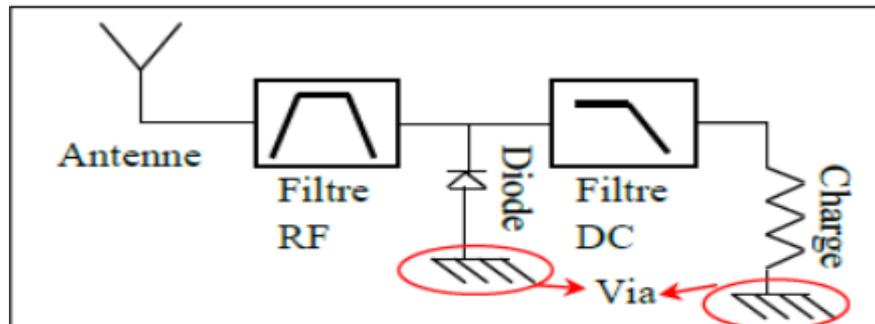


Figure II - 15 : Topologie de la rectenna mono diode en parallèle

### II.8.3.3. Topologie en doubleur de tension

La topologie doubleur de tension (figure II.16) est une association de deux topologies série et parallèle afin de produire une plus forte tension DC en sortie de la rectenna. Ce type de circuits permet, dans le cas de forts signaux, le redressement des deux alternances et par conséquent la tension récupérée est plus élevée que les topologies simples diode (typiquement 24 V pour une puissance de 10 dBm à l'entrée du convertisseur RF-DC et une charge de 1 K $\Omega$ ).

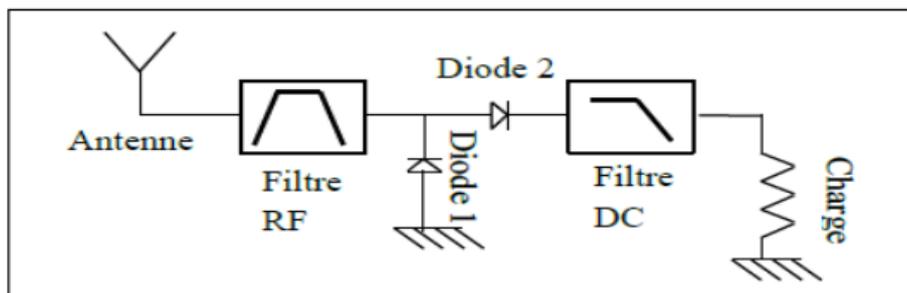


Figure II - 16 : Topologie de la rectenna en doubleur de tension

### II.8.3.4. Topologie multi-diodes

Plusieurs autres topologies ont été développées dans le but d'augmenter la tension de sortie aux bornes de la rectenna tels que le pont de diodes ou les multiplieurs.

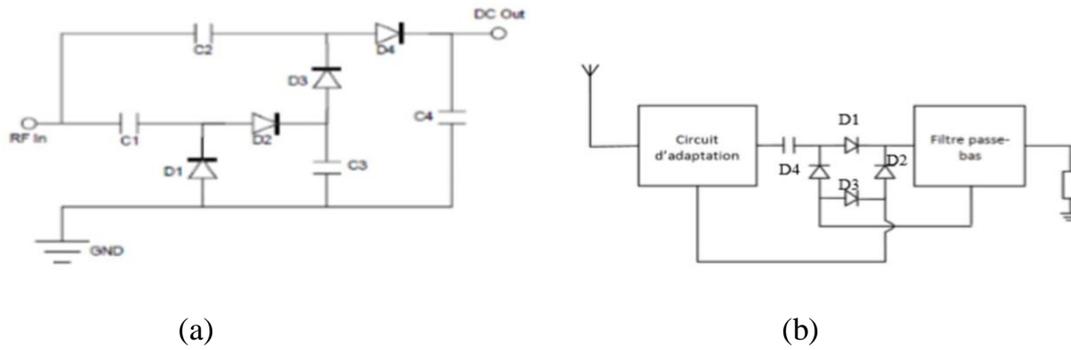


Figure II - 17 : Topologie a) multiplieur et b) pont de diodes

**II.8.4. Efficacité de conversion RF-DC**

L'efficacité de conversion du circuit redresseur est exprimée par le rapport entre la puissance DC en sortie et la puissance RF en entrée.

$$\eta(\%) = 100 \cdot \frac{P_{DC}}{P_{RF}} \quad \text{II.1}$$

Où  $P_{DC}$  désigne la puissance DC récupérée et  $P_{RF}$  la puissance RF injectée directement à l'entrée du redresseur.

Avec ;

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC} = \frac{V_{DC}^2}{R} \quad \text{II.2}$$

$$P_{RF} = \frac{1}{2} R (U_{RF} I_{RF}^*) \quad \text{II.3}$$

$U_{RF}$  : Valeur complexe de la tension sinusoïdale d'entrée.

$V_{DC}$  : Tension DC du signal de sortie.

$I_{RF}^*$  : Valeur complexe conjuguée de l'intensité sinusoïdale d'entrée.

$I_{DC}$  : Intensité du signal de sortie.

$R$  : Valeur de la charge.

**II.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté, dans un premier temps la récolte d'énergie, le principe de la transmission d'énergie sans fil ainsi que les techniques existantes de récupération d'énergie électromagnétique. Dans un deuxième temps, nous avons présenté les antennes imprimées et leurs caractéristiques. Par la suite nous avons présenté les différentes topologies de convertisseurs RF-DC.

---

**CHAPITRE III : Conception et simulation de circuit  
rectenna**

---

### III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude, la simulation et la conception d'un dispositif de récupération d'énergie électromagnétique multi-bandes fonctionnant dans les gammes de fréquences 5G.

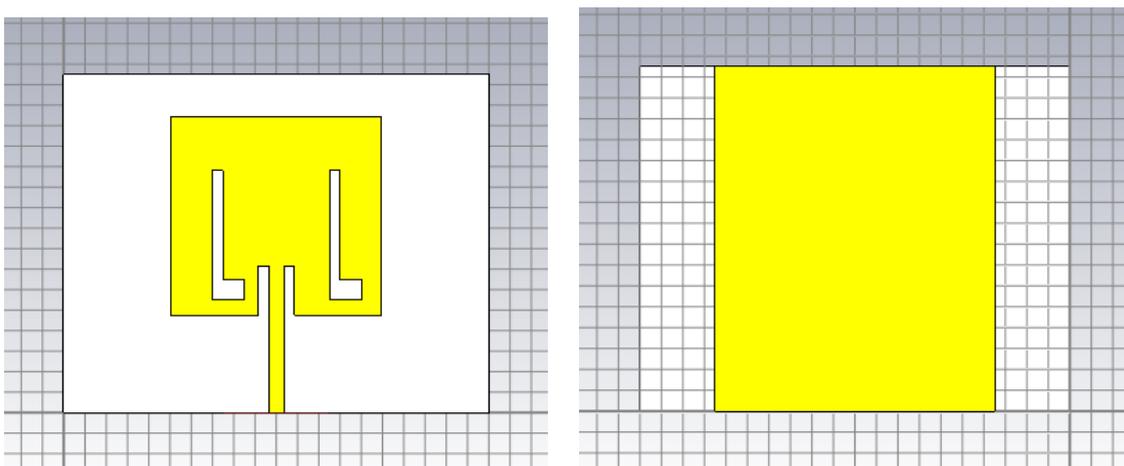
Dans de ce chapitre, nous présenterons dans un premier temps la conception et l'optimisation d'une antenne 5G multi-bandes conçue avec le logiciel CST. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à l'étude et à la conception de deux circuits de conversion RF-DC en utilisant le logiciel ADS avec la méthode de simulation non-linéaire Harmonic Balance (HB). Nous présenterons donc la méthodologie de conception que nous avons mise en place, puis exploitée toute au long de ce travail, ainsi que les résultats de simulations obtenus des deux circuits de conversion simulés et conçus.

### III.2. Conception d'une antenne patch 5G multi-bandes [10 - 28 - 38] GHz

#### III.2.1 Structure de l'antenne

L'antenne tri-bandes est conçue en technologie micro-ruban, elle est dimensionnée pour fonctionner aux fréquences 10, 28 et 38 GHz de façon à augmenter la quantité d'énergie RF recueillie. Les **figures III.1** et **III.2** montrent la géométrie de cette antenne. Elle est composée de deux fentes en forme de L situées sur la face avant de la structure. Le substrat utilisé est le Rogers RT Duroid 5880 ( $\epsilon_r = 2,2$ ,  $\tan \delta = 0,0009$ ) de 0,508 mm d'épaisseur.

Le **tableau III.1** montre les dimensions optimisées de l'antenne tri-bande conçue.



*Figure III - 1 : Structure de l'antenne conçue (a) Vue de dessus (b) Vue de dessous*

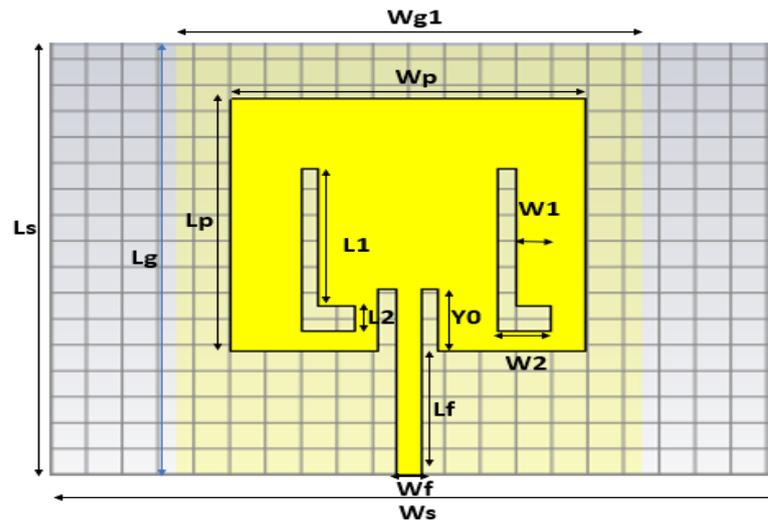


Figure III - 2 : Paramètres de l'antenne conçue

Tableau III - 1 : Dimensions de l'antenne patch conçue

Paramètres	$W_s$	$L_s=L_g$	$W_{g1}$	$W_p$	$L_p$	$Y_0$
Valeur (mm)	20	16.5	13	9.9	9.7	2.4
Paramètres	$W_f$	$L_f$	$W_1$	$L_1$	$W_2$	$L_2$
Valeur (mm)	0.7	4.75	0.5	5.3	1.5	1

### III.2.2 Résultats obtenus avec le logiciel CST Microwave Studio

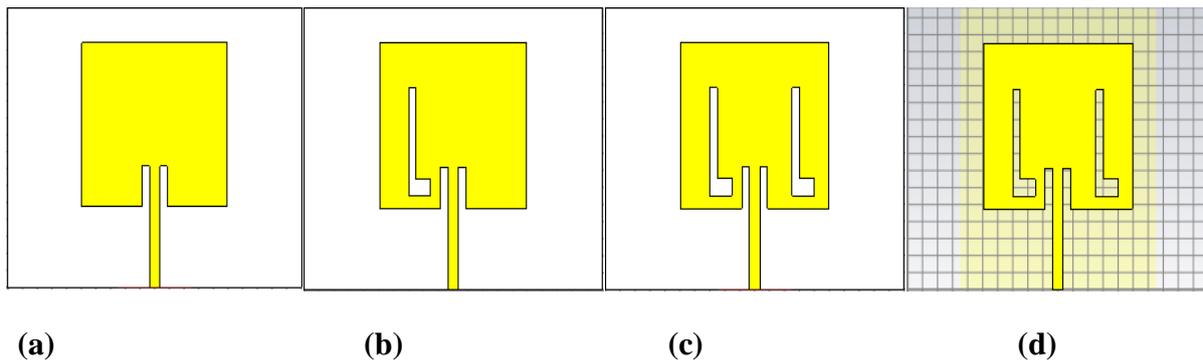
La **figure III.3** montre les étapes de conception de l'antenne finale conçue.

Initialement une antenne patch rectangulaire conventionnelle a été conçue pour fonctionner sur trois bandes de fréquences de fonctionnement différentes, à savoir 10 GHz, 28 GHz et 38 GHz. Il y avait, cependant, de nombreuses bandes de fréquences indésirables près des bandes attribuées. Pour supprimer ces indésirables bandes, une fente en forme de L, est d'abord créée dans l'élément rayonnant, **figure III. 3** (b). Une autre fente en forme de L est ensuite ajoutée, **Figure III. 3** (c), enfin, le plan de masse est supprimé partiellement comme le montre la **figure III. 3** (d) pour améliorer encore la bande passante à chaque résonance et pour augmenter encore la perte de retour pour une meilleure adaptation d'impédance.

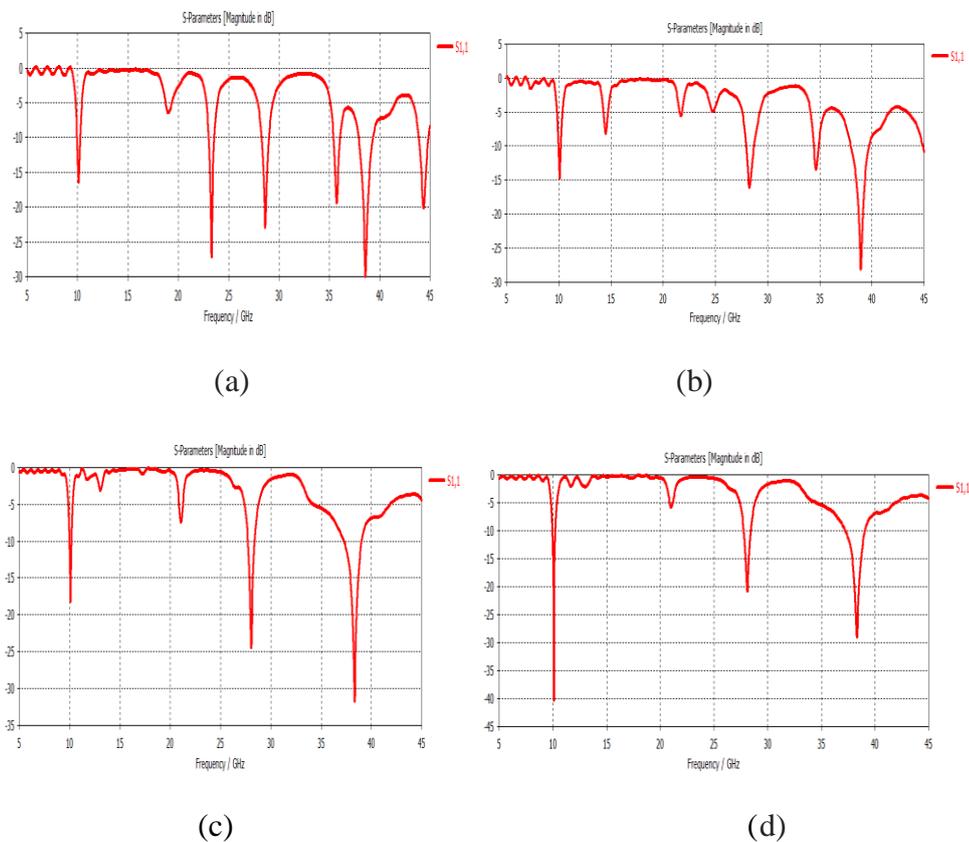
## CHAPITRE III : Simulation et conception de circuit rectenna

Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  est le paramètre qui préoccupe le plus les concepteurs des antennes imprimées. La **figure III. 4** illustre la variation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  à l'entrée de l'antenne en fonction de la fréquence, à chaque étape de la conception.

Nous avons une bonne adaptation aux trois fréquences de résonance. Nous relevons une adaptation de 16 dB pour la fréquence de 10 GHz, de 27 dB pour la fréquence de 28 GHz et une adaptation de 19 dB pour la fréquence de 38 GHz.



**Figure III - 3 : étapes de conception de l'antenne conçue.**



**Figure III - 4 : Coefficient de réflexion simulé de l'antenne dans les différentes étapes du développement de la conception.**

### III.3 Etudes paramétriques (effet des paramètres géométriques)

Nous allons voir maintenant l'étude de l'influence de différents paramètres sur le coefficient de réflexion S11. Cette étude paramétrique a pour but de comprendre les effets des divers paramètres afin de les optimiser et d'aboutir à une structure finale efficace.

#### III.3.1. Effet du paramètre W2 de la fente

On présente d'abord les résultats de simulation de l'effet du paramètre W2 de la fente. La **figure III.5** montre les résultats de la simulation du paramètre S11 de l'antenne pour différentes valeurs de W2 en gardant les valeurs des autres paramètres fixes. Nous pouvons constater clairement l'amélioration de l'adaptation avec la variation de W2 (mm).

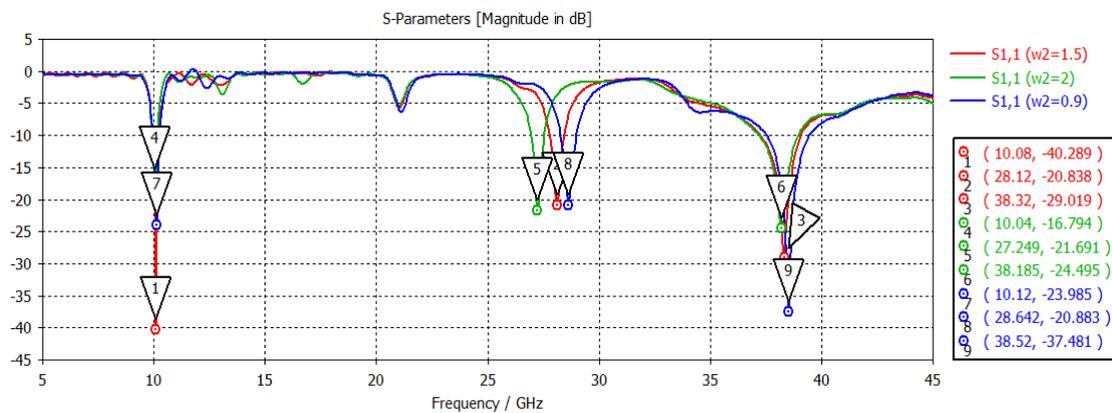


Figure III - 5 : Représentation du coefficient de réflexion en fonction du paramètre W2 de la fente

#### III.3.2. Effet du paramètre W1 de la fente

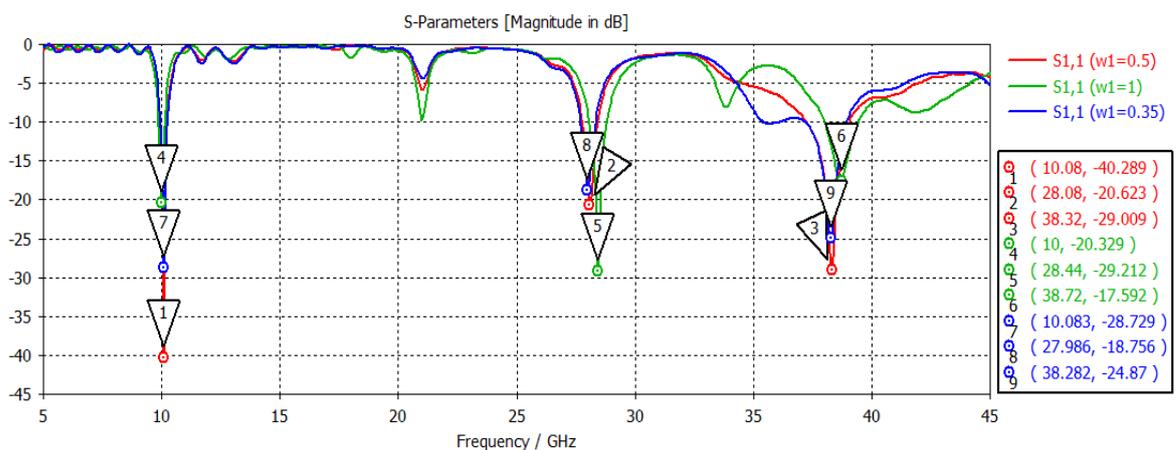
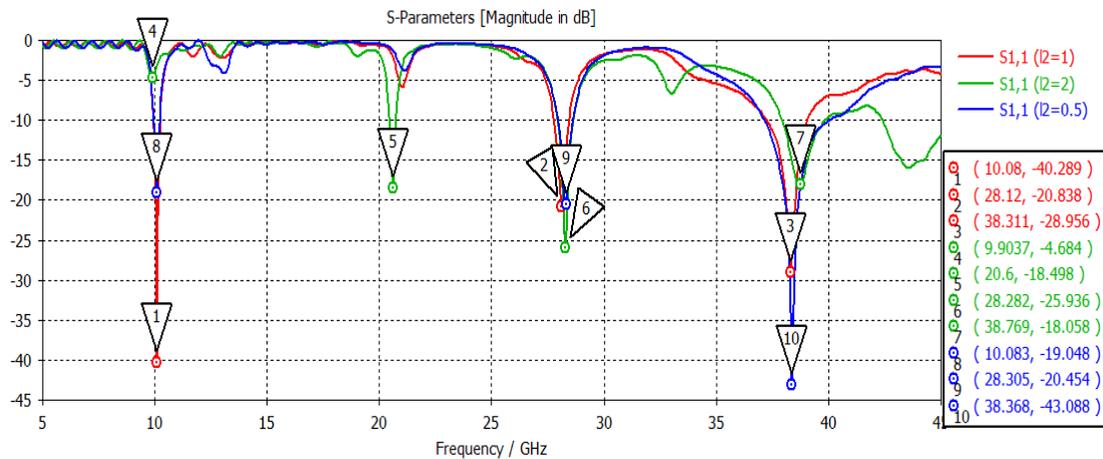


Figure III - 6 : Représentation du coefficient de réflexion en fonction du paramètre W1 de la fente

### III.3.3. Effet du paramètre L2 de la fente

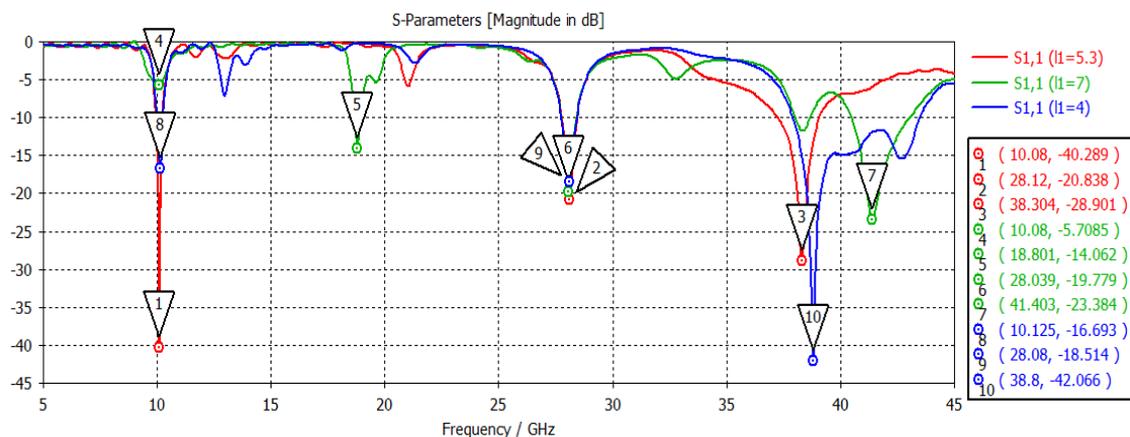
Le coefficient de réflexion pour les différentes valeurs de L2 est présenté dans la **Figure III-7**. Nous constatons que ce paramètre a une grande influence sur l'adaptation de l'antenne.



**Figure III - 7 :** Représentation du coefficient de réflexion en fonction du paramètre L2 de la fente

### III.3.4. Effet du paramètre L1 de la fente

La **Figure III. 8** montres l'étude d'un autre paramètre de la structure qui est la longueur de la fente. Nous pouvons constater aussi l'influence de ce paramètre sur l'adaptation.



**Figure III - 8 :** Représentation du coefficient de réflexion en fonction du paramètre L1 de la fente

### III.3.5. Effet du paramètre Wg1 de plan de masse

Le premier paramètre relié au plan de masse est sa largeur Wg1. Comme la montre la **Figure III,9**, nous remarquons également que les performances de l'antenne en termes de coefficient de réflexion dépendent de la longueur Wg1 du plan de masse.

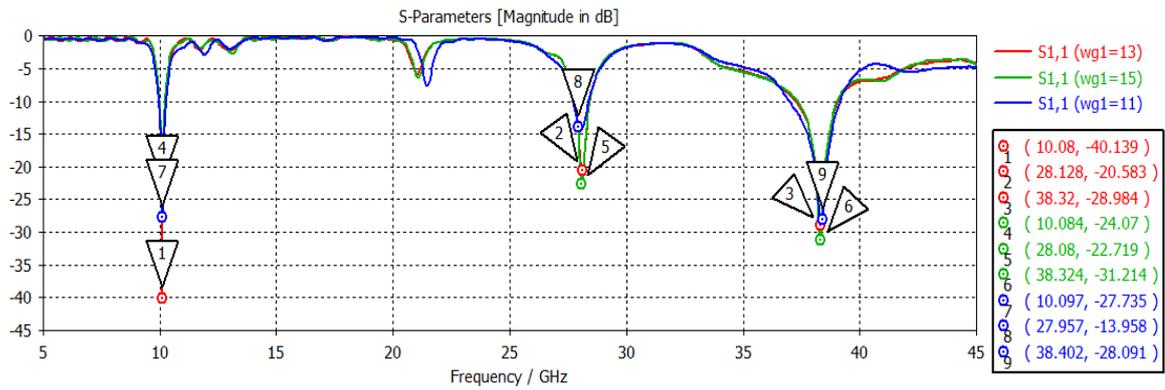


Figure III - 9 : Représentation du coefficient de réflexion en fonction du paramètre Wg1 de plan de masse

### III.4 Performances de l'antenne optimisée

Nous présentons maintenant les résultats de simulation de l'antenne optimisée pour un fonctionnement tri-bandes. Les dimensions optimales relatives à l'antenne sont quant à elles détaillées dans le **tableau III.1**.

La **figure III.10** montre la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence de l'antenne optimisée. On observe que le coefficient de réflexion S<sub>11</sub> est de -40.139 dB à la fréquence 10.08 GHz, de -20.818 dB à la fréquence 28.12 GHz, et de -28.984 à la fréquence 38.32 GHz. La variation de S<sub>11</sub> simulé en fonction de la fréquence montre que cette structure possède trois fréquences de résonance : 10 GHz, 28 GHz et 38 GHz.

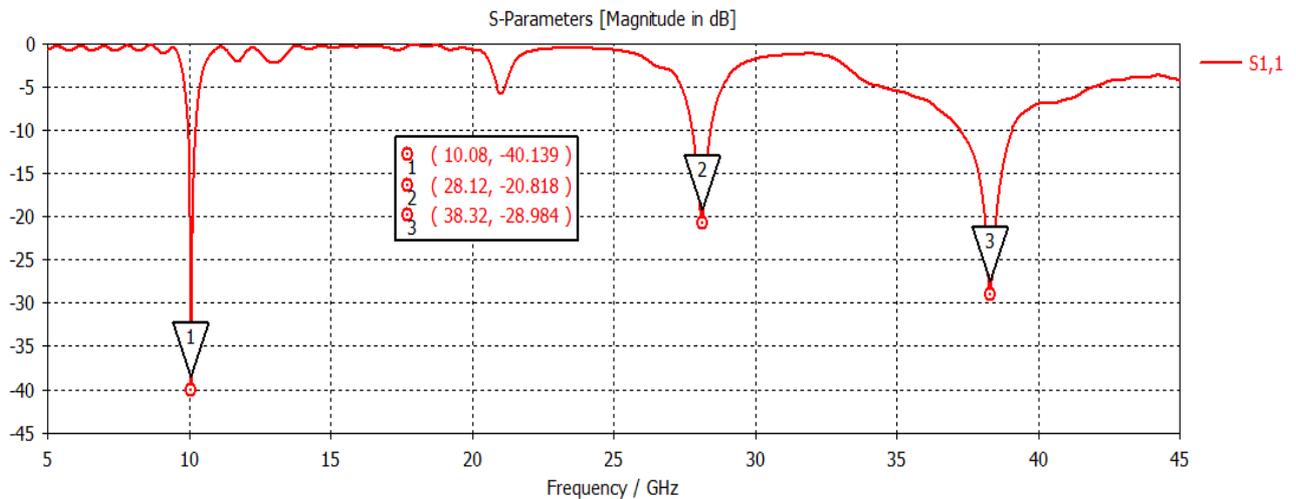
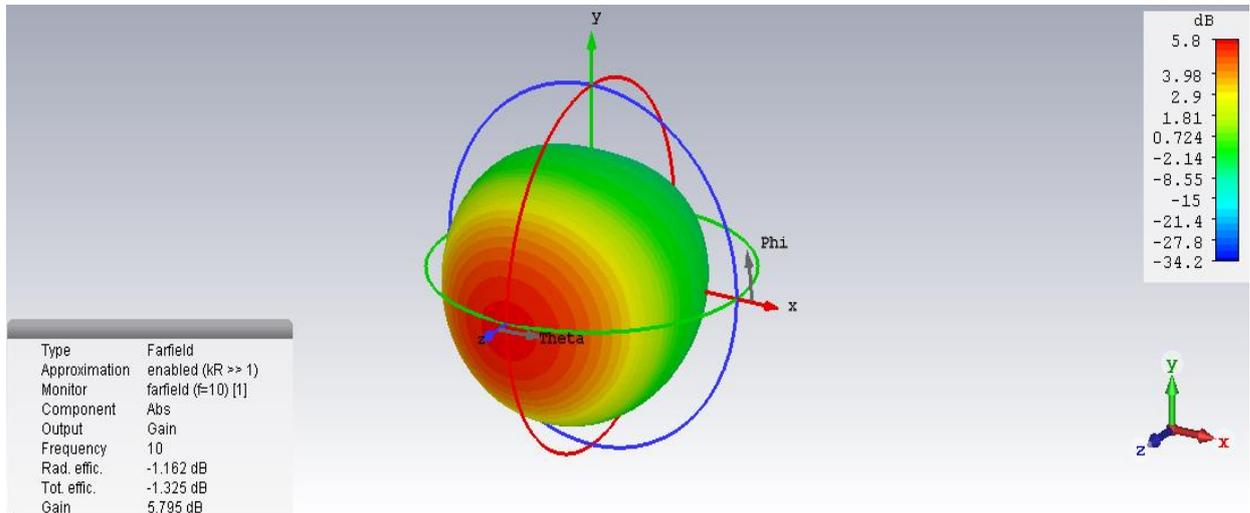


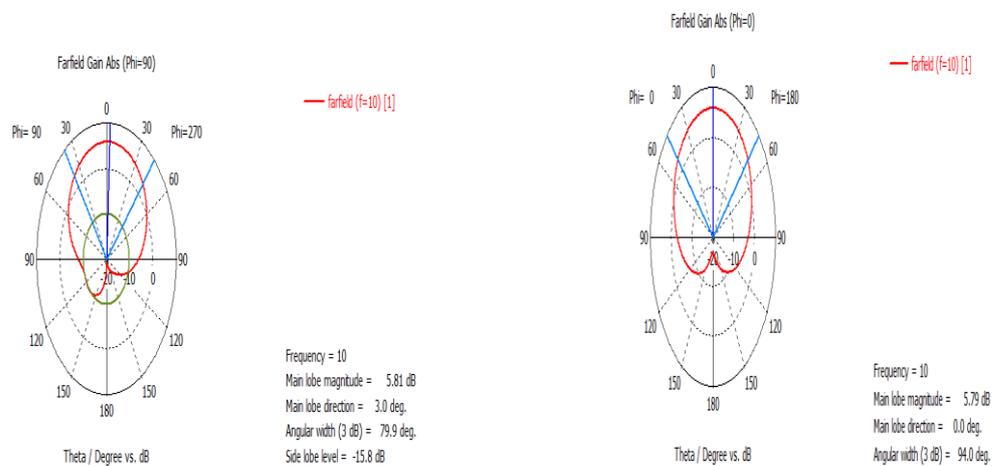
Figure III - 10 : Représentation du coefficient de réflexion

III.4.1. Diagramme de rayonnement

Nous présentons maintenant les caractéristiques de rayonnement de l'antenne conçue. Nous montrons dans les **Figures III.11 à III.13** les diagrammes de rayonnement simulés pour les trois fréquences de résonance.



(a)



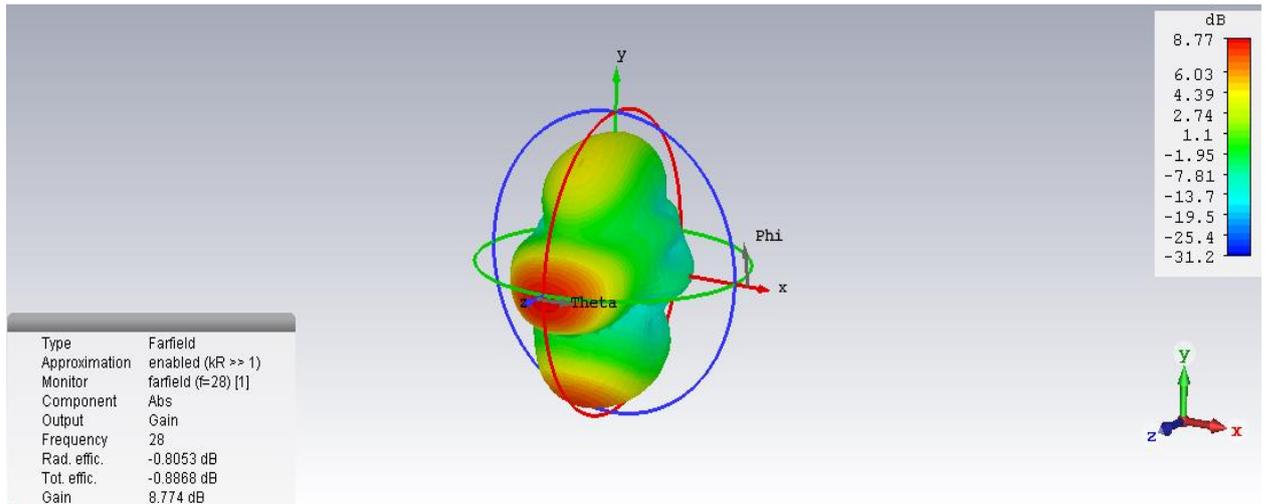
(b)

(c)

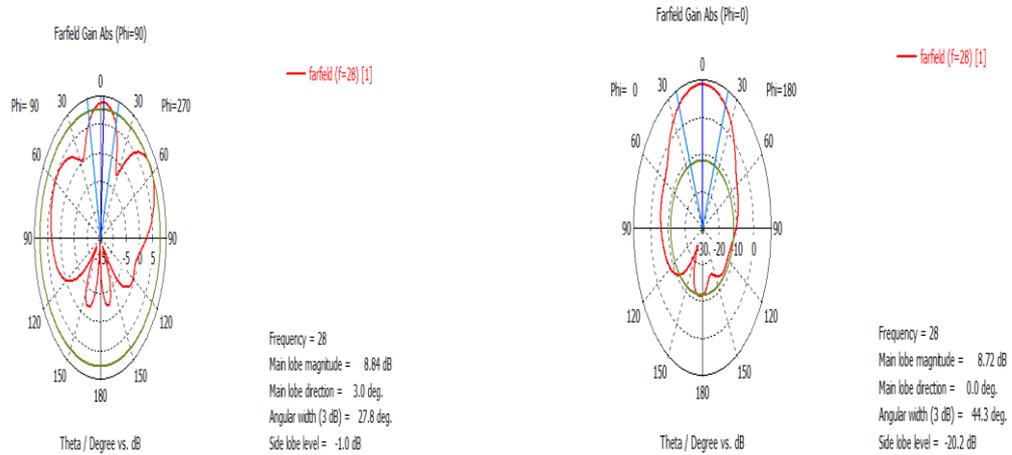
**Figure III - 11 : Diagramme de rayonnement à 10 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire (phi=90) (c) plan polaire (phi=0)**

### CHAPITRE III : Simulation et conception de circuit rectenna

Le plan	Plan 3D	Plan polaire (phi=90)	Plan polaire (phi=0)
Résultat de Gain	5.8 dB	5.81 dB	5.79 dB



(a)



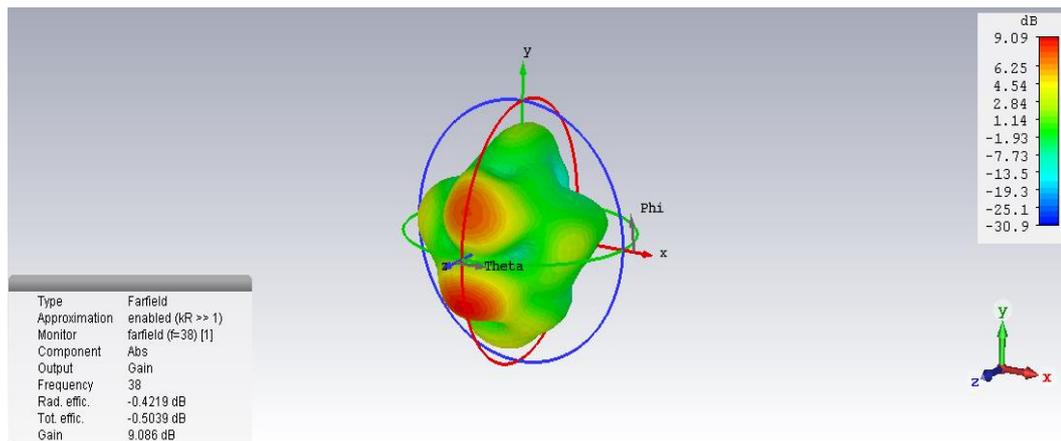
(b)

(c)

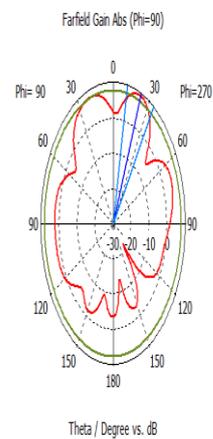
Figure III - 12 : Diagramme de rayonnement à 28 GHz (a) plan 3D (b) plan polaire (phi=90) (c) plan polaire (phi=0)

## CHAPITRE III : Simulation et conception de circuit rectenna

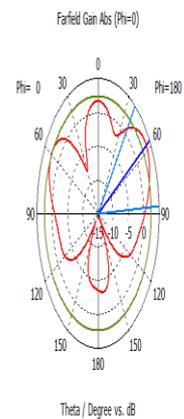
Le plan	Plan 3D	Plan polaire (phi=90)	Plan polaire (phi=0)
Résultat de Gain	8.77 dB	8.84 dB	8.72 dB



(a)



(b)



(c)

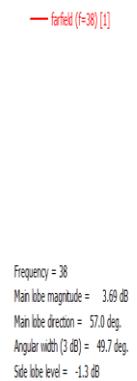
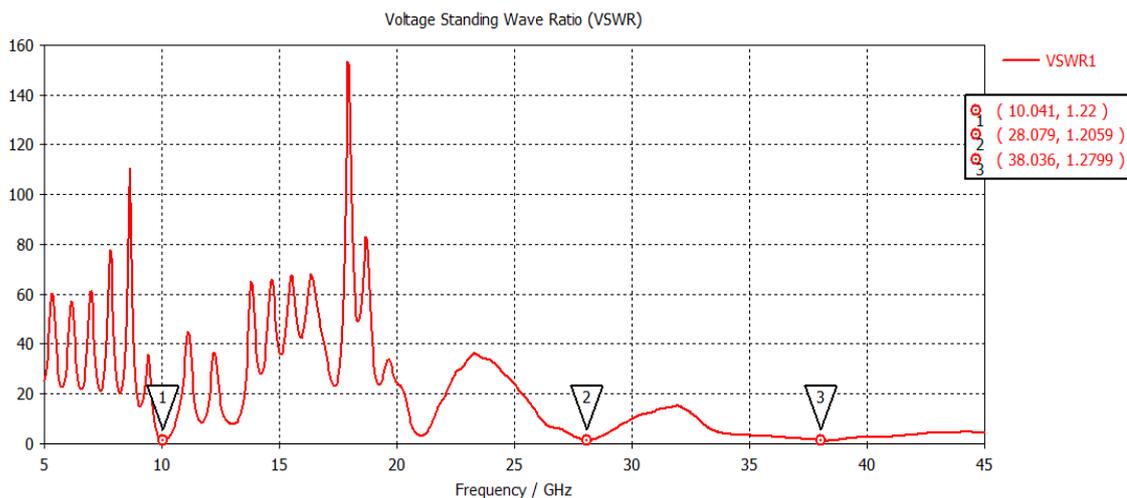


Figure III - 13 : Diagramme de rayonnement à 38 GHz (a) plan 3D(b) plan polaire (phi=90) (c) plan polaire (phi=0)

Le plan	Plan 3D	Plan polaire (phi=90)	Plan polaire (phi=0)
Résultat de Gain	9.09 dB	9.19 dB	3.69 dB

**III.4.2. Rapport d'onde stationnaire (ROS)**

La **figure III.14** représente le rapport d'onde stationnaire (ROS) en fonction de la fréquence. Le VSWR est égal à 1.22 à la fréquence 10 GHz et 1.2059 à la fréquence 28 GHz et 1.2799 à la fréquence 38 GHz ce qui montre que l’antenne est bien adaptée à ces fréquences de résonances [10-28-38] GHz.



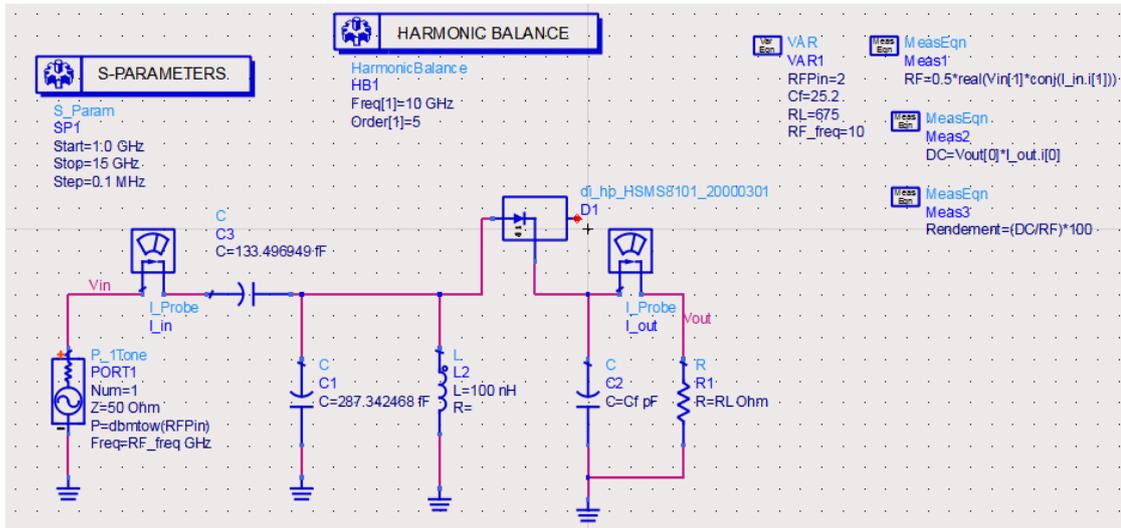
**Figure III - 14 : Résultat du VSWR à la fréquence  $f=10$  GHz et à  $f=28$  GHz et  $f=38$  GHz**

**III.5 Conception de Circuits de conversion RF-DC**

Nous présentons dans cette partie de ce chapitre, la conception et l’optimisation de deux circuits de récupération et de conversion d’énergie RF-DC. Nous présentons dans un premier temps une topologie de circuits de conversion mono-bande fonctionnant à la fréquence 10 GHz. Dans un second temps, nous présentons une autre topologie de circuits de conversion. Cette topologie bi-bande fonctionne à deux fréquences de résonance 10 GHz et 28 GHz. Nous avons utilisé le logiciel ADS “Advanced Design System” pour la simulation de ces circuits.

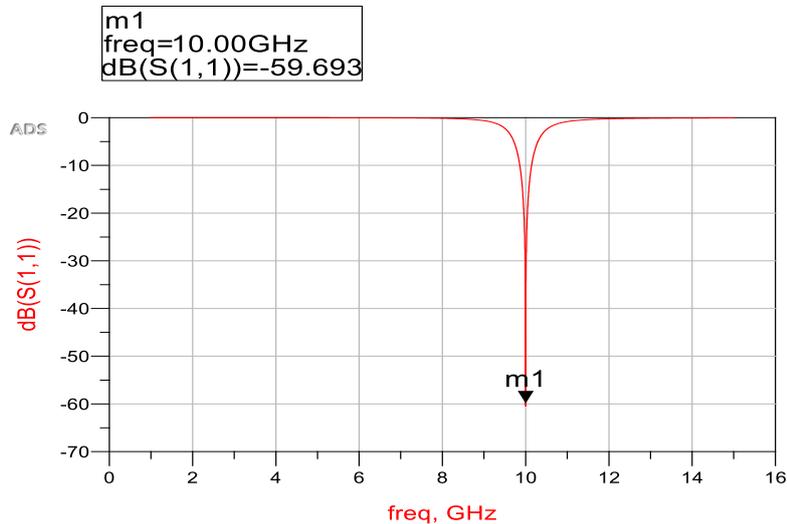
**III .5.1 Étude et conception du circuit de conversion fonctionnant à la fréquence 10GHz**

La **figure III.15** montre le schéma du circuit de conversion RF-DC conçu pour la récupération d'énergie RF à la fréquence 10 GHz. Ce circuit est constitué d'une diode de Schottky de type HSMS8101, d'une capacité de filtrage et d'une résistance de charge RL. Nous avons utilisé un circuit d'adaptation à éléments localisés pour adapter le circuit de conversion au générateur.



**Figure III - 15 : Schéma du circuit de conversion**

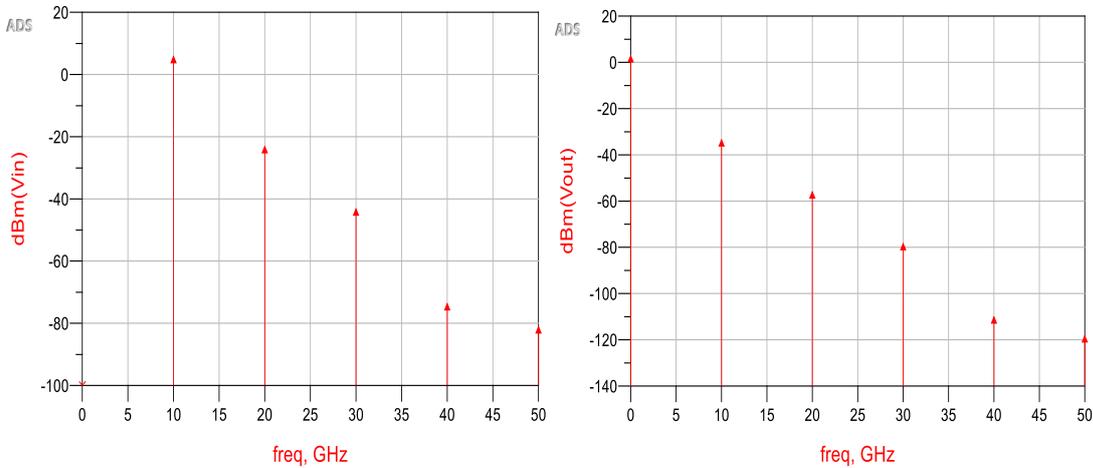
La **figure III-16** montre le coefficient de réflexion (S11) en fonction de la fréquence. Nous avons une bonne adaptation du circuit de conversion à la fréquence 10 GHz.



**Figure III - 16 : Représentation du coefficient de réflexion (S11).**

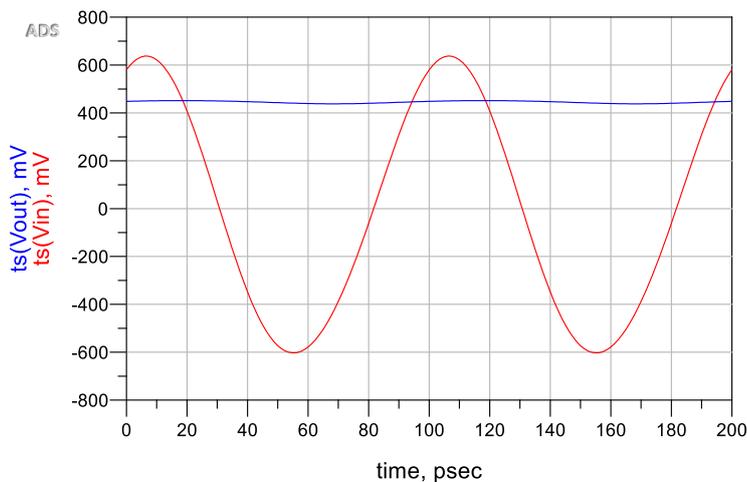
Les spectres du signal appliqué à l'entrée et celui du signal obtenu à la sortie du circuit de conversion sont représentés sur la **figure III-17**. L'harmonique fondamentale à la fréquence 10

GHz du signal d'entrée est la plus grande, alors qu'à la sortie du circuit de conversion, nous observons que le signal continu est le plus grand.



**Figure III - 17 : Spectre des signaux d'entrée et de sortie du circuit de conversion**

La **Figure III-18** montre la variation de la tension d'entrée et de sortie au fil du temps, du circuit de conversion. La tension de sortie continue obtenue est d'environ 0.445 V.



**Figure III - 18 : Allures temporelles du signal d'entrée et de sortie du circuit de conversion**

### III.5.1.1 Influence de la charge RL

Sur les deux courbes (a) et (b) de la **figure III-19**, nous remarquons une augmentation du rendement et de la tension de sortie pour des valeurs de la charge RL ascendantes qui augmentent de 100 à 800 Ohm.

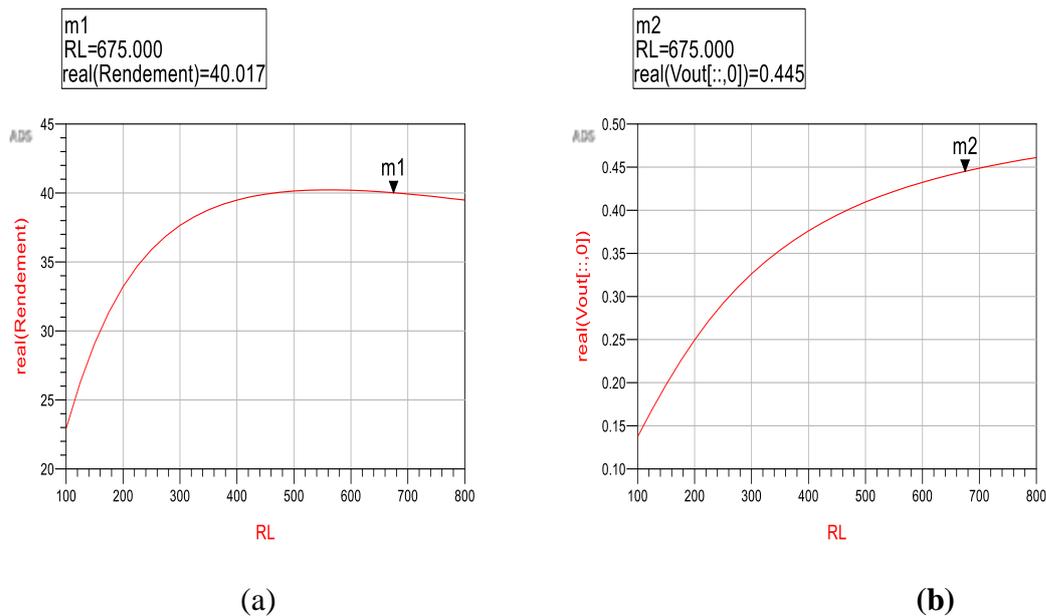


Figure III - 19 : Représentation du rendement et de la tension de sortie en fonction de la charge RL

### III.5.1.2 Influence de la capacité de filtrage

Nous remarquons sur les deux courbes (a) et (b) de la figure III-20 une augmentation du rendement et de la tension de sortie pour des valeurs de capacité ascendantes qui augmentent de 7 pF à 30 pF.

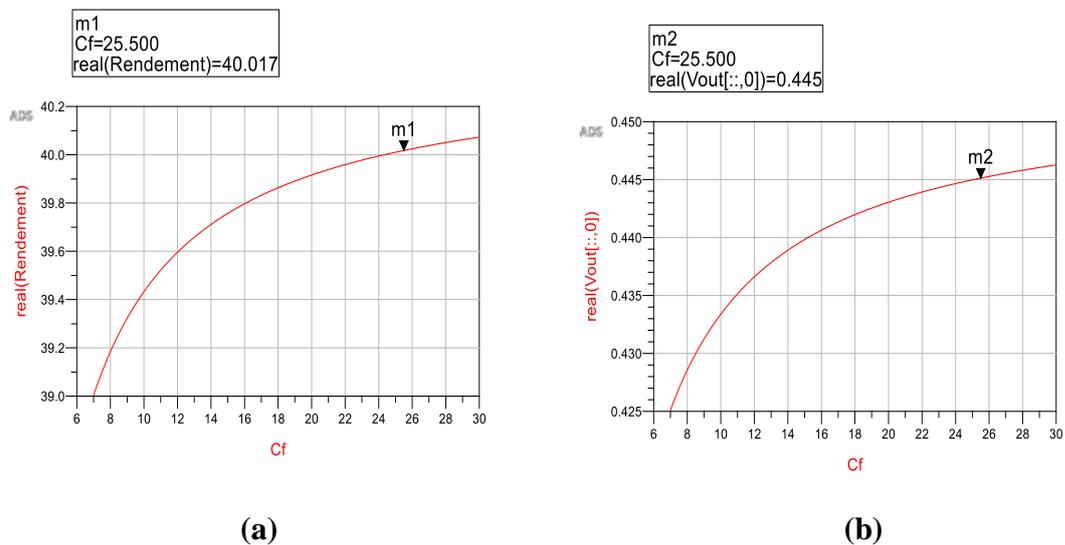
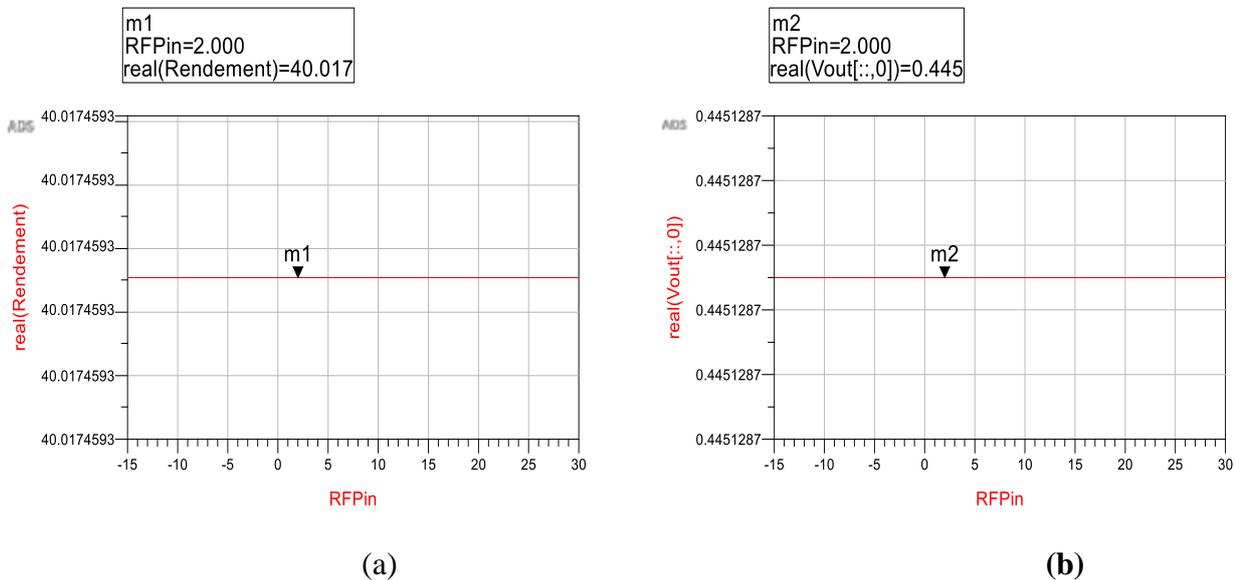


Figure III - 20: Représentation du rendement et de la tension de sortie en fonction de la capacité de filtrage

### III.5.1.3 Influence de la puissance RF d'entrée

Dans les deux courbes de la **figure III.21**, nous remarquons que le rendement et la tension de sortie sont toujours stables pour toutes les valeurs de la puissance d'entrée.



**Figure III - 21 : Représentation du rendement et de la tension de sortie en fonction de la puissance d'entrée**

### III.5.2 Étude et conception du circuit de conversion bi-bande

Ce redresseur est constitué d'une diode HSMS8101 et utilise un circuit d'adaptation d'impédance composé d'un stub en circuit ouvert ( $W1 = 8.03$  mm,  $L1 = 4.727686$  mm) et d'une ligne ( $W2 = 15.6237058$  mm,  $L2 = 3.527544$  mm). La valeur de la capacité de filtrage est de 60 pf et celle de la résistance de charge  $R_L$  est de 100 Ohm. **La figure III.22** présente le schéma de simulation sous ADS de ce circuit redresseur. La méthode Harmonic Balance (HB) est utilisée. Cette méthode permet de tenir compte des non-linéarités présentes dans le circuit.

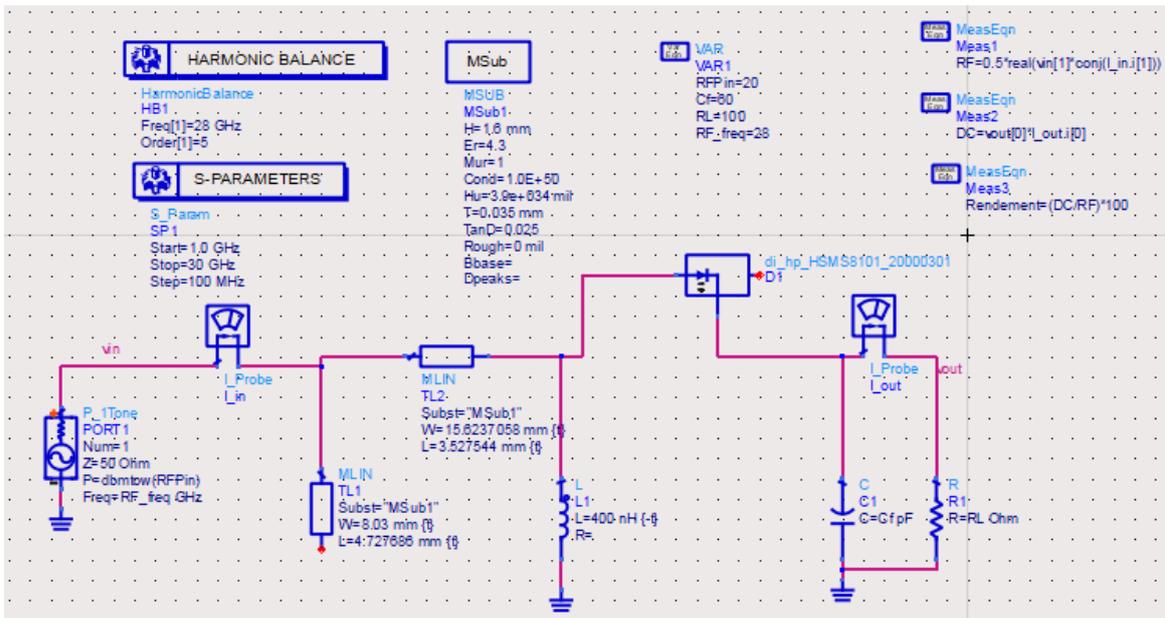


Figure III - 22 : Schéma du circuit de conversion

La figure III-23 montre le coefficient de réflexion (S11) en fonction de la fréquence. Nous avons une bonne adaptation du circuit de conversion aux fréquences 27.90 et 9.900 GHz.

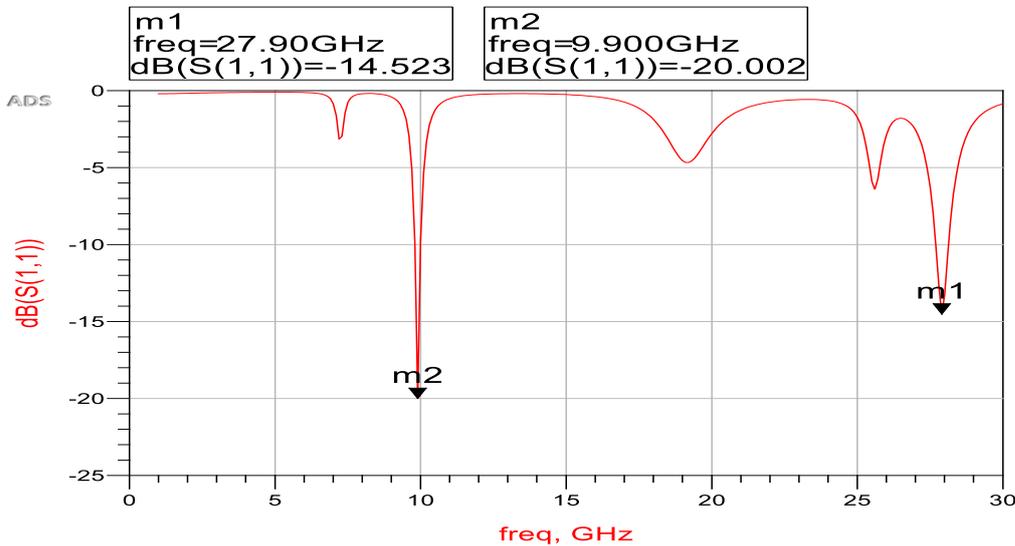


Figure III - 23 : Représentation du coefficient de réflexion (S11).

Les spectres du signal appliqué à l'entrée et celui du signal obtenu à la sortie du circuit de conversion sont représentés sur la figure III.24. L'harmonique fondamentale à la fréquence 28 GHz du signal d'entrée est la plus grande, alors qu'à la sortie du circuit de conversion, nous observons que le signal continu est le plus grand.

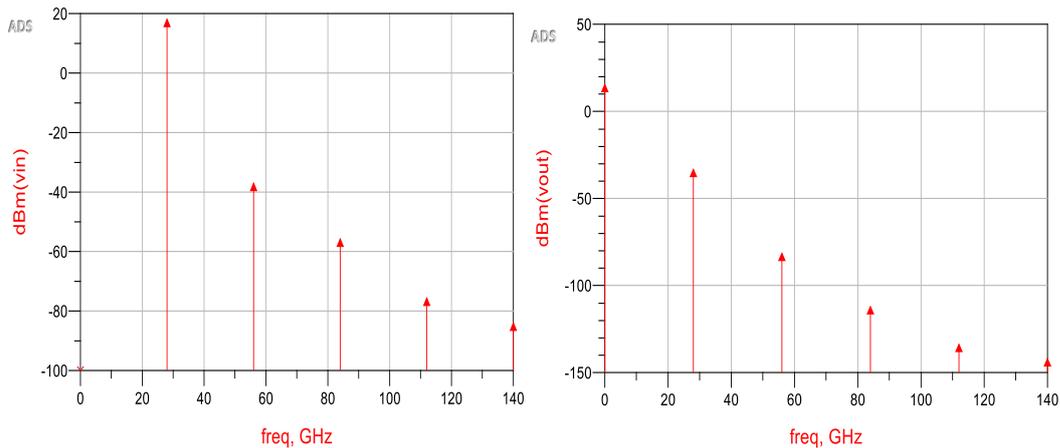


Figure III - 24 : Spectre des signaux d'entrée et de sortie du circuit de conversion

La Figure III.25 montre la variation de la tension d'entrée et de sortie au fil du temps, du circuit de conversion. La tension de sortie continue obtenue est d'environ 1.9 V.

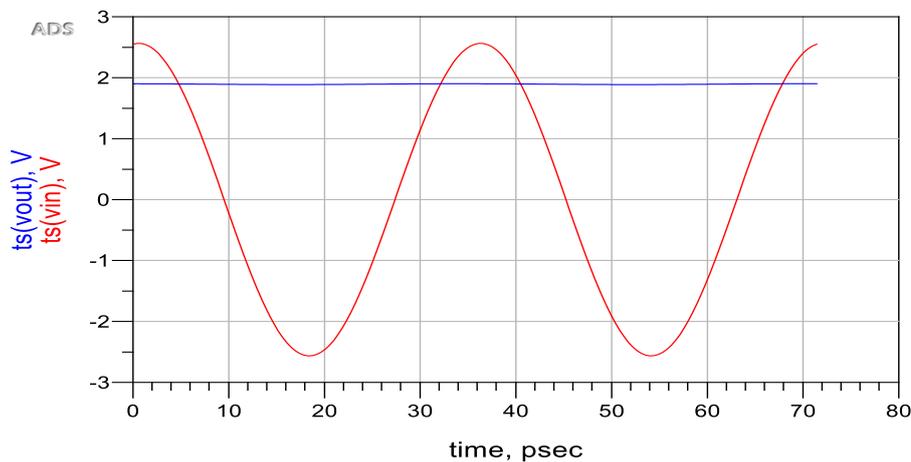
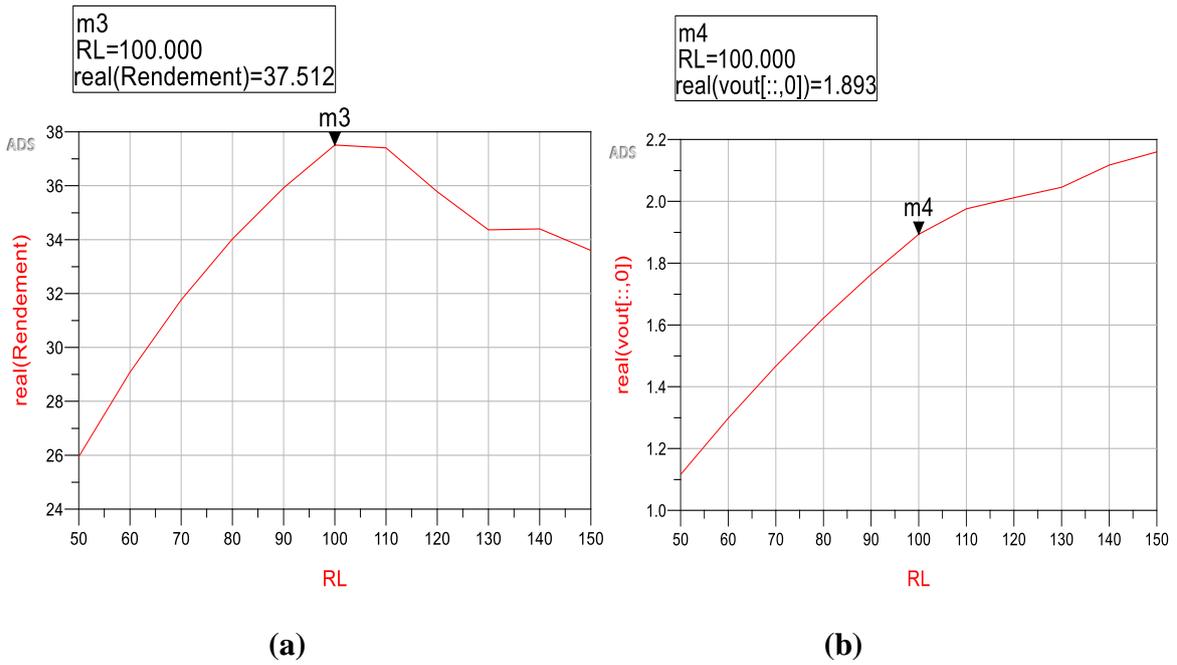


Figure III - 25 : Allures temporelles du signal d'entrée et de sortie du circuit de conversion

### III.5.2.1 Influence de la charge RL

Sur la courbe (a) de la figure III.26, nous remarquons une augmentation du rendement pour des valeurs de la charge RL ascendantes qui augmentent de 50 jusqu'à 100 Ohm.

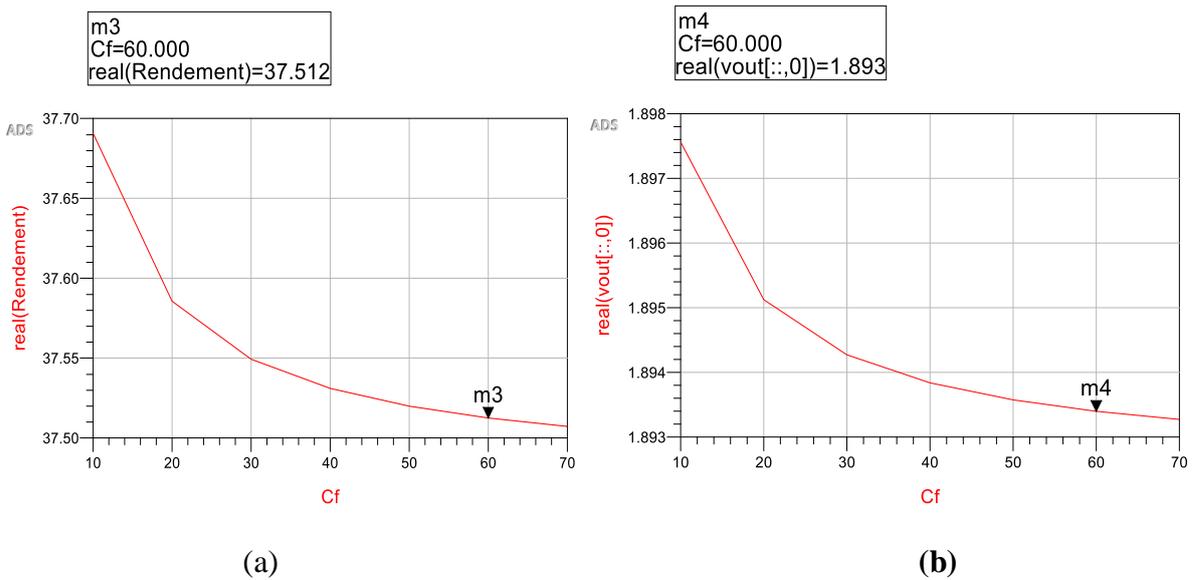
Sur la courbe (b) de la figure III.26 nous remarquons une augmentation de la tension de sortie pour des valeurs de la charge RL ascendantes qui augmentent de 100 à 150 Ohm.



**Figure III - 26 : Représentation du rendement et de la tension de sortie en fonction de la charge RL**

**III.5.2.2 Influence de la capacité de filtrage**

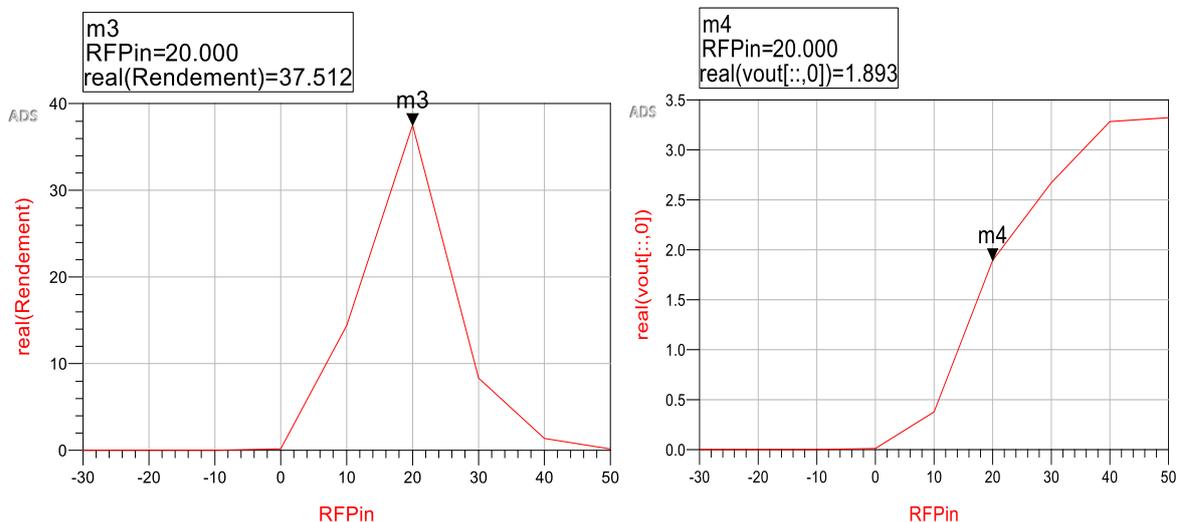
Nous remarquons sur les deux courbes (a) et (b) de la figure III.27 une diminution du rendement et de la tension de sortie pour des valeurs de capacité ascendantes qui augmentent de 10 pF à 70 pF.



**Figure III - 27 : Représentation du rendement et de la tension de sortie en fonction de la capacité de filtrage**

### III.5.2.3 Influence de la puissance RF d'entrée

L'influence de la puissance RF d'entrée sur le rendement et sur la tension de sortie est représentée sur la figure III.28.



*Figure III - 28 : Représentation du rendement et de la tension de sortie en fonction de la puissance d'entrée*

Nous remarquons que le rendement croît pour des faibles niveaux de puissance RF d'entrée, ensuite il décroît pour des niveaux de puissance supérieurs. Nous observons aussi que la tension de sortie croît en fonction de la puissance appliquée à l'entrée.

### III .6 Conclusion

La phase de conception et caractérisation d'une antenne, à l'aide d'un logiciel adapté, est une étape incontournable dans un souci de gain de temps et d'optimisation de structure aux paramètres désirés. Bien qu'elles présentent des géométries simples, les antennes imprimées exigent des études approfondies théoriques et numériques pour la conception d'antennes performantes.

Dans la première partie de ce chapitre, une étude numérique a été présentée. Le logiciel CST studio nous a permis de simuler les performances de l'antenne. Une étude paramétrique a été menée pour comprendre les effets des divers paramètres afin de les d'optimiser et d'aboutir à une structure finale efficace. Les résultats obtenus concernent les caractéristiques les plus importantes de l'antenne, tels que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain et la directivité de l'antenne. Les caractéristiques obtenues pour l'antenne conçue confirment son fonctionnement multi-bandes [10-28-38] GHz.

# *Conclusion générale*

Dans cette conclusion on évoquera les principaux résultats qui ont été présentés durant ce mémoire.

Notre objectif principal dans le cadre de ce mémoire est l'étude, la simulation et la conception d'un dispositif de récupération d'énergie électromagnétique multi-bandes fonctionnant dans les gammes de fréquences 5G.

Le principe c'est l'exploitation de l'énergie perdue des ondes électromagnétiques lors de la transmission d'énergie sans fil, suivie par un convertisseur des signaux radiofréquences (RF) en un signal continu (RF/DC). La puissance récupérée servira à l'alimentation à distance de dispositif électronique (capteurs, véhicule autonome,..) ou elle sera emmagasinée dans un accumulateur.

La phase de conception et caractérisation d'une antenne, à l'aide d'un logiciel adapté, est une étape incontournable dans un souci de gain de temps et d'optimisation de structure aux paramètres désirés. Bien qu'elles présentent des géométries simples, les antennes imprimées exigent des études approfondies théoriques et numériques pour la conception d'antennes performantes.

Dans la première partie de notre travail, une étude numérique a été présentée. Le logiciel CST studio nous a permis de simuler les performances de l'antenne. Une étude paramétrique a été menée pour comprendre les effets des divers paramètres afin de les d'optimiser et d'aboutir à une structure finale efficace. Les résultats obtenus concernent les caractéristiques les plus importantes de l'antenne, tels que le coefficient de réflexion, le diagramme de rayonnement, le gain et la directivité de l'antenne. Les caractéristiques obtenues pour l'antenne conçue confirment son fonctionnement multi-bandes [10-28-38] GHz.

Dans la deuxième partie de notre travail, nous avons étudié et conçu deux circuits de conversion RF-DC, un circuit mono-bande fonctionnant à la fréquence 10 GHz et le deuxième bi-bande fonctionnant aux fréquences 10 GHz et 28 GHz. La simulation a été faite en utilisant le logiciel ADS avec la méthode de simulation non-linéaire Harmonic Balance (HB). Cette simulation a permis de mettre en évidence les effets des différents paramètres du circuit (la capacité de filtrage, la charge et la puissance d'entrée RFPin) sur le rendement et sur la tension de sortie du circuit de conversion. Les résultats qui ressortent de cette étude nous ont permis de faire certains choix et de simplifier le processus d'optimisation.

## *Bibliographie du chapitre I*

[1] A. J. Paulraj; D. A. Gore; R. U. Nabar and H. Bölcskei. «An Overview of MIMO Communications-A Key to Gigabit wireless». PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 92, NO. 2, Février 2004.

[2] [www.cigref.fr](http://www.cigref.fr) 21 av. de Messine, 75008 Paris +33 1 56 59 70 00 [cigref@cigref.fr](mailto:cigref@cigref.fr)

[3] A. Gohil, H. Modi, S. K. Patel « 5g Technology Of Mobile Communication : A Survey » Conférence Internationale Sur Les Systèmes Intelligents Et Le Traitement Du Signal 2013.

[4] [Http://www.Radio-Electronics.Com](http://www.Radio-Electronics.Com).

[5]: J. Rodriguez « Fundamentals Of 5g Mobile Networks » Livre, Institut des Télécommunications, Aveiro, Portugal, 2015.

[6] Shahram ShahbazPanahi, Yindi Jing, in Academic Press Library in Signal Processing, Volume 7, 2018.

[7] W. Xiang, K. Zheng, X. Sherman « 5g Mobile Communications » Livre, 14 octobre 2016.

[8] W. Robert, Heath Jr, Angel Lozano « Five Disruptive Technology Directions For 5g » article IEEE Communications Février 2014.

[9] E. Hossain, M. Rasti, H. Tabassum, A. Abdel Nasser « Evolution towards 5g Multi-Tier Cellular Wireless Networks: An Interference Management Perspective » IEEE Wireless Communications Conférence 17 Feb 2014.

[10] S. Salous, "Multiple Input Multiple Output: capacity and channel measurement", Department of Electronic Engineering and Electronics, UMIST, Manchester, M60, 1QD, UK, August 2003.

[11] C. YANNICK, « Etude paramétrique avancée de canaux SISO et MIMO en environnements complexes : Application au système HiperLAN/2 ». Thèse de Doctorat, l'ENST de Bretagne, Décembre 2005.

[12] N. Hassan, X. Fernando « Massive MIMO Wireless Networks : An Overview Electronics » 2017, 6, 63 ; 5 September 2017.

[13] HAJRI, Salah Eddine. (Thèse de doctorat 2018). L'amélioration des performances des systèmes sans fil 5G par groupements adaptatifs des utilisateurs. Université ParisSaclay.

[14] Adrien GAILLARD. « Évolution du Massive-MIMO ». 17 avr, 2018 [Enligne]. [https://blog.netxp.fr/evolution-du-massive-mimo/?fbclid=IwAR2sgaCY4EEXgml-sNqUeq1Rj2aW5n4axVoACG3Mw6a\\_DnMwuLzr2z22jJo](https://blog.netxp.fr/evolution-du-massive-mimo/?fbclid=IwAR2sgaCY4EEXgml-sNqUeq1Rj2aW5n4axVoACG3Mw6a_DnMwuLzr2z22jJo).

[15] D. Gesbert, M. Kountouris, R.W. Health, C.B. Chae, T. Salzer, " From single-user to Multi-user Communications shifting the MIMO paradigm ", IEEE Signal Processing Magazine, Vol 24, N°5, pp. 36-46, Oct. 2007

[16] V.R. Cadambe, S.A. Jafar, "Interference alignment and spatial degrees of freedom for the K-user interference channel", in: 2008 IEEE Trans. Inf. Theory, volume 54, 8, IEEE, 2008, pp. 3425–3441.

## *Bibliographie du chapitre II*

[1] J. Liu, I. Demirkiran, T. Yang, and A. Helfrick, "Communication schemes for aerospace wireless sensors," in *Digital Avionics Systems Conference, 2008. DASC 2008. IEEE/AIAA 27th*, 2008, pp. 5. D. 4-1-5. D. 4-9.

[2] R. K. Yedavalli and R. K. Belapurkar, "Application of wireless sensor networks to aircraft control and health management systems," *Journal of Control Theory and Applications*, vol. 9, pp. 28-33, 2011

[3] [http://www.sante.gouv.fr/IMG/pdf/ANFR\\_-\\_antennes-terminaux-2.pdf](http://www.sante.gouv.fr/IMG/pdf/ANFR_-_antennes-terminaux-2.pdf)

[4] Kammoun, S.; Pothin, J-P ; Cousin, J-C ; "Principes et challenges de la localisation par Bluetooth", *journées scientifiques 25/26 Mars 2014*, URSI France

[5] <http://www.radiofrquences.gouv.fr/spip.php?article91>

[6] Abderrahim Okba. Conception et réalisation de rectennes utilisées pour la récupération d'énergie électromagnétique pour l'alimentation de réseaux de capteurs sans fils. Electromagnétisme. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. Français. NNT : 2017TOU30286. tel-01705139v2

[7] 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

[8] P. R. Bhaskaran, J. D. Rathnam, S. Koilmani, and K. Subramanian, "Multiresonant Frequency Piezoelectric Energy Harvesters Integrated with High Sensitivity Piezoelectric

## Bibliographie

---

Accelerometer for Bridge Health Monitoring Applications," *Smart Materials Research*, vol. 2017, 2017.

[9] 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.

[10] Hiroshi Nishimoto, Yoshihiro Kawahara, and Tohru Asami. Prototype implementation of ambient rf, energy harvesting wireless sensor networks. In *Sensors, 2010 IEEE*, pages 1282–1287. IEEE, 2010.

[11] Naoki Shinohara. Power without wires. *IEEE Microwave Magazine*, 12(7):S64– S73, 2011.

[12] Adel Khemar, Abdellah Kacha, Hakim Takhedmit, and Ghalid Abib. Design and experiments of a dual-band rectenna for ambient rf energy harvesting inurban environments. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(1):49–55,2017.

[13] U Olgun, C-C Chen, and JL Volakis. Design of an efficient ambient wifi energy harvesting system. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 6(11) :1200–1206, 2012.

[14] Véronique KUHN, "Capture opportuniste d'énergie micro-onde pour l'autonomie des objets communicants," 2016.

[15] M. P. Theodoridis, "Effective Capacitive Power Transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 12, pp. 4906–4913, Dec. 2012

[16] U. K. Madawala and D. J. Thrimawithana, "Modular-based inductive power transfer system for high-power applications," *IET Power Electron.*, vol. 5, no. 7, pp. 1119– 1126, Aug. 2012.

[17] D. Ameziane « Etude Et Optimisation D'antennes Fractales Plaquées » Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2008

[18] F.A. Belainine, M.A. Salmi « Etude De La Miniaturisation Des Antennes Par Replieement Application Pour La Conception D'une Antenne 2.4ghz » Mémoire de Master, Université Houari Boumediene d'Alger 2013.

[19] H. Chorfi « Conception D'un Nouveau Système D'antenne Réseau Conforme En Onde Millimétrique » Mémoire de Master, Université Québec Abitibi-Témiscamingue 2012.

## Bibliographie

---

[20] B. Kadri, F.T. Bendimerad, E. Cambiaggio, "Modelisation of the feed network application to synthesis unequally spaced microstrip antennas arrays", International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications ICEAA 99, pp. 371-374, Torino 13-17 September 1999

[21] A. Boyer « Antennes, Support De Cours Enonce De Travaux Diriges » Institut National Des Sciences Appliques De Toulouse.

[22] V.R. Cadambe, S.A. Jafar, "Interference alignment and spatial degrees of freedom for the K-user interference channel", in: 2008 IEEE Trans. Inf. Theory, volume 54, 8, IEEE, 2008, pp. 3425–3441.

[23] E. Dreina « Conception, Optimisation et Intégration Rf d'un Système d'antennes Miniatures Multi Capteurs utilisant La diversité en Vue d'augmenter les performances Radio d'un Terminal Mobile 4g » Thèse Doctorat, Université de Grenoble, 01 juillet 2010.

[24] Abboud, Ahmad. Interference mitigation in 5G mobile networks: Uplink pilot contamination in TDD massive MIMO scheme. Diss. Limoges, 2017.

[25] A. R. Weily, T. S. Bird and Y. J. Guo, "A reconfigurable high-gain partially reflecting surface antenna", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 56, no. 11, 3382–3390, 2008.

[26] Ines Kharrat. Modélisation et réalisation d'un système de récupération d'énergie imprimé : caractérisation hyperfréquence des matériaux papiers utilisés. Optique photonique. Université Grenoble Alpes, 2014. Français. <NNT : 2014GRENT106>. <tel-01314122>.page 33

[27] «Electronic and mechanical improvement of the receiving terminal of a free-space microwave power transmission system », Raytheon Company, Wayland, MA, Tech, Rep. PT-4964, NASA Rep. CR-135 194, Aug. 1977.