REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Systèmes des télécommunications

Etude et réalisation de rectenna en utilisant les ondes électromagnétiques du réseau mobile

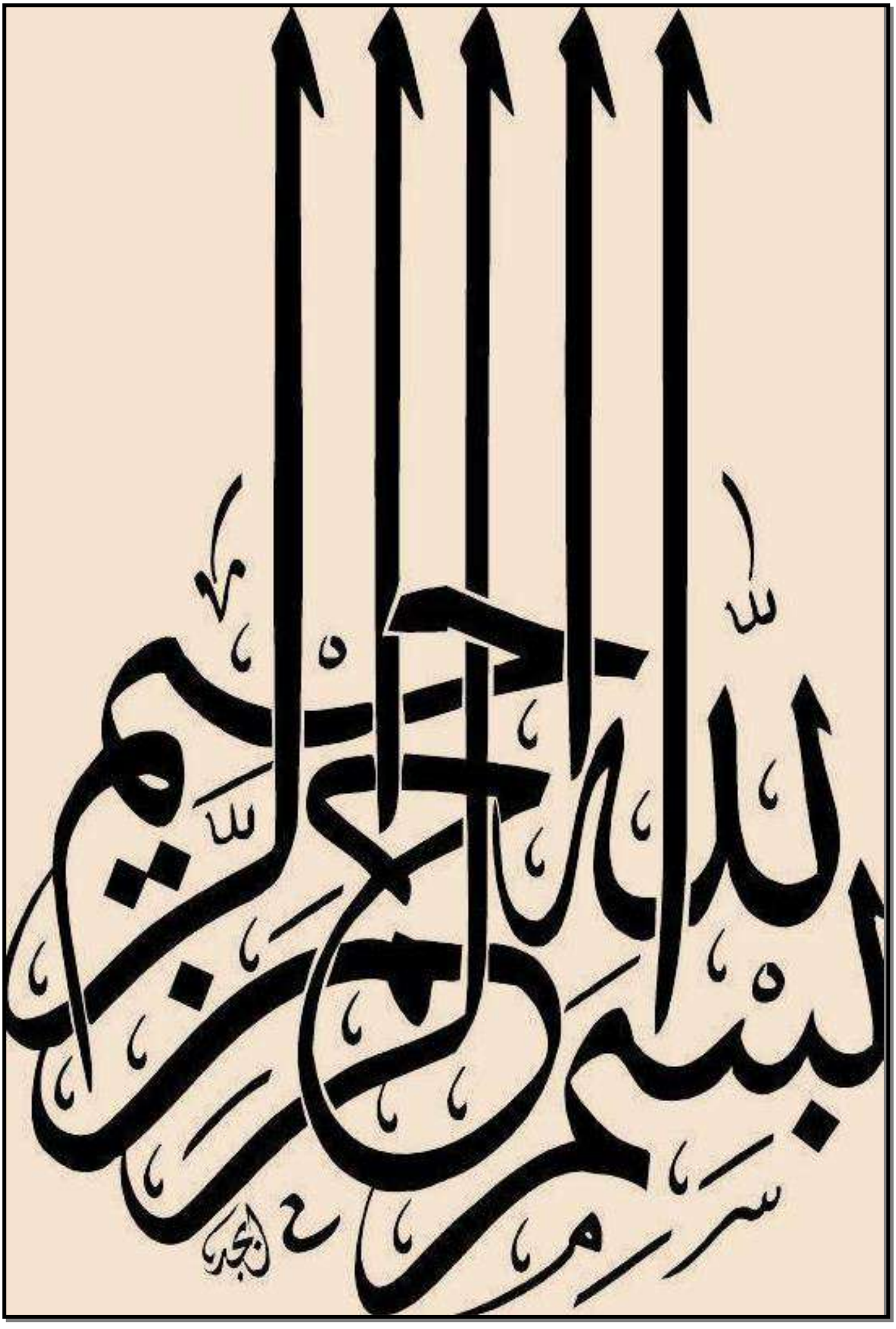
Présentés par :

- Boussahoua Khadidja.
- Benaissa Marwa.

Proposé et Dirigé par :

- Dr. Bouraiou abdelouahab.

Promotion 2022


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu le tout puissant

Pour La force,

la santé et la volonté qu'il nous a toujours données et que

sans lui rien n'aurait accomplies.

Un grand merci à Monsieur : ***Bouraiou abdelouahab.***

De nous avoir honorés par son encadrement, pour son encouragement, son soutien moral,

Sa modestie, les connaissances fructueuses et de sa disponibilité permanente tout au long de ce modeste travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance et mes remerciements à

Monsieur : ***Soumali Chaabane****. Je le remercie également pour tous ses encouragements et ses propositions pertinentes qui m'ont permis de gagner un temps précieux et aidé à progresser dans mes travaux de ce projet.*

On tient aussi à remercier Monsieur :

Chabira Abd el ghani *le personnelle du laboratoire, pour leur aide et leurs judicieux conseils.*

Nous tenons également à remercier Mr MIMEN BAKHTI , pour l'honneur qu'il nous a accordé, en acceptant de juger notre travail.

Nous tenons aussi à remercier nos chères familles pour leur soutient, leur engagement et leur amour inconditionnel.
Nous expriment également nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicace

Avant tous nous remercions DIEU le tout puissant car sans la foi qu'on a en lui en ne Serait pas arrivé là ou est aujourd'hui.

À mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la Patience,

Le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans

Eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui

Mon père : Benaissa Abd El-Kader.

« Que Dieu Lui fasse miséricorde »

Ma mère: Benyahia Samia.

A mes très chers frères : M. Omar ; Ahmed ; Okba.

A mes très chères sœurs : Safaa, Soulef.

A toute la famille.

A tous les enseignants et les profs qui m'ont appris durant toutes mes Années d'étude et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

A mes amies: Racha, Chaïma, Khadidja.

Je dédie cet humble travail.

Marwa.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents pour leur patience,

Leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

*Mon père : **Boussahoua Noureddine.***

*Ma mère : **Douma Malika.***

*A mes sœurs : **Nadia, Amira, Lamis, Malak, Ritadje.***

A ma grand-mère, à mes oncles et tantes

Et toute la famille.

A tous les professeurs et enseignants qui m'ont suivi durant tout mon Cursus scolaire et qui m'ont permis de réussir dans mes études mes meilleurs amis.

*A mon binôme : **Benaissa Marwa.***

A tous mes collègues du master spécialisé

Système de télécommunication

A tous les enseignants et les profs qui m'ont appris durant toutes mes Années d'étude.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible.

Khadidja.

Résumé:

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).

Et Afin de récupérer l'énergie à partir des ondes électromagnétiques utilisés dans la téléphonie mobile 2G (GSM), notre projet de fin d'étude va concentrer sur l'étude et la réalisation d'un modèle de rectenna afin de réaliser ce but.

Mots clés:

Transmission d'Energie Sans Fil (TESF); les ondes électromagnétiques ;Energy harvesting ; Rectenna; antenne patch ; Diode Schottky; filtre HF ; filtre DC ; la fréquence du réseau mobile 2G (GSM) ; téléphonie mobile (2 G, 3 G, et 4 G) ; les faibles puissances ; Rendement de Conversion RF-DC; la carte PCB.

Abstract:

Electromagnetic energy harvesting systems require an antenna of reception of the waves connected to an RF/DC conversion system thus forming an antenna Rectifier or "Rectenna" (RECTIFIER-ANTENNA).

And in order to recover the energy of the electromagnetic waves used in 2G mobile telephony (GSM), our end-of-study project will focus on the study and the realization of a rectenna model in order to achieve this objective.

Key words:

Wireless Power Transmission (WPT); electromagnetic waves; Energy harvesting; rectenna; patch antenna; Schottky diode; RF filter; DC filter; the frequency of the 2G mobile network (GSM); mobile telephony (2G, 3G, and 4G); low powers; RF-DC Conversion Efficiency; the PCB board.

ملخص:

تتطلب أنظمة حصاد الطاقة الكهرومغناطيسية هوائيً لاستقبال الموجات المتصلة بنظام تحويل RF / DC وبالتالي تشكيل نظام الهوائي المعدل أو "المستقيم" (الهوائي المعدل).

ومن أجل استعادة طاقة الموجات لكهرومغناطيسية المستخدمة في الهاتف المحمول G2 (GSM) ، سيركز مشروعنا لنهاية الدراسة على دراسة وإنجاز نموذج ريكتينا من أجل تحقيق هذا الهدف.

الكلمات المفتاحية:

نقل الطاقة اللاسلكي (WPT) ؛ الموجات الكهرومغناطيسية ؛ حصاد الطاقة ؛ المستقيمة. هوائي التصحيح شوتكي الصمام الثنائي؛ مرشح الترددات اللاسلكية مرشح DC تردد شبكة الهاتف المحمول 2G (GSM) ؛ الهواتف المحمولة (2Gو 3 3G و 4G) ؛ قوى منخفضة كفاءة التحويل RF-DC ؛ مجلس ثنائي الفينيل متعدد الكلور.

La Table des Acronyms:

Rectenna: Rectifying Antenna

RF: Radio Frequency.

DC : Direct Current (régime continu).

HF : Hyperfréquence (Haute Fréquence).

ANFR : Agence Nationale des Fréquences.

ARCEP : Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des postes.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

SPS: Solar Power Satellite.

ISM: Industrial, Scientific and Medical.

MSA: Micro strip Antenna.

MIC: micro waveinte grated circuit.

AGC : commande de gain automatique.

TEM : transverse électromagnétique.

EM : champ électromagnétique.

GSM: Global System for Mobile Communications.

TESF : Transmission d'Energie Sans Fil ou Transport d'Energie sans Fil.

OEM : onde électromagnétique

ROS : Rapport d'Onde Stationnaire.

BP : Bande Passante.

2G : Deuxième Génération

3G : Troisième Génération

4G : Quatrième Génération.

MMIC: Microwave Monolithic Integrated Circuits.

EH: Energy Harvesting.

WPT: Wireless Power Transfer

SOMMAIRE :

Introduction Générale

Introduction Générale : 1

Chapitre I : Généralité Sur les antennes.

I.1 Introduction : 4

I.2 Historique : 4

I.3 Définition de l'antenne : 6

I.4 Principe de l'antenne : 6

I.5 Le rôle des Antennes : 8

I.5.1 Antenne d'émission : 8

I.5.2 Antenne de réception : 8

I.5.3 Réciprocité : 8

I.6 Caractéristique des Antennes : 9

I.6.1 Représentation en quadripôles : 9

I.6.2 Coefficient de réflexion : 10

I.6.3 Le Gain : 10

I.6.4 La Directivité : 10

I.6.5 Le Rendement : 11

I.6.6 L'impédance d'entrée: 11

I.6.7 La bande passante (BP) : 12

I.6.8 Diagramme de rayonnement : 13

I.6.9 Polarisation de l'antenne : 13

A Polarisation linéaire : 14

B Polarisation circulaire : 14

C Polarisation elliptique : 14

I.7 Différents types d'antennes : 15

I.7.1 Les antennes filaires : 15
I.7.2 Les antennes à réflecteur : 16
I.7.3 Les Antennes Imprimées : 16
I.8 Pourquoi le choix de l'antenne patch ou imprimée ? 18
I.9 Principe de fonctionnement : 18
I.10. Critères de Choix du substrat : 19
I.11 Les différentes formes d'antenne batch : 20
I.12. Méthodes d'alimentation : 21
I.12.1 L'alimentation par ligne micro ruban : 21
I.12.2 L'alimentation par une sonde coaxiale : 21
I.12.3 L'alimentation par fente (ou par ouverture) : 21
I.12.4 Alimentation utilisant le couplage par proximité : 21
I.12.5 Circuits équivalents des lignes d'alimentation : 22
I.12.6 Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation : 23
I.13. Les applications des antennes patchs : 23
I.14 Les avantages et les inconvénients des antennes patchs : 23
I.15. Conclusion : 24

CHAPITRE II : La Rectenna

II.1.Introduction : 26
II.2. Historique de la TESF : 27
II.3.Spectre électromagnétique : 28
II.4. Les systèmes de récupération d'énergie radio fréquence : 29
II.4.1.les types du Transfer d'énergie par rayonnement : 30
II.4.1.1. Le premier scénario est le transfert de puissance à la demande : 30
II.4.1.2 Le deuxième scénario est la récupération de l'énergie électromagnétique ambiante EH : 31
II.5.Rectenna : 32
II.5.1.Historique : 32
II.5.2. Définition : 33

A. Le filtre d'entrée HF a pour rôle de : 33
B. Le rôle du filtre de sortie BF est : 33
C. Le bloc redresseur effectue la conversion RF/DC : 34
II.5.3. Schéma de principe : 34
II.5.3.1 Antenne de réception : 35
II.5.3.2.Le filtre d'entrée HF : 35
A. Adaptation des éléments localisés : 35
B. Adaptation des éléments distribués : 35
II.5.4. Redresseur de base : 36
II.5.4.1.Diode Schottky : 37
II.5.4.2. Topologies du circuit de conversion RF-DC : 39
A. Topologie série : 39
B. Topologie parallèle : 39
C. Topologie doubleur de tension : 40
D. Topologie Multiplieur de tension : 40
E. Topologie Pont de diodes : 41
II.5.4.3. Les différences entre les Topologies utilisées : 41
II.5.4.4. Pourquoi utilisée le choix du circuit de redresseur série ou parallèle ? 43
II.5.5. Filtre de sortie DC : 43
II.5.6 Charge résistive : 43
II.6. Le rendement de conversion : 44
II.7.Etude et réalisation de rectenna en utilisant les ondes EM du réseau mobile : 44
II.8.Conclusion : 45

CHAPITRE III: Réalisation dune rectenna a base d'une antenne patch rectangulaire.

III.1. Introduction : 47
III.2. Contraintes rencontrés pendant la réalisation de notre circuit : 47
III.3. Circuit de conversion en topologie série : 48

III.3.1La Partie Simulation du circuit:.....48
III.3.2.1. Réalisation d'antenne patch (rectangulaire) : 49
A. HFSS : 49
B. Les paramètres de l'antenne : 50
C. Les dimensions de l'antenne : 50
D. Le paramètre $S11$ d'antenne simulée : 51
III.3.2.2. La ligne micro ruban : 52
A. Microstrip Line Calculator-emtalk: 53
B. Les paramètres de ligne micro ruban : 53
C. Les dimensions de lignemicro ruban : 53
III.3.2.3. Filtre HF : 54
A. Filter Design Wizard : 55
B. Les paramètres de Filtre HF : 55
C. Les dimensions de Filtre HF : 56
III.3.2.4. Choix de la diode : 57
III.3.2.5. Diode Schottky BAT85 : 57
A. Les Dimensions de DiodeSchottky BAT85 : 58
III.3.2.6. Filtre DC : 59
III.3.2.7. La Charge : 59
III.3.2.8. Le schéma global de circuit imprimé : 60
A. Adobe Illustrator : 60
III.3.2.9. Le schéma du circuit imprimé avant la réalisation : 60
III.3.2La partie réalisation du circuit : 61
III.3.2.1. Test sur l'antenne : 63
III.3.2.2. Test sur le circuit redresseur : 68
III.4. Conclusion : 73

Conclusion Générale

Conclusion Générale : 75

Table des Figures :

Figure I.1 : Le schéma de l'antenne. 6
Figure I.2 : Principe de transmission par onde électromagnétique. 6
Figure I.3 : Schéma de principe d'un système de communication radio. 8
Figure I.4 : Représentation en quadripôle des ondes de puissance. 9
Figure I.5 : Circuit équivalent d'une antenne en émission. 12
Figure I.6: Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion. 12
Figure I.7: Diagramme de rayonnement d'une antenne direct. 13
Figure I.8: Vecteurs E et H d'une onde TEM en propagation. 14
Figure I.9: Différents types de polarisation. 14
Figure I.10: Dipôle diélectrique. 15
Figure I.11: Projecteur d'onde. 16
Figure I.12: Structure d'une antenne patch. 17
Figure I.13: Distribution de champ dans une antenne patch. 19
Figure I.14: Différentes formes d'antennes patch. 20
Figure I.15: Alimentation d'antenne imprimée. 22
Figure I.16: Les circuits équivalente de différentes méthodes d'excitation. 22

Figure II.1: Transmission d'énergie par ondes radio - Nikola Tesla dans son laboratoire de Colorado. 27
Figure II.2: Démonstrateur du Grand Bassin - Ile de la Réunion. 28
Figure II.3: Architecture globale d'un récupérateur d'énergie. 29
Figure II.4: Application du WPT. 31
Figure II.5: Récupération d'énergie électromagnétique ambiante 31
Figure II.6: Schéma bloc d'une rectenna. 33
Figure II.7: Structure d'une rectenna. 34
Figure II.8: Adaptation du circuit redresseur à l'antenne. 35
Figure II.9: Signaux avant et après Redressement. 37
Figure II.10: Modèle électrique équivalent d'une diode Schottky. 37
Figure II.11: Schéma synoptique d'une « rectenna » en topologie série. 39
Figure II.12: Schéma synoptique d'une « rectenna » en topologie parallèle. 40
Figure II.13: Schéma synoptique d'une « rectenna » en doubleur de tension. 40
Figure II.14: Schéma synoptique d'une « rectenna » en Multiplieur de tension. 40

Figure II.15: Schéma synoptique d'une « rectenna » en Pont de diodes. 41

Figure III. 1: Schéma équivalent du circuit en série. 48
Figure III.2: Antenne patch rectangulaire. 49
Figure III.3: Les dimensions d'Antenne patch rectangulaire. 51
Figure III.4: La courbe de paramètre S_11 d'antenne simulée.....52
Figure III.5: Ligne de transmission (micro-ruban). 52
Figure III.6: Les dimensions de ligne de transmission. 54
Figure III.7: Filtre haut fréquence.....55
Figure III.8: Les paramètres de Filtre Haute Fréquence. 56
Figure III.9: Les dimensions de Filtre Haute Fréquence. 56
Figure III.10: Circuit de diode Schottky. 57
Figure III.11: La composante Diode Schottky BAT85 en Réelle.....57
Figure III.12: Schéma équivalent de la diode Schottky BAT85. 58
Figure III.13: La composante Condensateur « 33pF » en Réelle. 59
Figure III.14: La composante Résistance « 10K ohm » en Réelle. 59
Figure III.15: Le schéma global de circuit imprimé. 60
Figure III.16: La carte PCB : antenne ; lignes et filtre imprimés. 62
Figure III.17 : Le circuit avec les Composants : Diode ; Condensateur et Résistance. 62
Figure III.18: (a, b, c) Les étapes de test sur l'antenne. 64
Figure III.19: La courbe de coeficiant de reflection S_11. 65
Figure III.20: La courbe de puissance en fonction de la fréquence. 67
Figure III.21:(a, b) Les étapes de test sur le circuit redresseur 69
Figure III.22: La courbe de filtre passe bande utilisé. 70
Figure III.23: La courbe de tension(out) en fonction de la fréquence(in). 72
Figure III.24: La courbe de rendement en fonction de la fréquence.....73

Table des Tableaux :

Tableau I.1: Historique des radiocommunications et des antennes. 5
Tableau I.2: Les antennes sont utilisées dans des gammes de longueur d'onde.....7
Tableau I.3: Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation. 23

Tableau II. 1: Comparaison des différentes structures de rectennas. 42

Tableau III. 1: Schéma équivalent de la diode Schottky BAT85. 58
Tableau III.2: La courbe de coeficiant de reflection S_11. 66
Tableau III.3: La courbe de filtre passe bande utilisé.....71

Introduction Générale

Introduction Générale :

De nos jours, l'air qui nous entoure est plein des ondes électromagnétiques qui vient de millions d'équipement de tous les volumes et formes, en commencent par les satellites, les stations de diffusion de la télévision et radio terrestre et en fin les réseaux mobiles etc... L'explosion du nombre d'appareils électroniques, et spécialement à faible consommation d'énergie, et que ne cesse à augmenter de jours en jours, et à l'arrivée prochaine des appareils qui sont destinés à être connectés à Internet avec le lancement de la 5G, nous impose à profiter de tous cette faible énergie réellement perdue dans l'espace, et de faire la réutiliser afin d'alimenter les appareilles à faible consommation d'énergie. Dans ce contexte, la récupération d'énergie des ondes électromagnétique ou **l'Energy HARVESTING** ou le transfert de puissance sans fil (WPT) a attiré beaucoup d'attention pour l'alimentation en énergie des réseaux de communication à puissance limitée. Les systèmes multifonctions intégrant la fonction de récupération d'énergie peuvent bénéficier d'une durée de vie prolongée et d'une maintenance réduite.

Le RECTENNA est une méthode très connue ces dernières années et spécialement chez les chercheurs du domaine de la télécommunications, le but de cette méthode est de faire des conceptions a base des antennes et faire récupérer les ondes électromagnétiques, ensuite faire redresser les signaux pour qu'ils puissent être utiliser pour alimenter les appareils à faible consommation d'énergie, ou à aider même les autres appareils pour faire économiser un peu de leurs batteries comme les téléphones portables par des système hybrides(harvesting-cellules solaires ou harvesting-source batterie), le nombre de ces appareils et avec la nouvelles génération mobile 5G va augmenter a des milliards d'équipements et qui nécessitent tous de l'énergie et que pas mal de ces équipements vont êtres a faible consommation, chose qui favorise l'utilisation du Energy harvesting.

Dans notre travail, on va essayer de faire une étude pour faire réaliser une rectenna, et qui va travailler dans la bande de fréquence du réseau mobile 2G (GSM).

Notre mémoire comporte trois chapitres, le chapitre 1 discute les différents types d'antennes ainsi que les caractéristiques et avantages et inconvénient de chaque type.

Le chapitre2 discute le principe de la récupération d'énergie. On parle dans ce chapitre de l'historique de cette méthode, les premiers gens qui ont pensé à l'utiliser, ainsi que les différentes méthodes et circuits utilisés dans ce domaine de recherche, à savoir le rectenna, les types d'antennes utilisés et les composants de redressement.

Le chapitre3 explique en détail l'opération de réalisation d'une rectenna qui travaille dans la bande de fréquence du réseau mobile 2G, depuis la conception de la carte PCB, avec les différents logiciels spécialisés, jusqu'à la réalisation final et l'ajouts des composants de redressement, et à la fin les tests et résultats avec nos commentaires sur ces résultats.

A la fin une conclusion qui résume tout ce travail et spécialement notre travail de conception et réalisation du rectenna et discussion des résultats.

CHAPITRE I :

Généralité Sur Les Antennes

I.1 Introduction :

Le domaine des télécommunications a connu un progrès technologique durant les dernières années grâce à la forte demande de l'industrie et des utilisateurs.

Les télécommunications sont en plein essor car l'antenne est un élément essentiel de la chaîne de transmission. Une vue générale sur les antennes est donnée, ainsi qu'une présentation de leurs caractéristiques et rôle.

Ce chapitre a également permis de présenter la description générale des antennes imprimées, leurs propriétés et leurs caractéristiques, un rappelle théorique sur l'antenne imprimée, une présentation des différentes techniques d'alimentation.

I.2 Historique :

Cette historique des découvertes et inventions liées aux radios communications et aux antennes.

Le développement des radiocommunications est basé sur la théorie de l'électromagnétisme, mise au point au 19 eme siècle et améliorer au 20 eme siècle.

Les onde électromagnétiques, support des radiocommunications, ont été prévu de manière théorique dans le cadre des équations de maxwell et mises en évidence expérimentalement par Hertz à la fin du 19éme siècle.

Peu de temps après, les premières applications de transmission radio sont apparus .Leur développements est fait en parallèle avec celui de l'électronique au début du siècle.

Le 20eme siècle est ensuite ponctué d'innovations majeures, qui répondaient des besoins précis. [9]

- En définie sur tableau (I.1) suivante : [1]

Années	Evènement
1819	Expérience d'Oersted (lien électricité-magnétisme).
1831	Loi d'induction de faraday.
1873	Équations de Maxwell.
1887	Expérience d'Hertz (mise en évidence des ondes EM).
1896	Radio de Marconi.
1901	La liaison radio intercontinental.
1906	Création de l'ITU-R.
1908	Tube triode de Lee de Forrest.
1926	Antenne Yagi.
1934	Le radar.
1940-1945	Concept de RFID.
1946	Équation de Friis.
	Réseau d'antennes.
1962	Telstar (1er satellite de télécom)
1970-1975	Antennes Patch.
1984	MIMO.
1987	Spécifications GSM.
2010	Déploiement 3.9G LTE

Tableau I.1 : Historique des radiocommunications et des antennes. [9]

I.3 Définition de l'antenne :

L'antenne est une composante très importante dans les systèmes de communication sans fil. Par définition, une antenne est un dispositif utilisé pour transformer un signal "RF" voyagé sur un conducteur ou sous forme une onde électromagnétique dans l'espace**.** Une antenne est un outil le qui assure la transmission de l'énergies ou forme d'une onde se propage dans l'espace entre un émetteur et un appareil de réception**.**

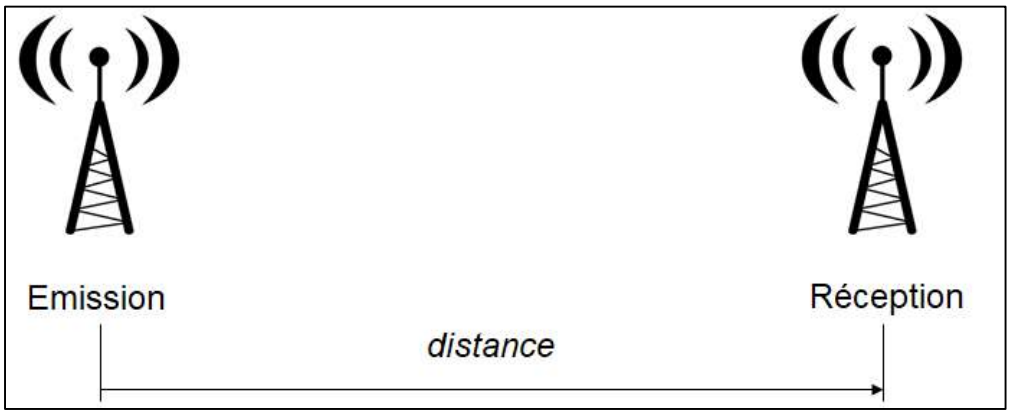


Figure I.1 : le schéma de l'antenne. [9]

I.4 Principe de l'antenne :

Antenne pour transmettre la radio appareil ou recevoir électromagnétique composants. Communication radio, Radio, télévision, radar, navigation, contre-mesures électroniques, la télédétection, radioastronomie qualité l'ingénierie des systèmes, tout utiliser des ondes électromagnétiques pour transmettre des informations set compter sur antennes à actuellement. En outre, dans termes d'énergie de signal rayonnement n'est également pas nécessaire antenne. Antenne sont généralement réversible, qui est le même à la fois antennes d'émission peut être utilisé comme l'antenne de réception. Transmettre ou recevoir la même antenne à la base paramètre caractéristique est la même de théorème de réciprocité. [9]

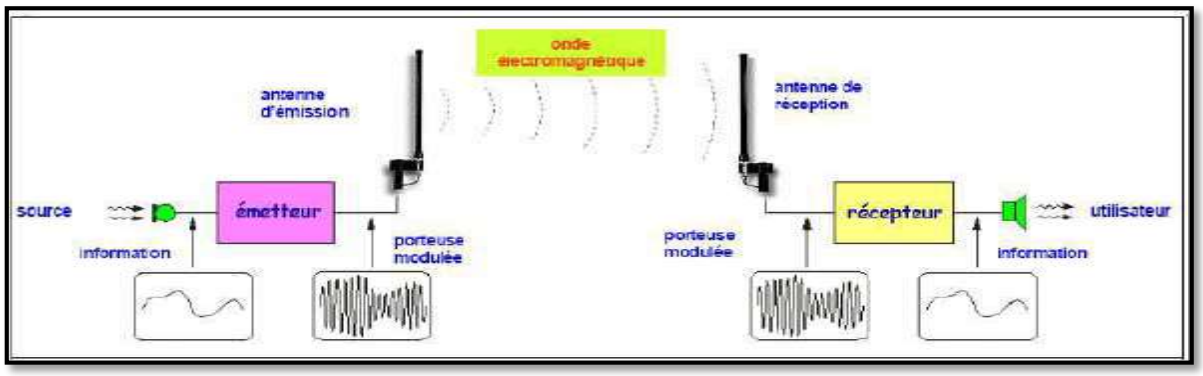


Figure I.2 : Principe de transmission par onde électromagnétique. [9]

- Les antennes sont utilisées dans des gammes de longueur d'onde très différentes pour un très grand nombre d'applications dont nous citons quelques exemples:

les ondes :	Les fréquences :	Les utilisateurs :
Ondes kilométriques	30KHz à 300 KHz (MF)	pour la radiodiffusion à modulation d'amplitude, les liaisons avec les sous-marins, navigation, radio de la garde côtière.
Ondeshectométriques	300 KHz à 30000kHz (MF)	
des décamétriques	3MHz à 30MHz (HF)	pour les liaisons intercontinentales oumaritimes, téléphone, télégraphe, station radioamateur, etc.
Ondes métriques	30MHz à 300MHz (VHF)	pour la radiodiffusion à modulation de fréquence, la télévision et les communications.
Ondes décimétriques	300MHz à 300 MHz (UHF)	pour la télévision, le radar et lesliaisons avec les mobiles.
Ondes centimétriques	3GHz à 30GHz (SHF)	pour les liaisons terrestres par faisceaux hertziens et les liaisons spatiales, radars d'avions ; etc.
Ondes millimétriques	30 GHz à 300GHz (EHF)	pour les radars, l'expérimental, etc.

Tableau 1.2 : Les antennes sont utilisées dans des gammes de longueur d'onde. **[9]**

I.5 Le rôle des Antennes :

Si nous considérons un système de communication sans fil le plus simple qui soit, celui-ci serait composé d'un bloc d'émission et d'un bloc de réception. Ces deux blocs seraient séparés par un canal de propagation dans lequel le signal émis transite avant d'être reçu comme le montre (la figure I.3) : [2]

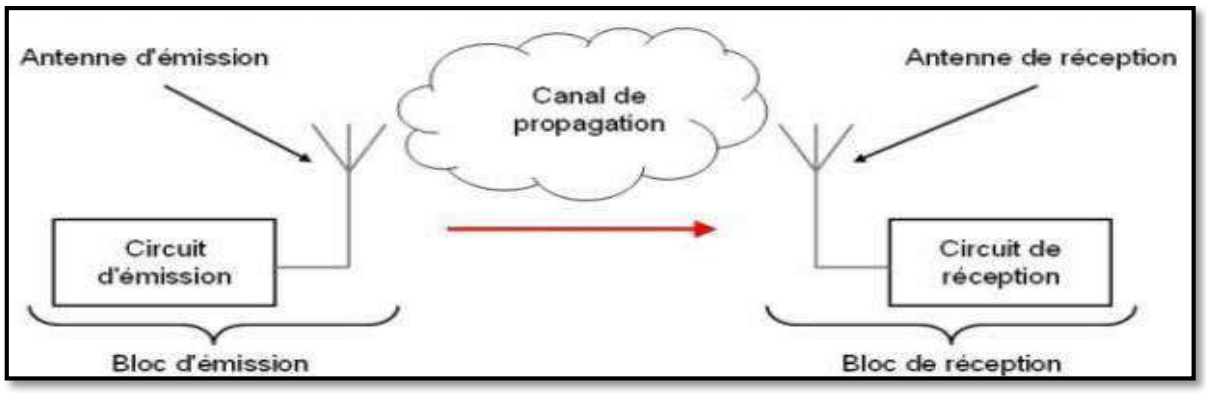


Figure I.3: Schéma de principe d'un système de communication radio. [2]

I.5.1Antenne d'émission :

Afin d'assurer la propagation dans l'air, il est nécessaire qu'un dispositif génère une onde rayonnée. Le rôle de l'antenne d'émission est de transformer la puissance électromagnétique guidée, issue d'un générateur en une puissance rayonnée. Dans ce sens, c'est un transducteur.[2]

I.5.2 Antenne de réception :

De façon inverse, la puissance rayonnée peut être captée par une antenne de réception. Dans ce sens, l'antenne apparaît comme un capteur et un transformateur de puissance rayonnée en puissance électromagnétique guidée. Elle joue le même rôle qu'un télescope qui capte la lumière issue des étoiles et la transforme.[2]

I.5.3 Réciprocité :

Dans la plupart des cas, une antenne peut être utilisée en réception ou en émission avec les mêmes propriétés rayonnantes On dit que son fonctionnement est réciproque. Ceci est uneconséquence du théorème de réciprocité qui sera démontré plus loin. Dans quelques cas exceptionnels pour lesquels les antennes comportent des matériaux non linéaires ou bien anisotropes, elles ne sont pas réciproques. Du fait de la réciprocité des antennes, il ne sera pratiquement jamais fait de différence entre le rayonnement en émission ou en réception. Les qualités qui seront annoncées pour une antenne le seront dans les deux modes de fonctionnement, sans que cela soit précisé dans la plupart des cas**.** [2]

- L'antenne a plusieurs rôles dont les principaux sont les suivants:
  - Permettre une adaptation correcte entre l'équipement radio électrique et le milieu de propagation.
  - Assurer la transmission ou la réception de l'énergie dans des directions privilégiées.
  - Transmettre le plus fidèlement possible une information.

I.6 Caractéristique des Antennes :

I.6.1 Représentation en quadripôles :

Une antenne peut être représentée comme un quadripôle (Figure I.4), défini par les paramètres "S":

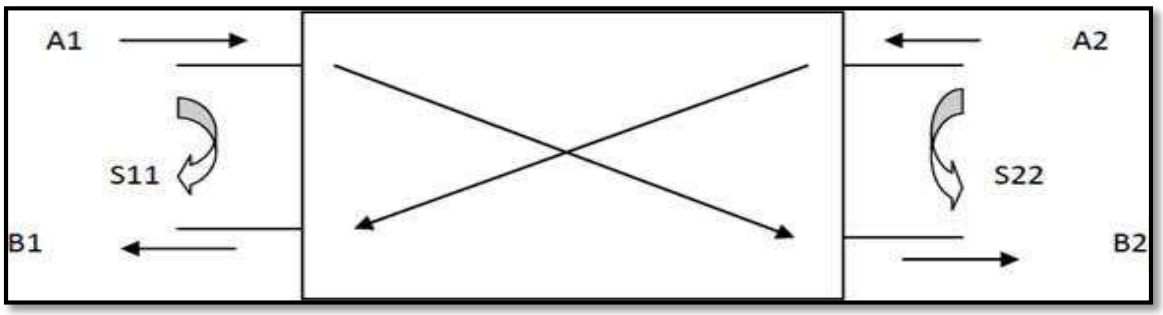


Figure 1.4: Représentation en quadripôle des ondes de puissance. [3]

- On relations savants:

$$B_{1=}S_{11-A1} + S_{12-A2} \quad \textbf{(I.1)}$$

$$B_{2=}S_{21-A1} + S_{22-A2} \quad \textbf{(I.2)}$$

1) Le coefficient S_{12} correspond la réflexion en entrée des quadripôles lorsque $A_2 = 0$.
2) Le coefficient S_{12} représente la transmission de la puissance entrant en sortie vers l'entrée lorsque$A_2 = 0$.
3) Le coefficient S_{21} est le gain du quadripôle lorsque$A_2 = 0$.
4) Le coefficient S_{22}est la réflexion en sortie du quadripôle lorsque$A_1 = 0$. [10]

I.6.2 Coefficient de réflexion :

Le coefficient de réflexion d'une antenne représente le rapport des amplitudes des ondes incidentes sur le son des réfléchies. Le coefficient de réflexion peut être définit comme suite:

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_{ant} - Z_c}{Z_{ant} + Z_c} \quad \textbf{(I.3)}$$

Le module du coefficient de réflexion est souvent exprimé en décibel (dB) et est noté $|\mathbf{S_{11}}|$et se définit comme suit:

$$|S_{11}|_{dB} = 20log(S_{11}) \quad \textbf{(I.4)}$$

Le coefficient de réflexion permet de connaitre la qualité d'adaptation d'une antenne. En est, plus son module tend vers l'inni négativement, plus l'antenne est adaptée. Souvent, la fréquence de résonance d'une antenne est celle où le coefficient de réflexion est minimal.

Dans la pratique, l'adaptation est caractérisée par le module du coefficient de réflexion ou, le plus souvent, par le "Rapport d'onde Stationnaire "**(R.O.S).** 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 on de stationnaire. Il se définit comme le rapport des valeurs maximales**.** [1]

I.6.3 Le Gain :

Le gain G (θ, ϕ) d'une antenne dans une direction (θ, ϕ) est le rapport entre la puissance rayonnée dans direction donnée P (θ, ϕ) sur la puissance que rayonnerait la source isotrope par unité d'angle solide. En général, le gain G correspond au gain dans la direction de rayonnement max (θ0,ϕ0).[11]

$$\mathbf{G\ (\theta,\ \phi) = 4\pi \frac{P(\theta,\phi)}{P_A}}$$

$$\mathbf{G\ (\theta,\ \phi) = 4\pi \frac{P(\theta,\phi)_0}{P_A}} \quad \textbf{(I.5)}$$

I.6.4 La Directivité :

La directivité d'une antenne caractérise la manière dont cette antenne concentre son rayonnement dans certaines directions de l'espace. La directivité d'une antenne dans une direction (P, φ) est le rapport de la puissance P (P) à la puissance que rayonnerait la source isotrope par unité d'angle solide.[3]

$$\mathbf{D(\vartheta,\varphi) = \frac{P(\vartheta,\varphi)}{(P_r/4\pi)}} \quad \textbf{(I.6)}$$

Pr: est la puissance totale le rayonné.

I.6.5 Le Rendement :

Dans le cas de dégradation de puissance au niveau de l'antenne, soit du fait des pertes ou de mauvaise utilisation, on peut définir le rendement comme suit : [12]

$$\eta = \frac{P_r}{P_0} \quad \textbf{(I.7)}$$

- ✓ Où :
  - La relation quillant le rendement avec le gain et la directivité est :[12]

$$\eta = \frac{G(\vartheta,\phi)}{D(\vartheta,\phi)} \quad \textbf{(I.8)}$$

I.6.6 L'impédance d'entrée:

Pour évaluer l'impédance d'une antenne, on considère une antenne à l'émission. L'antenne est équivalente à une charge à l'entrée de laquelle existent un courant I_{in}et la tension. Le rapport de ces deux quantités fournie l'impédance Z_{in}.

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_{in} + X_{in} \quad \textbf{(I.9)}$$

$\mathbf{X_{in}}$ **:**La partie réactive (réactance) de l'antenne, elle représente la puissance stockée dans les régions proches du champ rayonné.

$\mathbf{R_{in}}$ **:** La partie active est reliée aux champs (puissance) rayonnés et a puissance perdue par effet de joules. Elle est constituée de deux composantes, une résistance de rayonnement $\mathbf{R_p}$ et une résistance de perte $\mathbf{R_p}$ ($\mathbf{R_{in}} = \mathbf{R_p} +$).

- ✓ La puissance associe à la résistance $\mathbf{R_r}$est la responsable de rayonnement de l'antenne, tandis que la puissance dissipée par la résistance $\mathbf{R_p}$est perdue en chaleur dans l'antenne.
- ✓ L'adaptation permet d'éliminer le coefficient de réflexion:

$$\Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_s}{Z_{in} + Z_s} \quad \textbf{(I.10)}$$

✓ D'où la condition d'adaptation:[14]

$$\Gamma_{in}=0 \leftrightarrow Z_{in}= Z_s \quad \textbf{(I.11)}$$

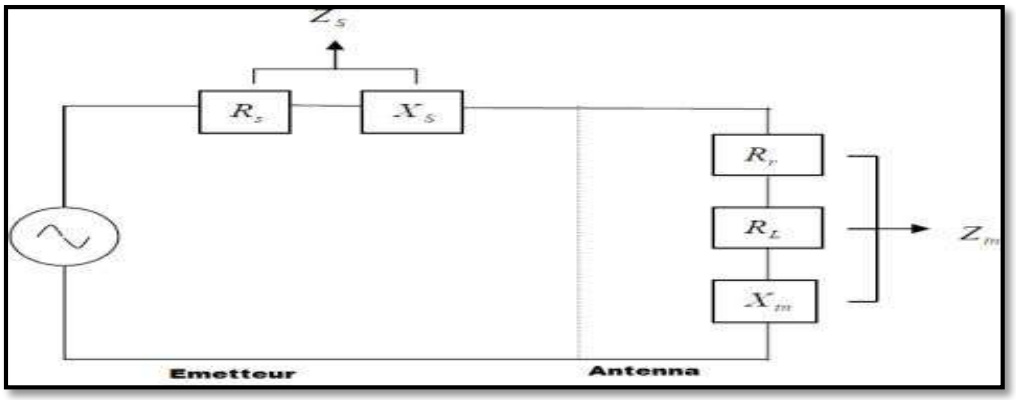


Figure I.5: Circuit équivalent d'une antenne en émission. [14]

I.6.7 La bande passante (BP) :

La bande passante d'une antenne correspond à la bande de fréquence où le transfert d'énergie de l'alimentation vers l'antenne ou de l'antenne vers le récepteur est maximal. À l'intérieur de la bande passante, le coefficient de réflexion Γ est faible. [14]

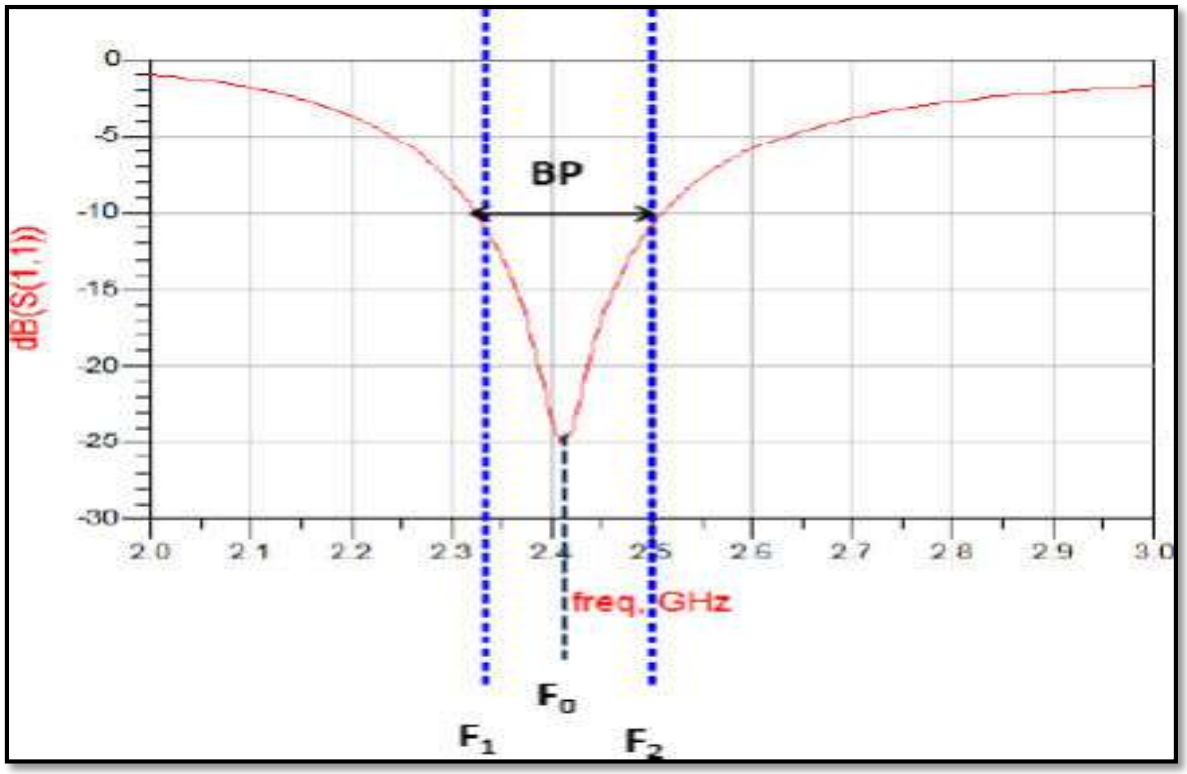


Figure I.6: Mesure de la bande passante à partir du tracé de coefficient de réflexion. [14]

I.6.8 Diagramme de rayonnement :

Le diagramme de rayonnement fournit des informations sur la répartition dans l'espace de l'énergie rayonnée ou reçue par l'antenne considérée. Ainsi, à partir du diagramme de rayonnement, il est possible de définir plusieurs paramètres du rayonnement d'une antenne dont l'ouverture, le niveau de puissance et la direction des lobes secondaires. [13]

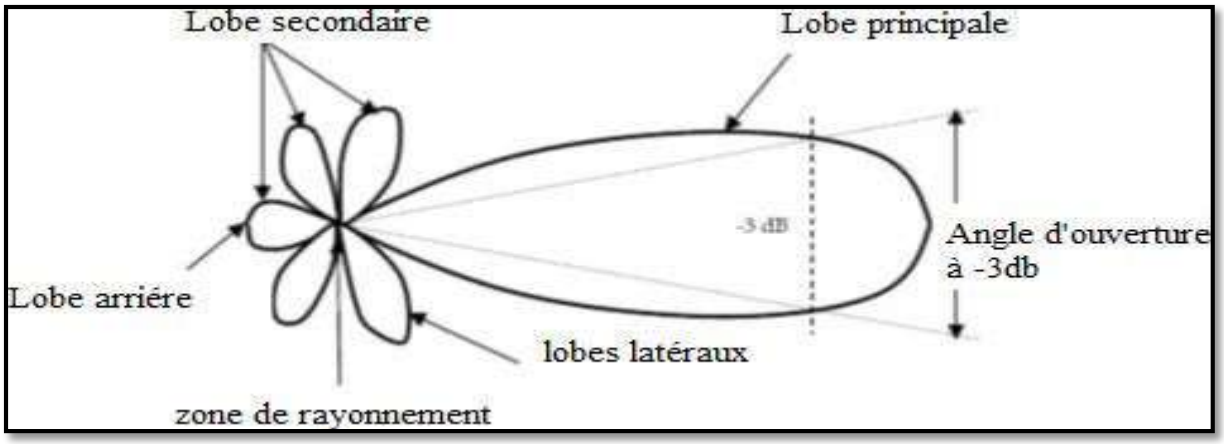


Figure I.7 : Diagramme de rayonnement d'une antenne direct. [13]

- **D'un lobe principal:** C'est le lobe de rayonnement contenant le maximum d'énergie et la direction du maximum de rayonnement.
- **Des lobes secondaires :** Ils représentent le rayonnement de l'antenne dans les directions indésirables. Le niveau d'un lobe secondaire est en général exprimé sous forme de rapport entre la densité de puissance dans le lobe en question et celle du lobe principal. Ce rapport est appelé le niveau des lobe secondaires et il est exprimé en dB.
- **D'un lobe arrière (rayonnement arrière) :** C'est le lobe secondaire présent dans la direction opposée (à 180°) du lobe principal .Le rapport avant/arrière est le rapport en dB de la puissance rayonnée dans la direction du maximum de rayonnement par rapport à celle rayonnée dans la direction opposée.

✓ Dans la plupart des systèmes antennaires, les lobes secondaires sont indésirables. Une bonne conception d'antenne doit permettre de minimiser les niveaux de lobes secondaires.[13]

I.6.9 Polarisation de l'antenne :

Une onde électromagnétique peut être décomposée en deux parties, le champ électrique E et le champ magnétique H, ces deux composantes sont perpendiculaires à la direction de propagation. Ces champs sont décrits par des vecteurs [5], comme exposé sur la Figure (I.8).

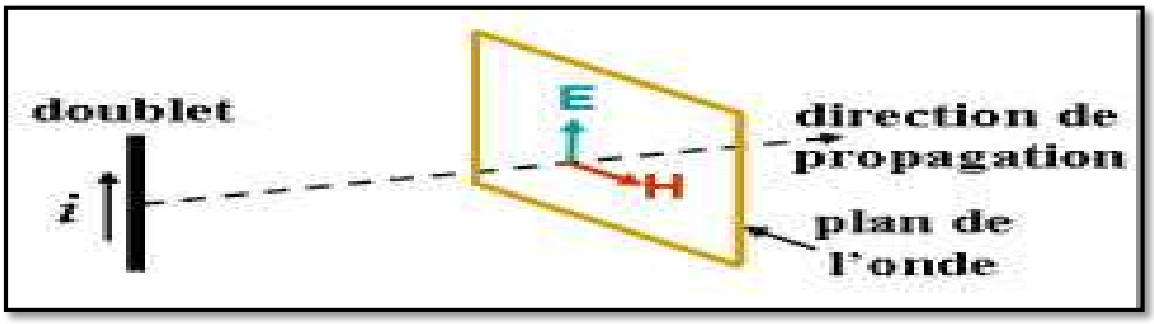


Figure I.8 : Vecteurs E et H d'une onde TEM en propagation.[5]

- La polarisation est déterminée par la direction du champ électrique E.

Les deux champs **E** et **H** sont en phase du point de vue amplitude mais ils sont déphasés de 90 degrés sur le plan de la direction de la propagation. Trois grands types de polarisation peuvent être distingués: [5]

A. Polarisation linéaire :

La direction du vecteur champ électrique reste constante au cours du temps, sa trajectoire est donc un segment de droite. Un dipôle génère classiquement une 'OEM' polarisée linéairement. Lorsque la polarisation del'antenne est linéaire, le diagramme de rayonnement est celui d'un dipôle magnétique. [5]

B. Polarisation circulaire :

La polarisation est dite circulaire lorsque le vecteur champ **E** décrit un Cercle avec le temps. Ce champ **E** a deux composantes de même amplitude et déphasées de 90 degrés. [5]

C. Polarisation elliptique :

La polarisation est dite elliptique lorsque le vecteur champ **E** décrit uneellipse dans le temps. Elle correspond au cas général d'un champ **E** comprenant deux composantes d'amplitudes différentes déphasées de $\pi/2$ Certaines antennes ont une polarisation elliptique ou circulaire.

✓ Si la polarisation de l'antenne n'est pas adaptée à la polarisation de l'onde le signal subit un affaiblissement pouvant aller jusqu'à l'infini .[5]

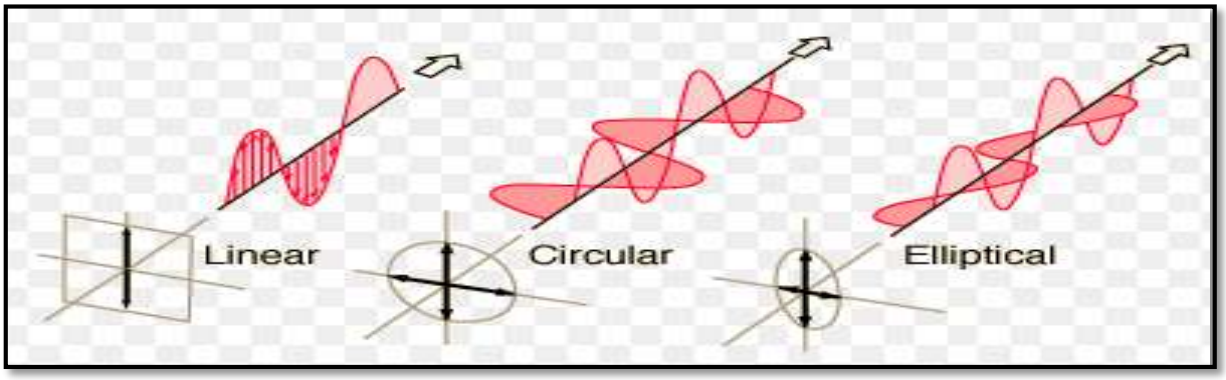


Figure I.9 : Différents types de polarisation. [5]

I.7 Différents types d'antennes :

Les antennes sont réparties en plusieurs catégories selon la géométrie, le gain, la forme du faisceau, et la bande passante. Ainsi, On va voir les grandes familles des antennes à l'origine de l'ensemble. [4]

- On peut les classer selon la forme géométrique comme suit:

  - Les antennes filaires: (dipôle ;monopole ; Yagi).
  - Les antennes à ouvertures:(antenne à réflecteur parabolique ,cornet).
  - Les antennes à fentes :(demi ou quart d'onde).
  - Les antennes imprimées:(patch ,dipôle imprimé ,spirale).

- On considère **3 types principaux de l'antenne** suivante :

I.7.1 Les antennes filaires :

Elles sont constituées par un fil ou des groupements des fils, le plus souvent il s'agit deslignes résonnantes demi-onde formées par des tubes compte tenu de la longueur d'onde λ. En montre une antenne demi-onde, connu sous le nom de dipôle, alimentée par une coaxiale. La courbe en point Il l'est la variation du courant sur l'antenne.

La figure (I.10) présentée suivante :

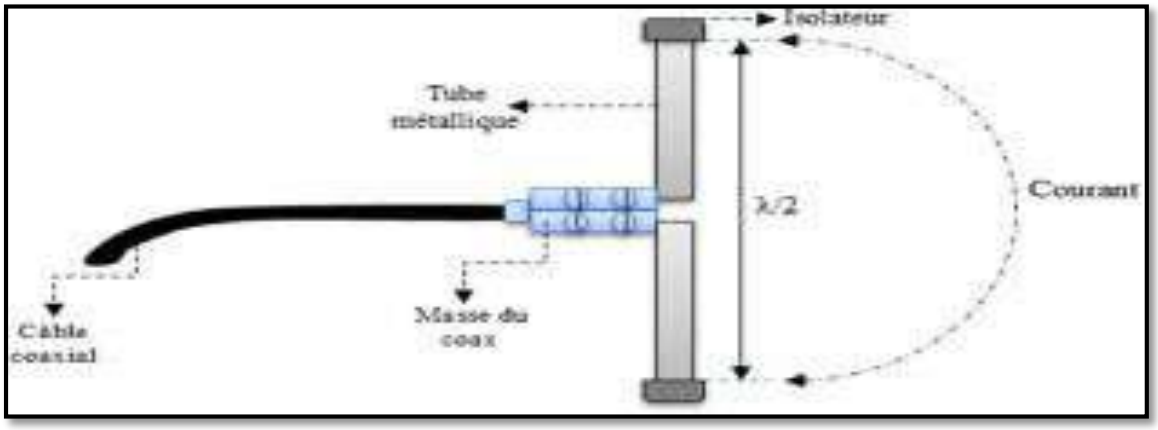


Figure 1.10: Dipôle diélectrique. [16]

La partie rayonnante est une tube métallique, la langueur du tube est de **λ/ 2**, λ étant la longueur d'onde sur la ligne qui est un peuples faible que la longueur d'onde dans l'airλ0, on utilise ces antennes comme éléments rayonnants dans des alignements ou des groupements de sources rayonnants. [16]

I.7.2 Les antennes à réflecteur :

Dans la réalisation la plus courante est le réflecteur parabolique éclairé par un dipôle ou par un courant électromagnétique qui un guide d'onde qui agit comme un filtre passe haut pour ne laisse passer qu'un de propagation, cette source d'éclairement dit source primaire rayonne une onde sphérique qui se réfléchit sur le paraboloïde suivant un faisceau de rayons parallèles. Dans l'approximation de l'optique géométrique. [16]

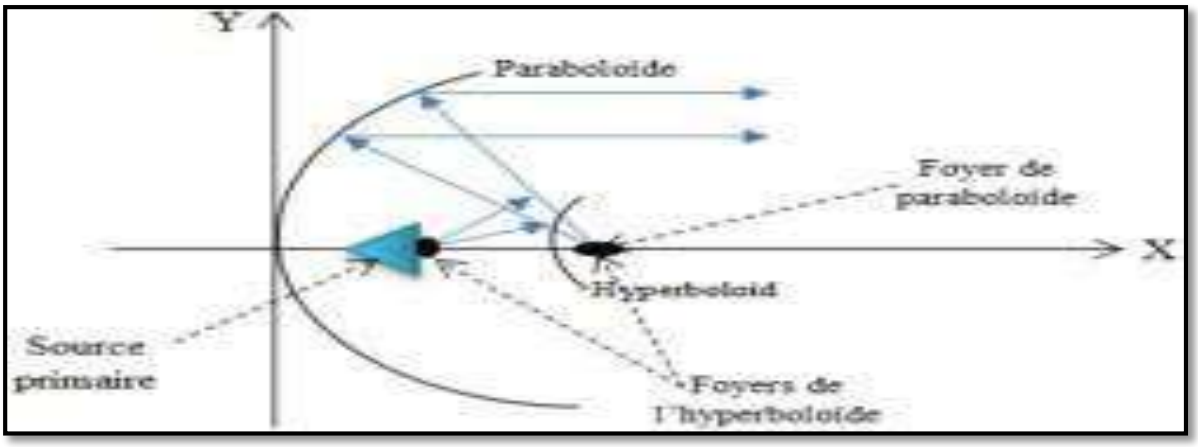


Figure I.11: Projecteur d'onde. [16]

I.7.3 Les Antennes Imprimées :

Le concept d'antennes patch est apparu dans les années 50, mais le véritable développement ne s'est fait que dans les années70.Les antennes imprimées ou micro ruban, ou patches en anglais sont des éléments rayonnants planaires. Elle présente l'avantage du faible poids sur certaines antennes décrites précédemment.

Ce sont des antennes plaquées et réalisée par gravure d'un circuit imprimé diélectrique, elles présentent des architectures variées selon leur application. Leur surface contient un élément rayonnant de géométrie quelconque (rectangulaire, circulaire, à fente, ou formes plus élaborées). Il existe plusieurs mécanismes d'excitations qui permettent d'avoir des diagrammes de rayonnement en polarisations linéaire ou circulaire.

De par leur technologie de fabrication, ceux-ci peuvent être intégrés au plus près descircuits électroniques en occupant un volume réduit et se conformant à différents types desurface. Leur principal avantage réside dans leur faible coût de fabrication. Les antennes patch sont utilisées dans des nombreuses applications à partir des bandes VHF.

En général dans sa structure de base, une antenne imprimée est constituée d'un finconducteur métallique de forme arbitraire, appelé élément rayonnant, déposé sur un substrat diélectrique dont la face inférieure est entièrement métallisée pour constituer un plan de masse. (La figure I.12) montre la structure d'une antenne imprimée. Dans la pratique, les formes deséléments rayonnants les plus souvent utilisées sont : le carré, le rectangle, le disque et l'anneau. Mais d'autres géométries plus complexes peuvent êtres rencontrées. [2]

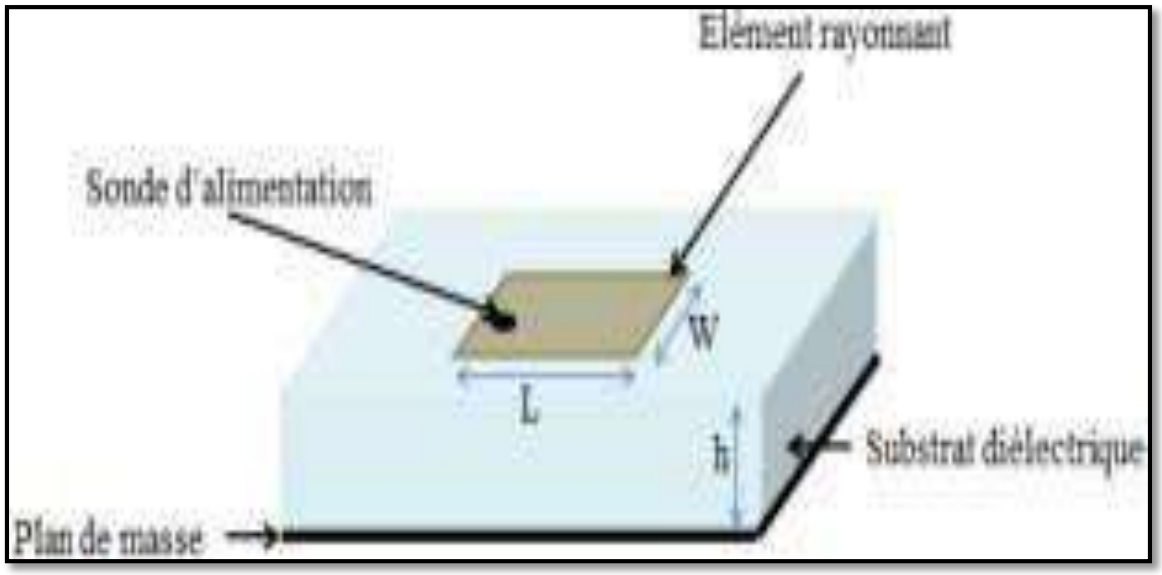


Figure 1.12: Structure d'une antenne patch. [16]

- ✓ Avec :

  W : largeur (width).

  L : longueur (length).

  H : épaisseur du substrat (height).

- Largeur **W** unpatchestdonnéparlaformulesuivante:

$$W = \frac{c}{2 f_{res} \sqrt{\frac{\varepsilon_{die} + 1}{2}}} \quad \textbf{(I.12)}$$

- La longueur **L** pour un patch rectangulaire est donnée par la formule suivante:

- ✓ **L:** Langueur du patch.

$$L = L_{ef} - 2 * \Delta L \quad \textbf{(I.13)}$$

✓ **L_{ef} :** La langueur effective du patchAvec :

$$L_{ef} = \frac{c}{2f_{res}\sqrt{\varepsilon_{ef}}}$$

$$\varepsilon_{ef} = (\frac{\varepsilon_{die}+1}{2}) + (\frac{\varepsilon_{die}-1}{2})(1+\frac{12h}{W})^{\frac{1}{2}}$$

$$\triangle L = 0.412h\frac{(\varepsilon_{die}+0.3)(\frac{W}{h}+0.264)}{(\varepsilon_{die}-0.258)(\frac{W}{h}+0.8)}$$

(I.14)

- fres: fréquence de résonance.
- εdie: permittivité diélectrique du substrat.
- h:épaisseur du substrat.
- εef: Permittivité effective. [16]

I.8 Pourquoi le choix de l'antenne patch ou imprimée ?

Actuellement, les antennes imprimées deviennent de plus en plus importantes en raison de la grande variété des formes géométriques qu'elles peuvent prendre et qui les rendent applicables aux différentes situations d'intégration. Ceci est une propriété clé qui explique l'introduction des antennes imprimées dans les applications de la communication mobile. Cependant, cette technologie répondant bien aux besoins de notre application. Donc, la conception des antennes doit répondre à des compromis en termes de performances et de complexité de réalisation.

Dans la pratique, les formes des éléments rayonnants les plus souvent utilisées sont le carré, le rectangle, le disque et l'anneau. Des géométries plus élaborées sont toutefois employées pour répondre à des contraintes spécifiques sur l'antenne (en particulier pour générer de la polarisation circulaire).

I.9 Principe de fonctionnement :

Pour expliquer le fonctionnement d'une antenne imprimée ou planaire résonnante, une approche similaire consiste à considérer que ce sont à la fois les courants surfaciques sur le patch et le plan de masse qui rayonnent Une deuxième méthode consiste à voir le patch comme une ligne micro ruban tronquée à ses extrémités. Le générateur est équivalent à une source de

courant qui va générer un champ électrique dans la cavité. Le patch agit comme une capacité qui va stocker le champ: c'est le modèle de la cavité (Quatre murs latéraux magnétiques et deux murs horizontaux électriques).

Le rayonnement existe à cause de la fuite du champ électrique qui existe entre les bords du patch et le plan de masse. Si la longueur du patch L est approximativement égale à la moitié de la longueur d'onde dans le diélectrique ($\lambda g/2$), cette longueur est résonante et l'on obtient un transfert de puissance maximal à l'antenne. C'est le mode d'ordre 1 ou à fréquence de résonance fondamentale du patch (si L > W avec W largeur du patch), le rayonnement à l'infini est effectif car le champ électrique sous la ligne et à ses deux extrémités se trouve en opposition de phase (Figure I.13). Une valeur approchée qui permet un dimensionnement rapide est $L = 0{,}49\ \lambda g$. [6]

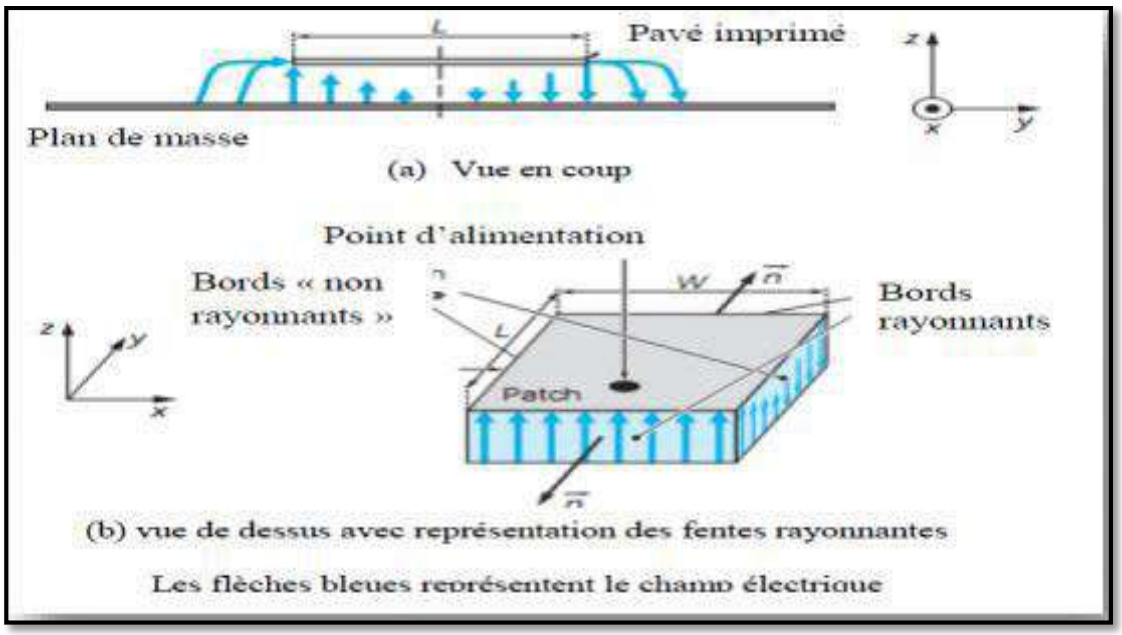


Figure 1.13 : Distribution de champ dans une antenne patch. [6]

I.10. Critères de Choix du substrat :

La conception des antennes imprimées dans le domaine des ondes millimétriques est guidée par les critères suivants, pour le choix dusubstrat :

- Possibilité d'excitation par onde de surface.
- Effets de la constante et de la tangente de perte diélectrique sur la dispersion.
- Importance des pertes par diélectrique et par conducteur.
- Anisotropie dans le substrat.
- Effets de l'environnement tels que la température, l'humidité, …etc.
- Cout de fabrication.

- Conditions mécaniques: Physiquement, le matériau doit résister aux contraintesmécaniques, conserver sa forme originale.

Son facteur d'expansion doit être voisin de Celui de la métallisation, car il est confronté à de fortes températures lors des soudures. Enfin, son état de surface doit être le plus parfait possible.

➢ En hyperfréquences, les caractéristiques principales d'un substrat sont :

- L épaisseur h.
- La constante diélectrique.
- Le coefficient de dilatation thermique (en ppm/°C).
- Le facteur de dissipation (tangente delta).
- La conductivité thermique (en W/m. °K). [7]

I.11 Les différentes formes d'antenne batch :

L'Antenne patch peut prendre plusieurs formes qui peuvent être rectangulaire, carrée, circulaire ou simplement un dipôle. Ces formes sont les plus courantes car elles présententune grande facilité d'analyse et de fabrication, mais également un diagramme de rayonnement très intéressant [17]. La figure suivante montre ces différentes formes :

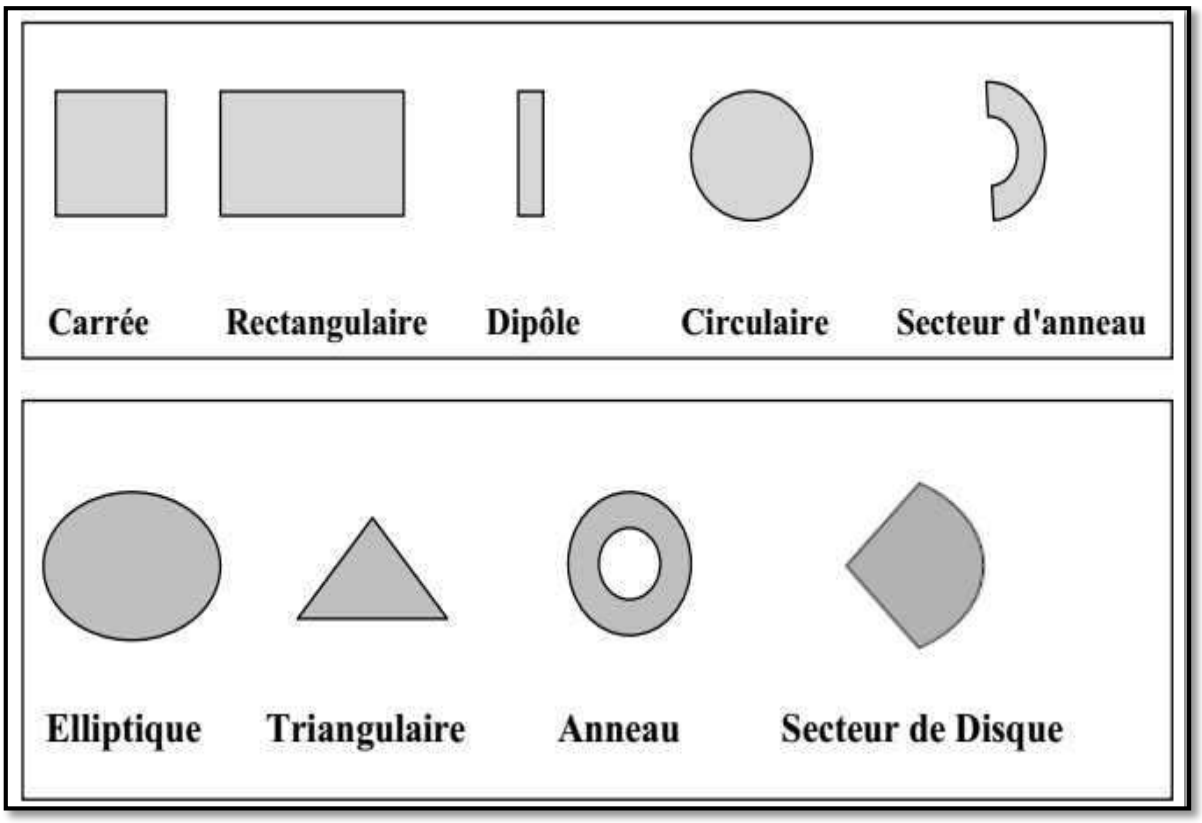


Figure I.14: Différentes formes d'antennes patch. [17].

I.12. Méthodes d'alimentation :

L'antenne imprimée peut être alimentée de plusieurs façons. Les quatre méthodes les plus utilisées sont Figure (I.15) :

I.12.1 L'alimentation par ligne micro ruban :

Dans ce cas d'alimentation, on relie une ligne micros trip au patch (figure I.15.a). Cette ligne lui amène de l'énergie. Il existe ce pendant un inconvénient dans ce type d'alimentation vu qu'elle génère un rayonnement parasite.

I.12.2L'alimentation par une sonde coaxiale :

Un connecteur standard (SMA) est soudé au plan de masse. Ce dernier est perforé afin de permettre à l'âme centrale d'être reliée au patch en traversant le substrat diélectrique (figure I.15.b). Donc l'énergie est amenée par guide coaxiale. Ce genre d'antenne est facile à fabriquer, elle génère de faible rayonnement parasite et possède une faible bande passante, mais comme inconvénient, elle est difficile à modéliser.

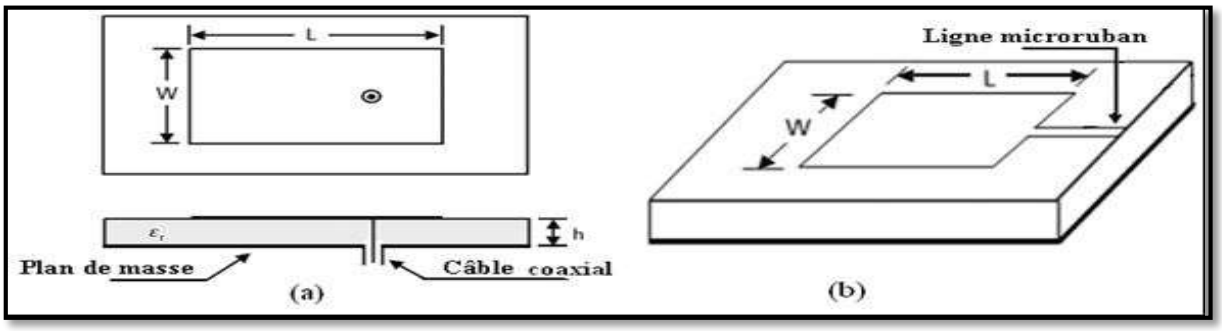
I.12.3 L'alimentation par fente (ou par ouverture) :

Le transfert d'énergie de la ligne l'élément se fait par couplage depuis la ligne à travers une fente (figure I.15.c). C'est une méthode dont le positionnement des différents éléments patch, fente, ligne micro ruban est très délicat.

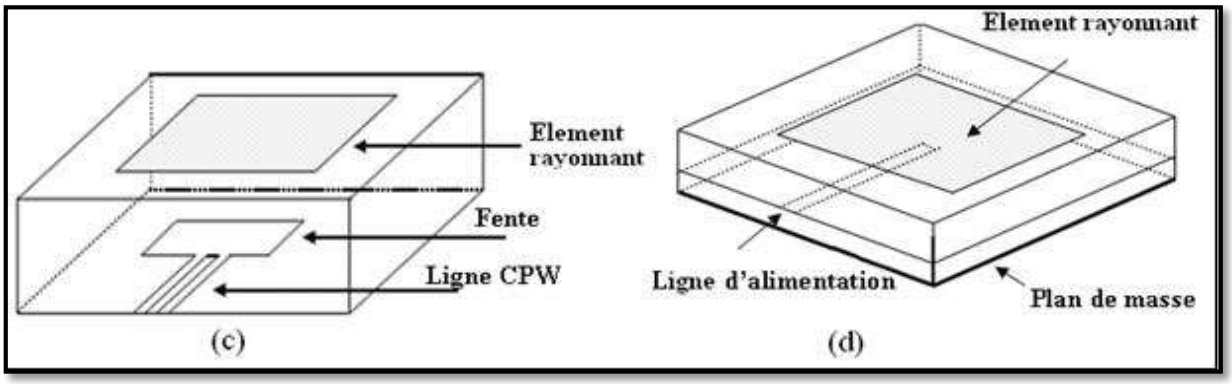
I.12.4 Alimentation utilisant le couplage par proximité :

Le principal avantage de cette technique d'alimentation est qu'elle élimine le rayonnement parasite de l'alimentation et fournit une bande passante élevée due à l'augmentation globale de l'épaisseur de l'antenne. Ce système offre aussi le choix entre deux milieux diélectriques, l'un pour le patch et l'autre pour la ligne d'alimentation afin d'optimiser les performances de l'antenne. L'adaptation peut être obtenue en contrôlant la profondeur de la ligne d'alimentation sous le patch et la largeur du patch.

Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories avec contact Figure (I.15.a) et (I.15.b) et sans contact Figure (I.15.c) et (I.15.d). Dans les méthodes avec contact, le courant radio fréquence (RF) alimente directement l'antenne en utilisant un élément de connexion.
Dans les techniques sans contact, le couplage de champ électromagnétique garantit le transfert de la puissance entre la ligne micro ruban et l'élément rayonnant. [8]



(a) **:**par sonde liée à un câble coaxial. (b) **:**par ligne micro ruban.

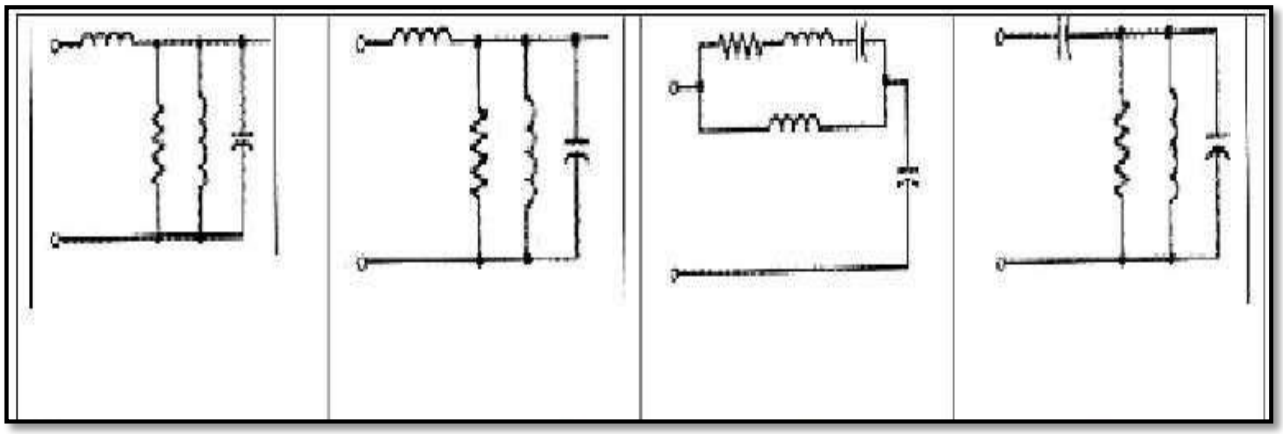


(c) **:** par fente CPW (coplanar wave guide) (d) **:** par couplage électromagnétique.

Figure I.15 : Alimentation d'antenne imprimée. [8]

I.12.5 Circuits équivalents des lignes d'alimentation :

La figure (I.16) suivante donne des circuits équivalents RLC dont les équations différentielles peuvent être trouvées pour différentes types d'alimentations. [8]



a) Ligne de transmission micro ruban. **b)** Sonde coaxiale. **c)** L'ouverture couplée. **d)** Couplage à Proximité.

Figure 1.16 : Les circuits équivalente de différentes méthodes d'excitation. [8]

I.12.6 Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation :

Le tableau suivant fait la comparaison entre différentes techniques d'alimentation :

Caractéristique	Alimentation par la ligne micro ruban	Alimentation coaxial	Alimentation couplée par ouverture	Alimentation Couplée par proximité
Rayonnement parasite	Plus	Plus	Moins	Minimum
Fiabilité	Meilleur	Pauvre à cause de soudure	Bon	Bon
Facilite de fabrication	Facile	Soudure et forage requis	Alignement	Alignement requis
Adaptation d'impédance	Facile	Facile	Facile	Facile
Bande passante	2-5%	2-5%	2-5%	13%

Tableau I.3 : Comparaison entre les différentes méthodes d'alimentation. [8]

I.13. Les applications des antennes patchs :

- Les télécommunications par satellites.
- La commande et contrôle.
- La télémesure par missile.
- Les équipements portatifs.
- Les éléments d'alimentation dans les antennes complexes.
- Les antennes d'émission utilisées en médecine.
- Les récepteurs des satellites de navigation. [8]

I.14 Les avantages et les inconvénients des antennes patchs :

➢ L'antenne micro ruban présente de nombreux avantages par rapport aux antennes micro ondes classiques, on peut citer entre autres :

- Faible poids, en cambrement réduit, faible profile et structure plane.
- S'adapte facilement aux surfaces planes et non planes.
- Facile à fabrique renommasse en utilisant les techniques des circuits imprimés dont lefaible coût.

- Facile à intégrer avec les circuits MMIC sûr un même substrat.
- Polarisation linéaire et circulaire possibles.
- Réseaux d'alimentation et d'adaptation fabriqués simultanément avec l'antenne.
- Antennes multi ban des multi polarisations possibles.

➢ Toutefois, elle présente certains inconvénients limitant son efficacité à savoir:

- Bande passante étroite.
- Faible gain.
- Supporte uniquement des faibles puissances.
- Faible efficacité de rayonnement.
- Faible pureté de polarisation.

➢ Pour y remédier à ces inconvénients plusieurs travaux de recherches ont été menés et ont boutis à des progrès considérables améliorant les performances de ces antennes**.**[14]

I.15. Conclusion :

La technologie microbande a permis tout un développement d'une nouvelle technologie dans le domaine des antennes microbandes, grâce à la miniaturisation des circuits ainsi que l'accroissement de leur fréquence de fonctionnement, elle a donné aussi, naissance à de nombreuses structures planaires de transmission de l'information. De par leur encombrement réduit, leur poids et leur facilité de fabrication empruntée à la technologie classique des circuits basse fréquence, ces structures sont largement exploitées dans le milieu industriel. On conclure ; Dans ce chapitre nous avons dresse un état de l'art sur les antennes : le rayonnement des antennes, les différents paramètres des antennes, en suite on a donne quelques types d'antennes qui sont couramment utilisées dans les objets communicants, et enfin le rôle des antennes. Ce chapitre a également permis de présenter l'évolution technologique des antennes imprimées, on a donné une petite description, quelques techniques d'alimentations, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Références bibliographique I :

[1]: Odile Picon et coll. ; "Les antennes Théorie, conception et applications"; DUNOD, Paris, 2009, ISBN978-2-10-054245-1, préface de Maurice Bellanger.

[2]: Mr KHOURIBGA Antenne patch, coure universitaire, Ecole nationale de science applique de, 2014/2015.

[3]: BOYER Alexandre. « Antennes »Support de cours de 5eme année réseau et Télécom, promo. octobre2011

[4]: «AHMED BENOMAR», Etude des Antennes à Résonateurs Diélectriques. Application aux Réseaux de Télécommunications, Thèse de DOCTEUR, Université DE TLEMCEN Abou Bekr Belkaid, 2015.

[5] : Abderrahim Okba. Conception et réalisation de rectennas utilisées pour la récupération d'énergie électromagnétique pour l'alimentation de réseaux de capteurs sans fils. Micro et nano technologies /Micro électronique. Université Toulouse 3 – Paul Sabatier, 2017. Français. fftel-01705139v1f.

[6] : Gasmi naamatallah ; «contribution à l'étude d'un réseau d'antennes imprimées pour les télécommunications son fil » ; Mémoire de Master ; université Mohamed khider Biskra ; 2013.

[7] : Soltane Samia ; « Etude et Caractérisation d'antennes imprimées pour système ultralarge bande » ; Mémoire de MAGISTER ; université Mohamed khider- Biskra ; 17/11/2015.

[**8**] : MANSOURI Assia et BOUAYED Hafida<<Étude et Simulation d'une Rectenna, Application à la Récupération d'énergie RF>>, mémoire master, Université Abou bakr Belkaïd– Tlemcen. 20 /06 / 2017.

[**9**]: Mr BOUKHELKHAL NOURELHOUDA et Mlle SAFIELDINE HAYET « Etude et simulation d'une antenne Patch par le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS», Mémoire de Fin d'étude, Université yahia fares de Médéa. 2015/2016

[**10**]: Mlle ATTI Bakouche et Mlle MEKAOUCHE Magdouda «L'effet des caractéristiques de l'antenne patch sur sa directivité», Mémoire de Fin d'étude, Université A. Mira de Bejaia promo 2013.

[**11**]: Dr Youssef DAHER, Mémoire, Antenne, Cours universitaire, cour universitaire, Université Libanaise Faculté de Génie Branche 1.

[**12**] : Salima mourdjani. Etude et modélisation des antennes Patch, Université de Médéa Dr. Yahia Férès.2012

[**13**] : Mlle ZEGHAR Selma et Mlle MECHTI Zahia «Etude et simulation d'une antenne microbande dans la bande wifi», Mémoire de Fin d'étude, Université yahia fares de Médéa.

[**14**] : Mlle. Slimani Amina et Benyahia Islam «INFLEUNCE DE CHANGEMENT DES PARMTRES D'UNE ANTENNE DE TYPE: PATCH-CUCLAIRE-PROBE-FED SURCES CARACTERSTIQUES »,Mémoire de Fin d'étude, Université yahia fares de Médéa

[**15**] : Touati Mohamed Houssem Eddine, Conception et Simulation d'une antenne micro-ruban circulaire, Université Mohamed Khider Biskra,5 juin2014.

[**16**] : Salima mourdjani. Etude et modélisation des antennes Patch, Université de Médéa Dr. Yahia Férès.2012.

[17] : M.GASMI FAROUK, M.DEHBI MOHAMED<<Conception et simulation d'une antenne micro ruban de formes spécifiées >>, Mémoire de Fin d'étude, Université yahiafares de Médéa Promo 2017

CHAPITRE II :

La Rectenna

II.1.Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation des systèmes utilisés pour la récupération d'énergie électromagnétique, appelés « RECTENNA ». Pour ce faire, nous introduirons dans un premier temps, la notion de transmission d'énergie sans fil (TESF), nous dresserons l'histoire de la TESF et l'impact des évolutions technologiques sur celle-ci. Ensuite, nous balayerons les deux techniques existantes de récupération d'énergie électromagnétique et nous nous attarderons sur celle qui nous intéresse, à savoir la récupération de l'énergie électromagnétique en champ lointain.

Le transfert d'énergie électromagnétique sans fil consiste à transférer de l'énergie RF d'un point à un autre à travers l'espace libre.

Ce transfert consiste d'abord, à convertir l'énergie électrique continue en énergie RF moyennant une source RF (klystron, gyrotron, magnetron ...). Ensuite cette énergie RF est transmise par une antenne d'émission à travers l'espace libre. Enfin, un système de rectenna (rectifying antenna), composé par une antenne de réception suivie d'un circuit de conversion RF-DC permet de capter et convertir cette énergie RF en énergie électrique.

De plus, l'énergie que l'on considère à ces fréquences doit être redressée si l'on souhaite charger une batterie capable de délivrer une tension continue. Les diodes Schottky sont les éléments clefs pour travailler sous ces contraintes, et la réussite d'un tel projet dépend étroitement de leur développement et de leur disponibilité. La cellule de redressement élémentaire dans le domaine de l'énergie sans fil s'appellera alors ≪rectenna≫, contraction de ≪rectifying antenna ».

Nous allons introduire 1' architecture de base d'une Rectenna, et son principe de fonctionnement, et sa relation avec l'efficacité de conversion, puis les différentes architectures du redresseur utilisé .Après, on va discuter de la densité de puissance radiofréquence disponible.

II.2. Historique de la TESF :

La première expérience de transmission d'énergie sans fil fut réalisée par le physicien américain Nikola Tesla à Colorado Springs, en 1899. Il s'intéressa spécialement au phénomène de résonnance et essaya de l'appliquer à la TESF. Il avait imaginé utiliser les ondes électromagnétiques pour acheminer l'électricité n'importe où dans le monde, sans lignes. Il construisit une énorme bobine, résonnant à 150 KHz et alimentée avec une puissance de 300 KW, en haut d'une tour. Cependant, ils n'existent malheureusement pas de résultats clairs sur la puissance rayonnée et sur celle reçue loin de la source.

En 1969, Peter Glaser présente le concept de SPS (Solar Power System). Ce projet pourrait présenter une alternative aux problèmes énergétiques que connaît la planète, mais aussi comme source d'énergie propre et écologique. Le système issu de ce projet comporte un satellite en orbite géostationnaire qui capte l'énergie solaire, cette énergie solaire est convertie en énergie microonde à 2.45 GHz et envoyée sur terre. Les densités de puissance mises en jeu au niveau des antennes de réception sont très importantes, elles sont de l'ordre de100 W/m².

En 1975, l'expérimentation terrestre de Gold stone menée par Raytheon représente un tournant historique dans le domaine de la TESF. Elle a contribué de manière considérable à la validation du concept et à la crédibilité du projet SPS. Avec un système pilote, une puissance continue de 30 KW a été récupérée et un rendement global de 54% a été mesuré et certifié. La distance entre les antennes d'émission et de réception est de 1.6 Km.

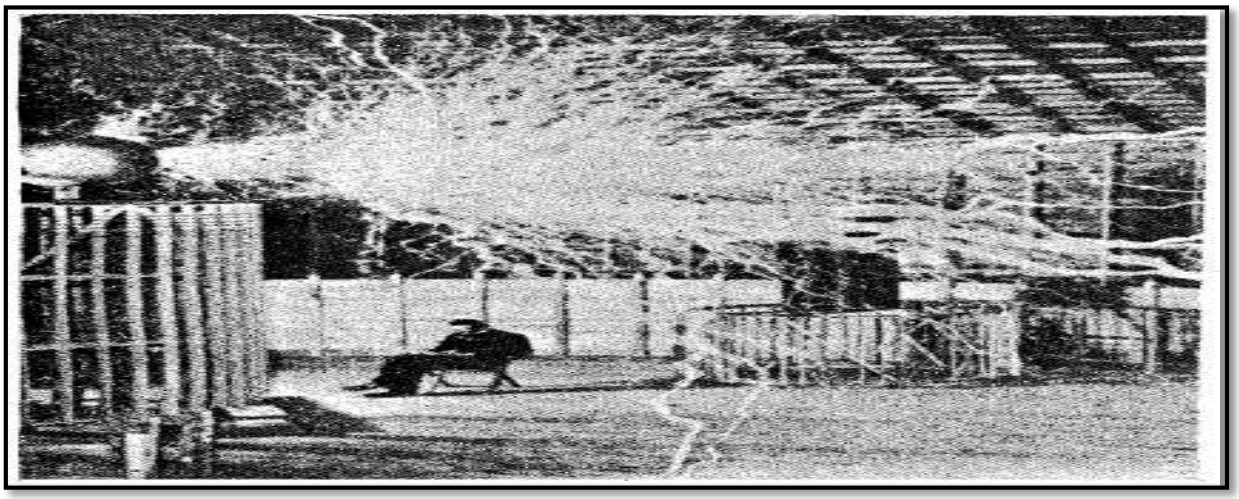


Figure II.1: Transmission d'énergie par ondes radio - Nikola Tesla dans son laboratoire de Colorado.[1]

A partir de 1994, le laboratoire d'Electronique, d'Energétique et des Procédés de l'université de la Réunion, en collaboration avec l'équipe japonaise de l'ISAS, s'est lancé dans un projet d'envergure qui consistait à étudier la faisabilité d'un transport d'énergie sans fil pour alimenter l'île de Grand Bassin, région qui est fortement accidentée et difficilement accessible. La puissance d'émission était de 800 W sur une distance de 40 m. En réception, une rectenna composée de 2376 antennes dipôles réparties sur une surface de 11.76 m² a été utilisée pour collecter et convertir une partie de l'énergie RF émise. La densité de puissance au niveau des antennes de réception est estimée à une dizaine de W/m².

Trois lampes de 9 W furent allumées grâce au dispositif développé, ce dernier présentait un rendement global d'environ 5%. [1]

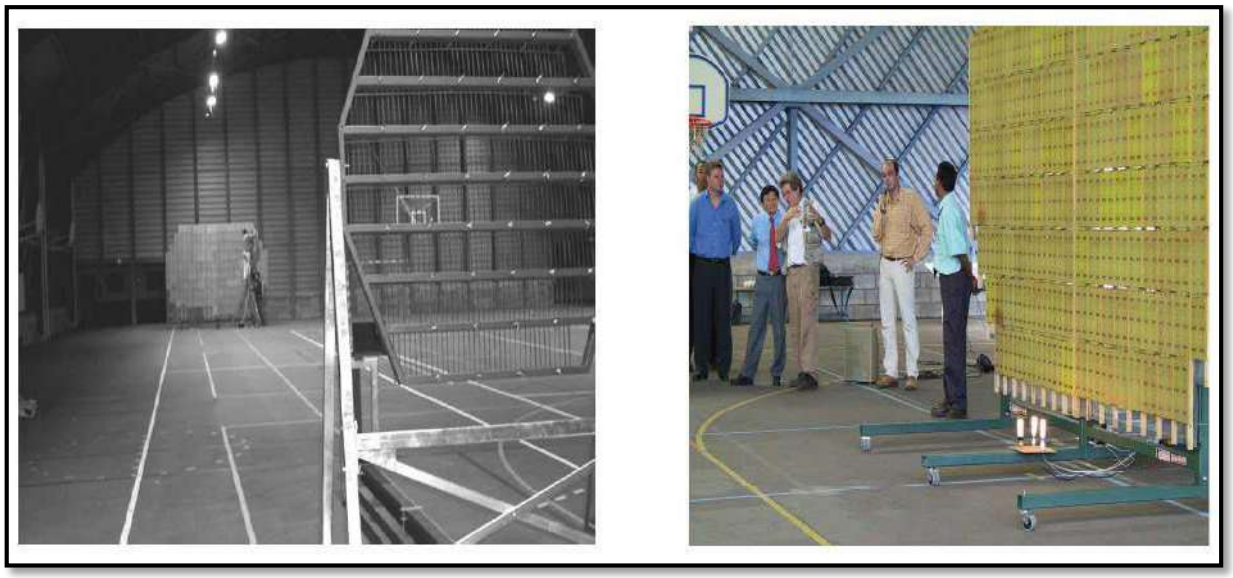


Figure II.2:Démonstrateur du Grand Bassin - Ile de la Réunion. [1]

II.3.Spectre électromagnétique :

L'objectif est de déterminer le niveau de puissance récupérable le plus élevé et Plus stable, par gamme de fréquence. En France, l'Agence nationale des fréquences (ANFR) est responsable de la planification et de la gestion de l'utilisation du spectre. Chaque Les applications nécessitant l'émission d'ondes électromagnétiques doivent être autorisées par l'ANFR, Il lui attribue une bande de fréquence et définit le niveau de puissance requis le bon fonctionnement de l'application afin qu'elle n'interfère pas avec le fonctionnement autres équipements et respecter les modèles établis pour des considérations de santé publique. Exister Les fréquences vont de 8 kHz à 65 GHz, une grande partie du spectre (plus de 60 %) est réservé à l'Autorité de régulation de la défense et des communications Electronique et Postale (ARCEP).Les bandes ISM (Industrial,ScientificandMedical) sont des bandes de fréquences qui ne sont pas soumises à des réglementations nationales et qui peuvent être utilisées gratuitement et sans autorisation dans le cadre d'applications industrielles, scientifiques ou médicales. Le reste du spectre est utilisé par des compagnies privées pour la télédiffusion ou les télécommunications. [11]

II.4. Les systèmes de récupération d'énergie radio fréquence :

Un système de récupération d'énergie peut être décomposé en 5 blocs comme le montre la Figure(II.3), l'objectif principal de ce système est de fournir l'énergie nécessaire au capteur afin qu'il puisse fonctionner [2].

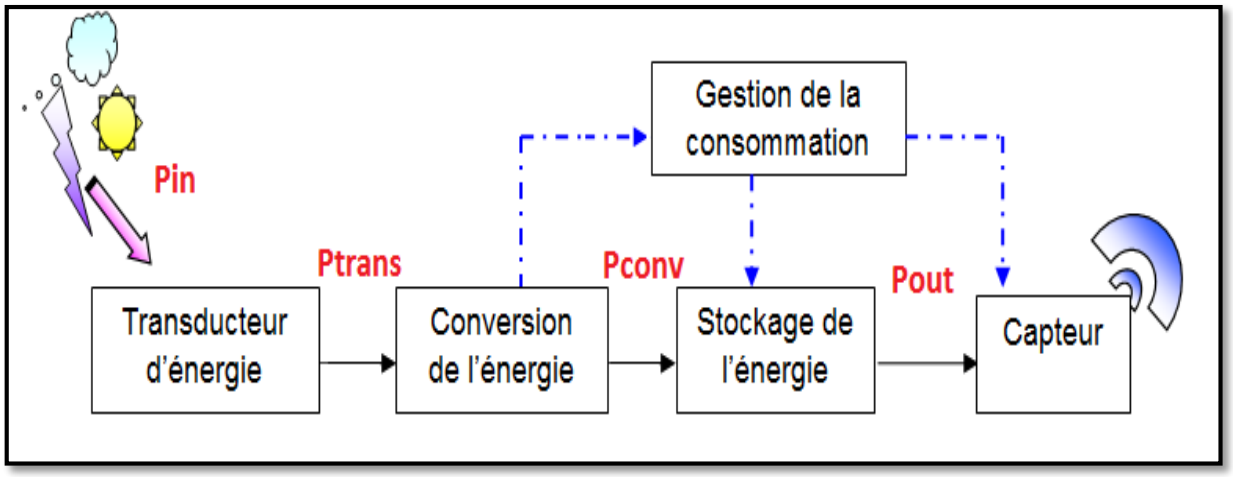


Figure II.3 : Architecture globale d'un récupérateur d'énergie.[2]

Le transducteur d'énergie est le premier élément de la chaine 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.
- Conversion DC-DC entre le convertisseur et l'élément de stockage.

- On peut distinguer deux grandes techniques de transfert d'énergie:

1. Le transfert non radiatif, c'est-à-dire en champ proche par couplage magnétique inductif ou résonnant, ce qui implique l'utilisation de bobines.
2. Le transfert radiatif, c'est-à-dire en champ lointain, ce qui implique l'utilisation d'antennes.

En champ proche, les systèmes à basse fréquence (135 kHz et 13.56 MHz) utilisent un couplage capacitif ou inductif afin d'obtenir la puissance requise pour pouvoir communiquer (système RFID). A ces fréquences, la longueur d'onde λ est très grande par rapport à la distance d'alimentation (< 1 cm pour couplage capacitif et < 1 m pour couplage inductif). Cependant, pour des distances de transmission dépassant quelques mètres, le transfert de puissance sans fil utilise généralement une propagation de l'énergie par rayonnement électromagnétique (zone de champ lointain).

- Dans ce travail, nous intéresserons uniquement à l'étude de la partie réception, appelée aussi Rectenna.

II.4.1. Les types du Transfer d'énergie par rayonnement :

- Dans le cas du transfert d'énergie par rayonnement, deux scénarios existent :

II.4.1.1. Le premier scénario est le transfert de puissance à la demande :

Dans ce cas, une source dédiée est utilisée dans l'émission, l'antenne d'émission est généralement directive, et la rectenna est placée en ligne de mire à l'opposé de l'antenne d'émission. L'avantage de ce type de transfert d'énergie est la connaissance préalable de la fréquence, de la direction d'arrivée de l'onde électromagnétique et de sa polarisation. A partir de ces informations, la position de la redresseuse et la densité de puissance reçue peuvent être estimées à l'avance. D'autre part, cela oblige l'antenne de réception à être placée à un endroit précis pour recevoir une densité de puissance maximale. Les alimentations d'étiquettes à distance sont un exemple de type WPT. La Figure 2.4 montre quelques applications qui utilisent WPT. Dans ce cas, l'approche consisterait à concevoir une rectenna mono bande avec une antenne directionnelle avec la même polarisation que l'antenne d'émission pour maximiser l'efficacité. Par exemple, dans un réseau de 32 rectennas utilisant des patchs a été utilisé pour alimenter des capteurs pour des applications de surveillance de l'état structurel. L'antenne est très directionnelle, atteignant un gain maximum de 24 dB à 5,8 GHz.[3]



Figure II.4 : Application du WPT.[3]

II.4.1.2 Le deuxième scénario est la récupération de l'énergie électromagnétique ambiante EH :

Par exemple, cette situation trouve sa place dans les zones urbaines où l'énergie électromagnétique est de plus en plus disponible. Dans ce cas, l'énergie électromagnétique peut provenir de n'importe quelle direction (Figure II.5). L'avantage d'EH est la liberté de positionnement de la rectenna. D'autre part, en raison des limites d'exposition aux champs électromagnétiques imposées par la loi et de la nature non directionnelle de l'antenne d'émission, la densité de puissance disponible pour la réception est faible. De plus, la densité de puissance dépend également de l'environnement. C'est le plus grand défi auquel sont confrontés les systèmes de récupération d'énergie électromagnétique. Si l'on ajoute les limitations techniques des composants électroniques, il est difficile d'atteindre des rendements très élevés. [3]

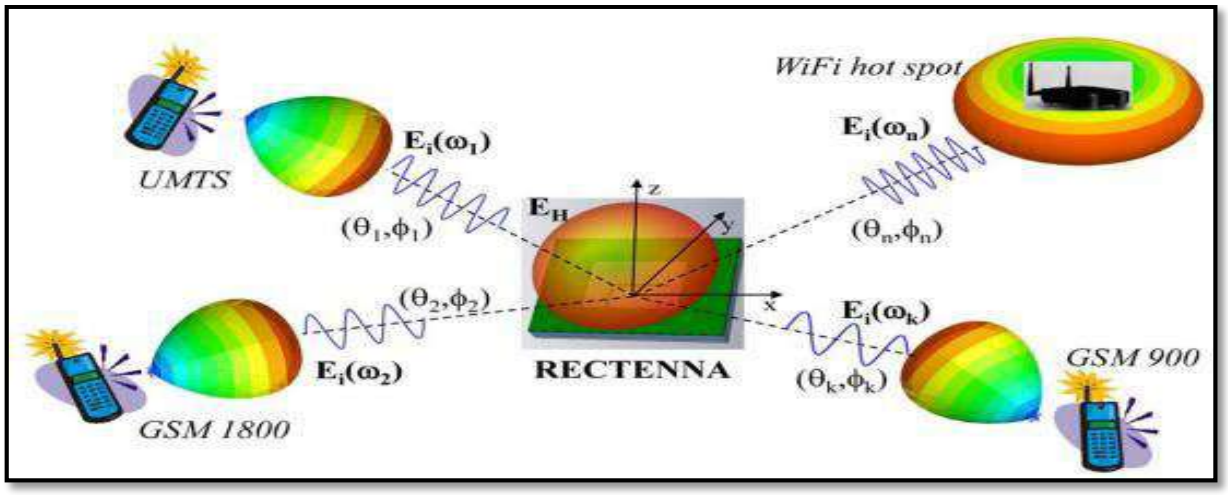


Figure II.5 : Récupération d'énergie électromagnétique ambiante. [3]

II.5.Rectenna :

II.5.1.Historique :

Les premiers travaux sur les rectennas ont été focalisés dans la bande ISM à 2.45 GHz, la plupart de ces travaux étaient destinés pour des applications spatiales. Le choix de cette fréquence n'était pas fortuit, il s'explique principalement par la faible atténuation que présente cette fréquence à travers l'atmosphère. En 1960, Raytheon avait développé une rectenna à 2.45 GHz. Le circuit mis au point contient une antenne dipôle demi-onde associée à un circuit de conversion RF-DC contenant une diode simple connectée à une charge résistive. Un des paramètres clés des circuits rectennas est le rendement de conversion. Il est défini le plus souvent comme étant le rapport entre la puissance continue récupérée ou mesurée aux bornes de la charge et la puissance RF reçue par l'élément rayonnant. Ce rendement de conversion n'a cessé de croître depuis les premiers travaux qui ont été conduits dans ce domaine. Cependant, le rendement le plus important fut atteint par Brown chez Raytheon en 1977. W.C. Brown avait utilisé une diode Schottky en Arséniure de Gallium-Platine (GaAs-Pt), une antenne dipôle en aluminium et une ligne de transmission pour atteindre un rendement de conversion de 90.6% avec une puissance d'entré de 8 W.

En1982, W.C. Brown et J.F. Triner ont développé une version imprimée du circuit à 2.45 GHz,Gravée sur un film mince. Le rendement obtenu était de 85%.

En 1991, K. Chang et T.W. Yoo ont développé une rectenna intégrée à 35 GHz avec un rendement de 33 % pour des puissances d'entrée de l'ordre de 60 mW. Le circuit est constitué d'une antenne dipôle et d'une diode Schottky DMK6606 (Alpha Industries) montée en parallèle. A la même fréquence, d'autres travaux ont été rapportés par la suite dans la littérature, notamment une rectenna associant un réseau d'antennes et une diode Schottky

MA4E1317 montée en série. Le circuit atteint un rendement de 35 % lorsque la densité de puissance est de 30 mW/cm². Le passage de la fréquence de 2.45 GHz, traditionnellement utilisée, à 35 GHz s'explique par le souci d'avoir des structures qui occupent moins d'espace et de pouvoir ainsi mettre plus de rectennas sur la même surface. Cependant, les composants utilisés pour la génération et la conversion d'énergie à cette fréquence sont moins efficaces et Coûtent plus cher. Les inconvénients rencontrés à 35 GHz, et qui ont été cités ci-dessus, ont conduit les Chercheurs à utiliser une nouvelle fréquence à 5.8 GHz. Cela permet de réduire les dimensions des circuits par rapport à la fréquence 2.45 GHz, Sans pour autant perdre en efficacité.

En 1992 a été rapporté la première rectenna dans la bande C à 5.87 GHz avec 80% de rendement.

La rectenna a été mesurée à l'intérieur d'un guide d'onde avec une puissance d'entrée de700 mW. Le circuit utilise un dipôle imprimé et une diode Schottky. D'autres travaux à 5.8GHz ont été rapportés par la suite. En 1998, J.O. McSpadden et al. Ont développé une rectenna avec un dipôle imprimé à 5.8 GHz, un rendement de 82% a été mesuré. La rectenna est développée en technologie CPS (Coplanar Strip-line) et utilise une diode Schottky(MA40150-119). [1]

II.5.2. Définition :

L'élément de base d'un système de récupération d'énergie sans fil est la rectenna "Rectenne". Une antenne redresseuse se compose essentiellement d'une antenne de réception Un circuit redresseur qui convertit l'énergie micro-onde en énergie DC directe. Habituellement, les rectennas sont conçues à l'aide de la technologie d'impression, pour des raisons de coût, Compatibilité et facilité de mise en œuvre. [4]

Le circuit de redressement est généralement composé d'un filtre d'entrée HF, suivi par l'étage de redressement et enfin un filtre BF (Figure II.6).

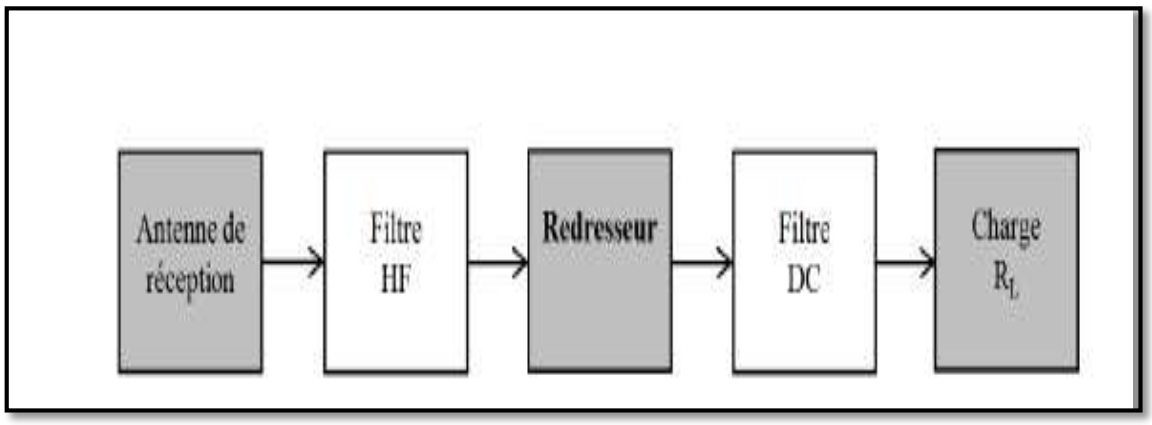


Figure II.6 : Schéma bloc d'une rectenna.[4]

A. Le filtre d'entrée HF a pour rôle de :

• Effectuez l'adaptation entre l'antenne et le circuit redresseur à la fréquence de fonctionnement et à la puissance RF nominale donnée.

• Bloque les harmoniques des circuits redresseurs

B. Le rôle du filtre de sortie BF est :

•Adaptation entre le circuit redresseur et la charge pour une puissance continue nominale donnée.

• Filtre les harmoniques HF, ne laissant que la composante continue.

C. Le bloc redresseur effectue la conversion RF/DC :

Selon l'application, plusieurs techniques peuvent être utilisées :

• Convertisseurs à tubes sous vide (convertisseurs cyclotron, CWC) : utilisés pour les hautes puissances, comme le transfert de puissance sans fil.

• Convertisseurs à base de transistors : pour les fréquences inférieures au GHz et les niveaux de puissance modérés.

• Convertisseurs à base de diodes Schottky : pour des fréquences comprises entre 800 MHz et plusieurs GHz et pour des niveaux de puissance et de tension faibles. [5]

II.5.3. Schéma de principe :

Tout d'abord, l'antenne de réception reçoit l'énergie micro-onde et la transmet à circuit convertisseur. Un redresseur composé d'une ou plusieurs diodes convertit alors Cette énergie RF est convertie en énergie électrique continue, qui est ensuite transférée à une charge résistive RL. Cependant, en plus de générer de l'énergie DC, les redresseurs génèrent également des sous-harmoniques Supérieur, impopulaire. La rectenna contient également deux filtres HF et DC, situés des deux côtés et l'autre extrémité du redresseur. Le filtre HF à l'entrée est un filtre passe-bas qui remplit deux les fonctions. Il filtre les harmoniques générés par les diodes pour éviter qu'elles ne soient rayonnées Avec l'antenne, il assure une adaptation conjuguée entre l'antenne et le circuit de conversion pour un transfert de puissance maximal entre les deux. Quant au filtre de sortie DC, C'est un filtre passe-bas qui bloque tous les composants RF, y compris de base et permet uniquement de transmettre les composants DC à la charge**.** La charge résistive à l'autre bout de la rectenna modélise généralement l'impédance d'entrée du dispositif à alimenter.[11]

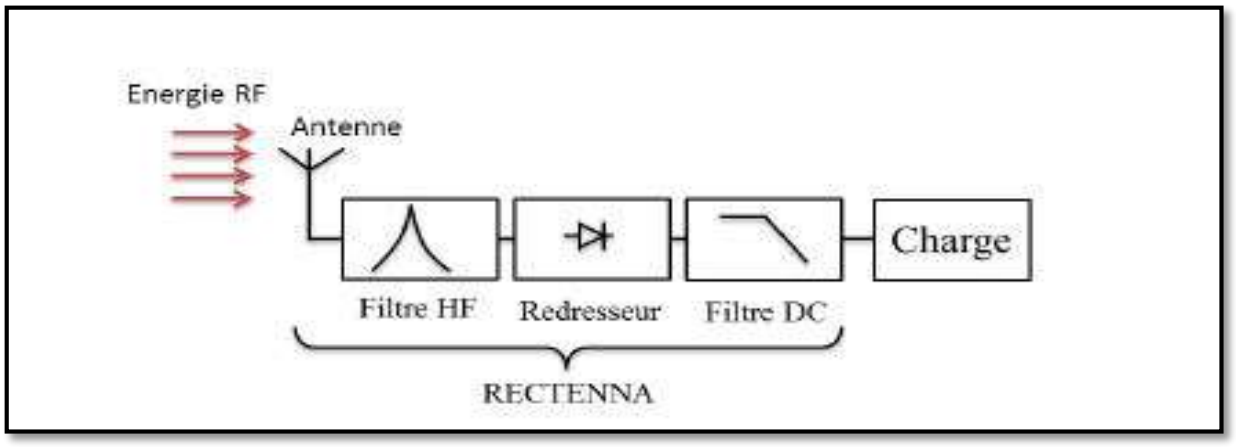


Figure II.7 : Structure d'une rectenna. [11]

II.5.3.1 Antenne de réception :

Le rôle de l'antenne est de convertir l'énergie électrique du signal en énergie L'électromagnétisme, ou inversement la conversion de l'énergie électromagnétique en énergie électrique. Une antenne émettrice est un appareil qui transmet de l'énergie entre l'émetteur et l'espace libre où cette énergie va se propager. Réciproquement, Une antenne de réception est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie des ondes Propagation dans l'espace jusqu'au dispositif récepteur. La polarisation de l'antenne est une caractéristique très importante dans la conception des rectennas et dans le cadre de la récupération d'énergie. [11]

II.5.3.2.Le filtre d'entrée HF :

Est situé entre l'antenne de réception et le circuit convertir. La ou les diodes des convertisseurs RF-DC génèrent non seulement de la puissance DC mais également des harmoniques d'ordre supérieur. Ces harmoniques réduiront Le fonctionnement des circuits, eux, n'est pas souhaitable et doit être empêché.

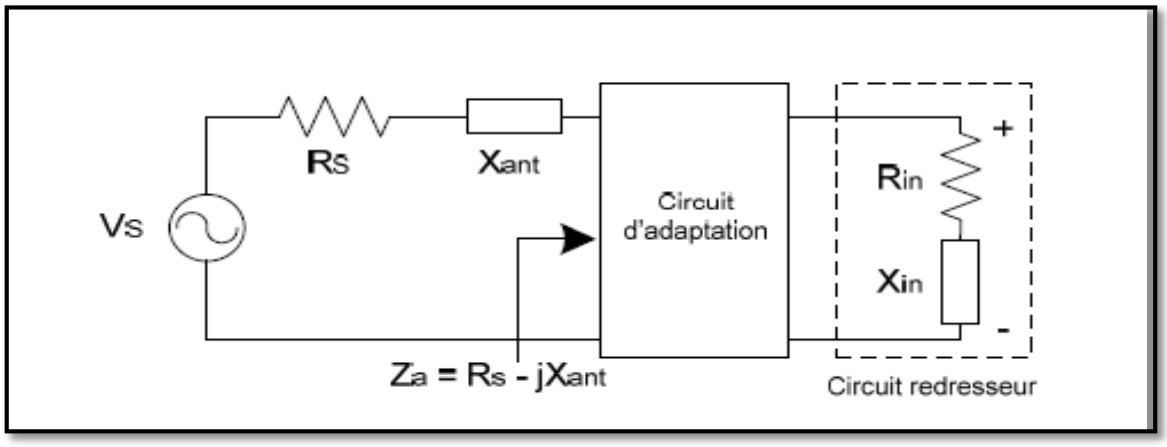


Figure II.8 : Adaptation du circuit redresseur à l'antenne. [11].

A. Adaptation des éléments localisés :

Il s'agit généralement d'un circuit LC en forme de L (bobine L et condensateur C). [11]

B. Adaptation des éléments distribués :

- **Adaptation par une simple ligne de transmission :**

Une simple ligne micro ruban, dont l'impédance caractéristique Zc et la longueur L restent à déterminer, est insérée entre l'antenne et le redresseur lui-même caractérise par une puissance et une charge résistive. [11]

- **Adaptation par deux lignes successives :**

La première ligne, avec une longueur L1 à déterminer, et avec une impédance caractéristique Zc1 choisie sert à ramener l'impédance Z redresseur à une valeur réelle Z réelle à l'entrée de cette ligne.

La deuxième ligne a une longueur L2 égale à λ/4. Il s'agit d'un transformateur d'impédance quart d'onde, et par conséquent, son impédance caractéristiqueZc2 est déterminée par :

$$\boldsymbol{Z_{c2} = \sqrt{(Z_{Antenne} * Z_{Réelle})}} \qquad \textbf{(II.1)}$$

- ✓ Ici, les contraintes de réalisation sont imposées sur la deuxième ligne. [11]

- **Adaptation par ligne et stub :**

Utilisez une ligne micro ruban de longueur L1 et un stub de longueur Lstub. Avoir A l'entrée de la droite de longueur L1, on a une admittance Yin dont la partie est égale à 1/Z antenne (en supposant que l'impédance de l'antenne est réelle). Par contre, le stub est en Le circuit ouvert doit ramener une admission imaginaire, qui annule la partie imaginaire du yin. Ici, la valeur de l'impédance caractéristique Zc1 de la ligne et la valeur du stub ne sont pas imposer. [5]

II.5.4. Redresseur de base :

Un redresseur est un circuit qui convertit un signal radiofréquence(alternatif) en un signal de fréquence nulle(continu)avec Les signaux des domaines temporel et fréquentiel pour (DC) sont représentés sur la Figure(II.9).Les redresseurs sont souvent utilisés dans les circuits de contrôle automatique de gain (AGC)ou circuit de commande de puissance, etc. Les diodes hautes fréquence sont au cœur des redresseurs ainsi que des composants passifs. Pour concevoir un redresseur efficace, Les concepteurs sont principalement concernés par la sensibilité à la tension des diodes et A propos de l'efficacité générale des diodes. La perte de retour du circuit redresseur est également Un facteur clé lors de la récolte de puissance pour une puissance de sortie maximale. [5]

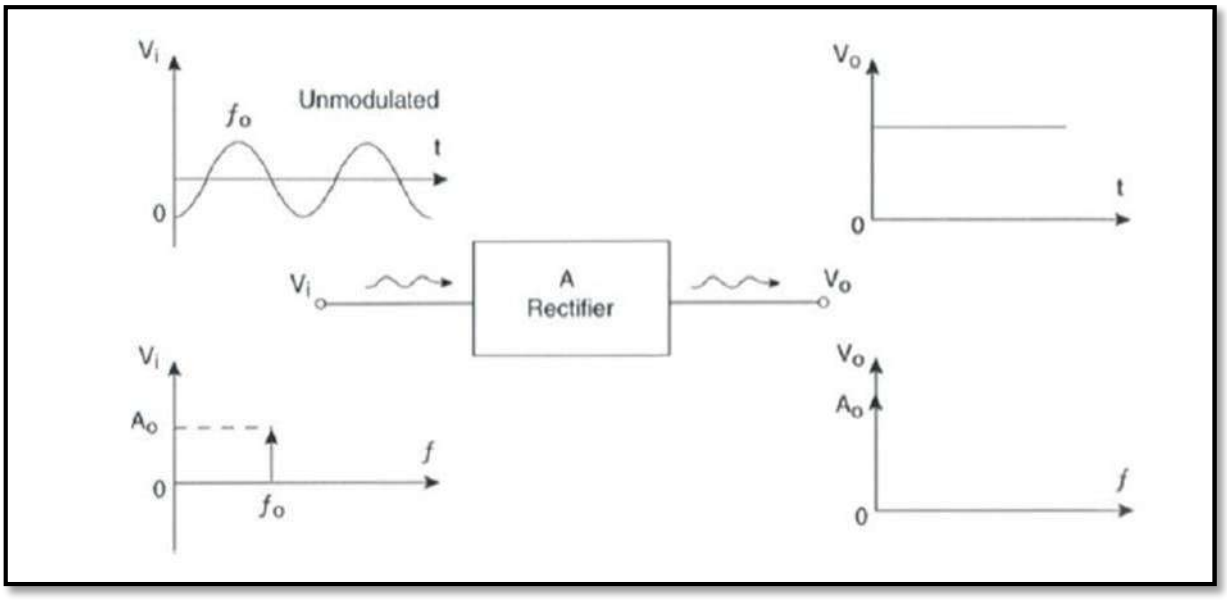


Figure II.9: Signaux avant et après Redressement. [5]

II.5.4.1.Diode Schottky :

Le circuit redresseur est basé sur une ou plusieurs diodes Schottky, qui utilisent un Jonction métal/semi-conducteur au lieu d'une jonction diode PN traditionnel. Pour la polarisation directe (environ 1mA), la diode Schottky a La plage de tension de seuil est de 0,15 V à 0,45 V. ils ont une période de transition faible, ce qui les rend rapides lors de la commutation. Les diodes Schottky que nous utilisons sont Optimisées pour fonctionner entre 915 MHz et 5,8 GHz, son modèle électrique équivalent est montré dans la figure (II.10) ci-dessous. [4]

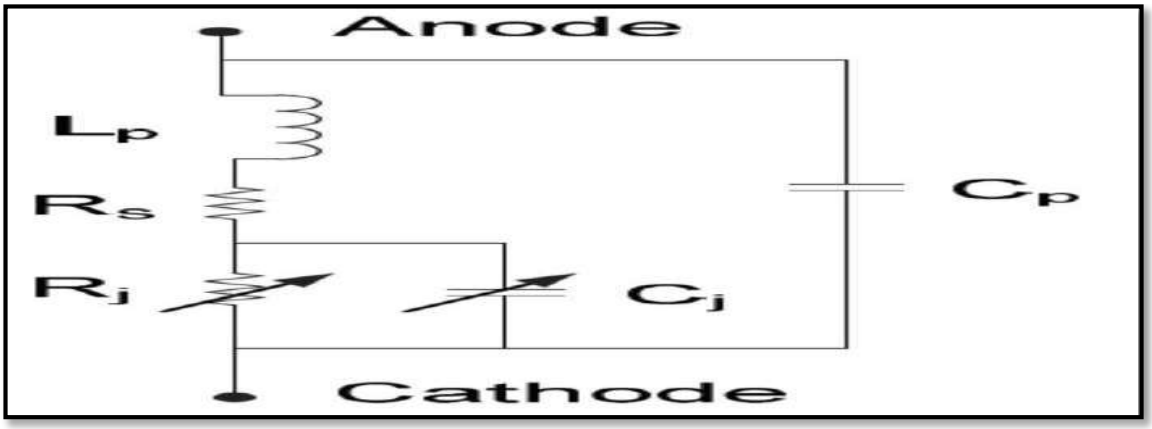


Figure II.10 : Modèle électrique équivalent d'une diode Schottky. [4]

Les diodes Schottky (du nom du physicien allemand Walter H. Schottky) sont Diodes avec des seuils de tension directe très bas et des temps de commutation très courts. Cela permet la détection de faibles signaux HF et hyperfréquences, Il est également utilisé pour sa capacité à permettre des passes d'intensité relativement élevée. Pour le redressement de puissance grâce à ses faibles pertes Joule Chutes de pression.

- Le modèle électrique est constitué d'une résistance série Rs, d'une capacité de jonction variable Cj et d'une résistance de jonction Rj. Le boîtier de la diode est modélisé par une inductance série Lp et une capacité parallèle Cp. Le courant Id parcourant la diode est donné par-là l'expression suivante:[4]

$$I_d = I_0\left(e^{\left(\frac{q}{N.K.T} * V_d\right)} - 1\right) \qquad \textbf{(II.2)}$$

✓ Où:

N: coefficient d'émission.

q: charge de l'électron (1.6 ´10-19*C*).

T: température du circuit (°K).

K: constante de Boltzmann (1.380662 ´10-23 *JK*-1).

V_d: Tension aux bornes de la diode.

- La capacité *Cd* de la diode représente les effets de stockage de charge de la jonction. Il existe deux expressions pour cette capacité selon que la jonction est polarisée en direct ou en inverse. En polarisation inverse, la capacité peut se mettre sous la forme : [4]

$$C_d = C_{j_0} * \left(1 - \frac{V_d}{P_b}\right)^{-M} \qquad \textbf{(II.3)}$$

✓ Où :

C_{j_0}: Capacité de jonction à polarisation nulle (pF).

Pb: Potentiel de jonction (V).

M: Coefficient de variation de jonction;

- En polarisation directe, la capacité s'écrit comme suit : [4]

$$C_d = tt * \frac{I_s.q}{N.k.T} * e^{\frac{q}{N.k.T} V_d} \qquad \textbf{(II.4)}$$

✓ Où : tt est le temps de transit.

II.5.4.2. Topologies du 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).

A. Topologie série :

Cette configuration, illustrée sur la figure (II.11) utilise une simple diode en série entre le filtre d'entrée HF et le filtre DC de sortie. Elle permet de réaliser un redressement simple alternance. Ce type de structure est le mieux adapté pour la technologie micro-ruban car les capacités dans le filtre HF sont placées en parallèle. L'avantage de cette structure est donc principalement lié à sa facilité de réalisation et de conception ainsi que son adéquation à la récupération d'énergie EM pour des signaux de faibles niveaux de puissances. [6]

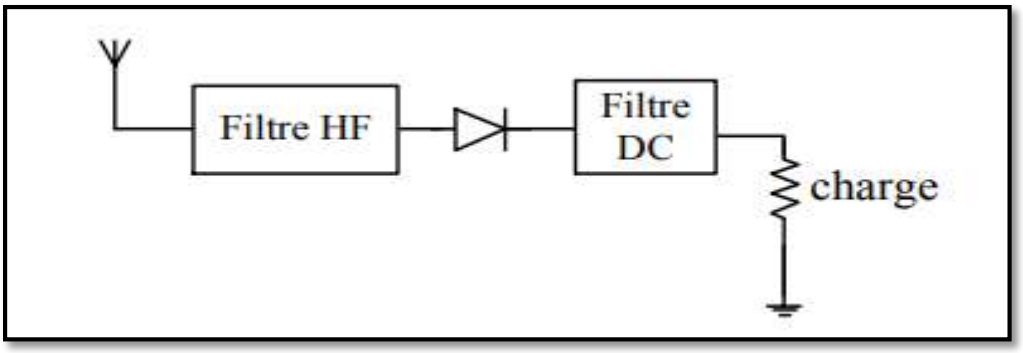


Figure II.11 : Schéma synoptique d'une « rectenna » en topologie série. [6]

B. Topologie parallèle :

Cette configuration, illustrée sur la figure(II.12), utilise une simple diode placée en parallèle entre le filtre d'entrée HF et le filtre DC de sortie avec la cathode ou l'anode connectée à la masse. Ainsi, la diode se retrouve directement polarisée par la tension DC générée. Elle permet aussi de réaliser un redressement simple alternance. Cette topologie offre l'avantage de la récupération de signaux de faibles niveau[x de puissance, comme pour la configuration série. Cependant, sa réalisation en technologie micro-ruban est difficile car elle nécessite des configurations de filtres à l'entrée où les capacités sont placées en série sur la ligne ce qui rend leur réalisation délicate.[6]

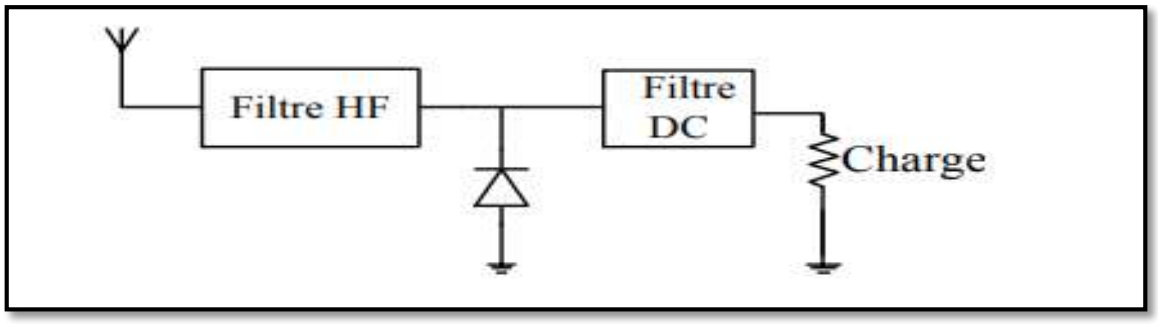


Figure II.12 : Schéma synoptique d'une « rectenna » en topologie parallèle. [6]

C. Topologie doubleur de tension :

La configuration doubleur de tension, illustrée sur la figure (II.13), peut être vue comme une association de la topologie série et de la topologie parallèle décrites précédemment. Elle comporte deux diodes, l'une montée en parallèle et l'autre en série avec une capacité de stockage placée en entrée. Elle permet de réaliser un redressement double alternance. En conséquence, ce type de redresseur permet, dans le cas de forts niveaux de puissances, d'atteindre un niveau de tension récupéré plus élevé que les structures mono diode mais avec un rendement de conversion RF-DC plus faible [7].

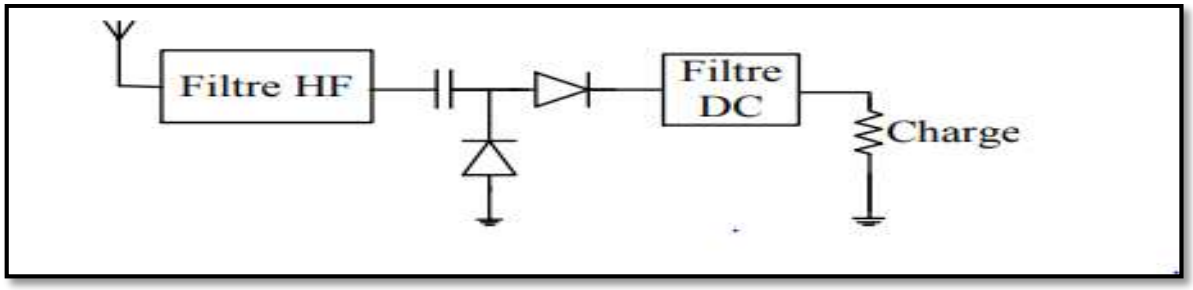


Figure II.13 : Schéma synoptique d'une « rectenna » en doubleur de tension. [6]

D. Topologie Multiplieur de tension :

Le multiplieur est réalisé en cascadant deux doubleurs de tensions. La topologie du multiplieur est donnée par la Figure (II.14).[3]

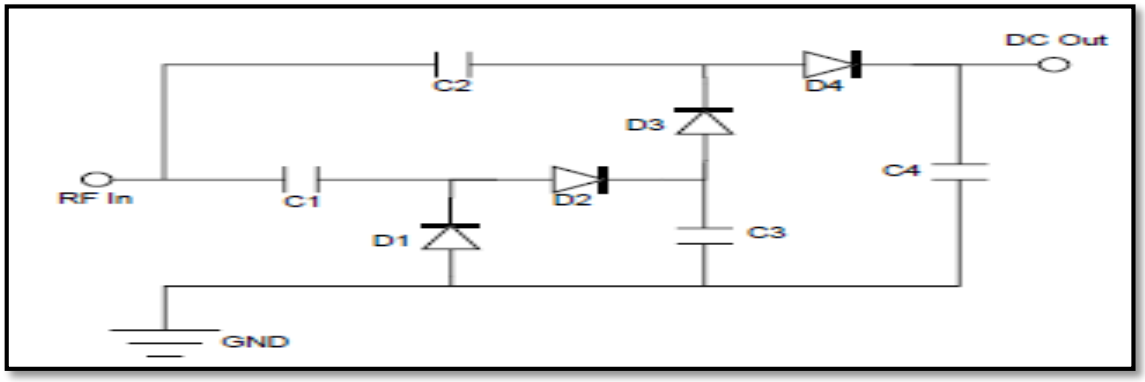


Figure II.14 : Schéma synoptique d'une « rectenna » en Multiplieur de tension. [3]

E. Topologie Pont de diodes :

La topologie « pont de diodes » peut également, quoique très rare, être utilisée pour le redressement du signal RF. Comme pour le doubleur ou le multiplieur, il s'agit d'un redressement double alternance. Si on prend le cas de la topologie représentée sur la Figure (II.15), les diodes D1 et D4 sont passantes lors de l'alternance positive tandis que les diodes D2 et D3 sont bloquées, et l'inverse est vrai lors de l'alternance négative. En revanche, étant donné que le signal RF parcourt deux diodes en série, les pertes dans les diodes augmentent, ce qui dégrade le rendement, et fait de la structure à pont de diodes une topologie plus adaptée pour des puissances élevées. [3]

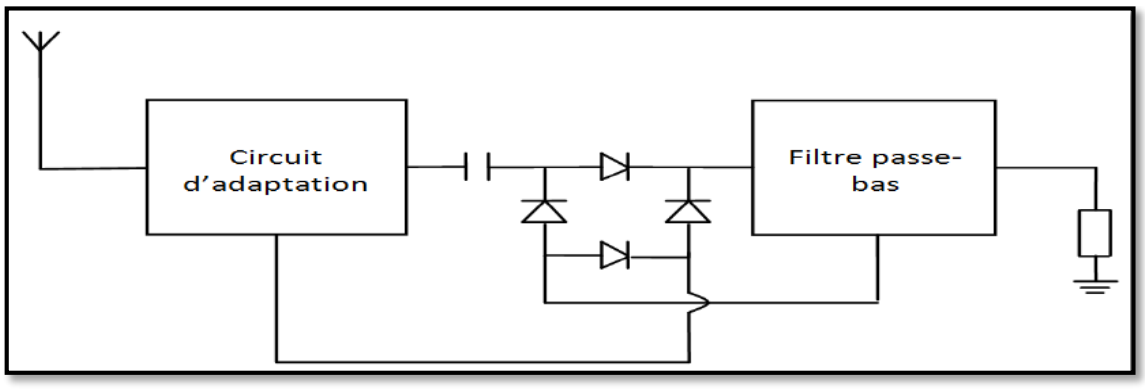
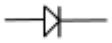


Figure II.15 : Schéma synoptique d'une « rectenna » en Pont de diodes. [3]

II.5.4.3. Les différences entre les Topologies utilisées :

	Description	Avantage	Inconvénient	Application
Mono diode série : 	La plus simple, elle utilise une simple diode pour redresser le signal RF. Très utilisée dans les applications de très faible puissance	Adaptée aux très faibles puissances	Tension de sortie faible	Récupération énergie ambiante

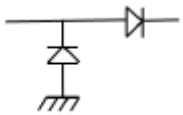
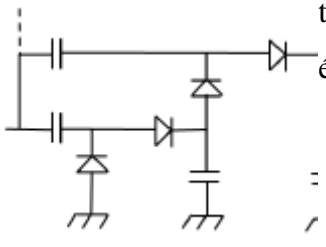
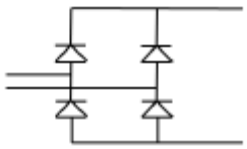
Mono diode parallèle : 	Cette topologie est semblable à la topologie série, les performances sont similaires. En effet, ce circuit permet de redresser l'alternance négative.	Adaptée aux très faibles puissances	Tension de sortie faible	Récupération énergie ambiante
Doubleur de tension : 	Cette structure est une structure qui redresse les deux alternances.	Double alternance ; tension de sortie plus élevée	Rendement moins bon que la structure simple diode	Récupération / Transfert d'énergie sans fils
Multiplieur de tension : 	Ce circuit permet d'obtenir une tension de sortie élevée.	Tension de sortie plus élevée	Pertes dans les diodes, rendement dégradé	Récupération / Transfert d'énergie sans fils
Pont de diode : 	Cette structure utilise Le pont de Graëtz généralement utilisé en électronique de puissance BF. Destinée aux fortes puissances RF	Bon rendement à forte puissance	Pas sensible aux petites tensions.	Transfert d'énergie sans fils

Tableau II.1 : Comparaison des différentes structures de rectennas. [5]

II.5.4.4. Pourquoi utilisée le choix du circuit de redresseur série ou parallèle ?

Les topologies série et parallèle sont les plus utilisées dans le littérateur .Le redresseur simple série, également appelé redresseur demi-onde, consiste en une diode unique en série avec un condensateur C parallèle, comme illustre dans la figure (II.11).La diode redresse la tension d'entrée alternative Vin et le condensateur C parallèle qui agit comme un filtre passe-bas pour ne permettre de passer que la composante de tension de sortie continue Vout. Par ailleurs, le redresseur parallèle, illustre dans la figure (II.12), consiste en une seule diode en parallèle avec un condensateur C,qui s'agit comme un filtre passe-bas.la tension d'entrée redressée par la diode passe en suite à travers le filtre C pour ne laisser apparaitre que la composante continue Vout a la sortie théoriquement ,dans les applications de la récupération d'énergie , aucune topologie entre les deux n'a un avantage sur l'autre en termes d'efficacité de conversion ces deux types de redresseur (série et parallèle),sont très utilisés pour les faibles puissances d'entrée (moins de -10 dBm).[10]

II.5.5. Filtre de sortie DC :

Le but de ce filtre est d'isoler la charge DC du côté RF. Il permet aux composants de passer Allez-y et filtrez toutes les harmoniques supérieures, y compris les composants basique.

- En éléments localisés : dans ce cas il s'agit d'un condensateur shunt connecté à Massez et placez après la diode de redressement.

- Dans les éléments distribués : on a la possibilité d'utiliser un ou plusieurs stubs Radial ou souche rectangulaire. [11]

II.5.6 Charge résistive :

La charge va également influencer le rendement global de la rectenna, l'efficacité est atteinte généralement pour une valeur spécifique de la charge, cette charge peut, ou pas, être la charge du capteur ou dispositif qui doit être alimenté. Il y a deux critères sur lesquels le raisonnement doit être fait lorsque nous parlons de la charge, à savoir la tension DC et l'efficacité. Si l'objectif est d'atteindre une tension DC maximale, il suffit d'augmenter la valeur de la charge en sortie. En revanche, si l'objectif est d'atteindre l'efficacité maximale, dans ce cas un travail d'optimisation doit être effectué afin de déterminer la charge optimale. Cette charge dépend, entre autres, de la puissance RF et de la fréquence. [8]

II.6. Le rendement de conversion :

Une Rectenna est généralement caractérisée par deux critères à savoir la tension de sortie et/ou le rendement de conversion. Le rendement de conversion est la capacité à récupérer de l'énergie radiofréquence et à la transformer en signaux continus. Il y a deux types de rendement, le rendement de conversion RF-DC et le rendement global. D'une part, Le rendement de conversion RF-DC, correspond au rapport de la puissance DC consommée par la charge sur la puissance à l'entrée du circuit de conversion RF-DC. [9]

$$\eta_{RF-DC}=\frac{P_{DC}}{P_{in}} \qquad \textbf{(II.5)}$$

$$P_{DC}=\frac{{V_{DC}}^2}{R_L} \qquad \textbf{(II.6)}$$

- ✓ Avec :

P_{DC}: La puissance continue récupérée aux bornes de la charge de sortie.

P_{in}: La puissance RF en entrée du circuit de conversion (en sortie de l'antenne).

V_{DC}: La tension DC aux bornes de la charge supposée résistive RL.

D'autre part, le rendement global tient en compte l'efficacité et du gain de l'antenne. Ce rendement, correspond au rapport de la puissance DC consommée par la charge sur la puissance captée à l'entrée de l'antenne réceptrice de la Rectenna. Le rendement global est exprimé par l'équation suivante :

$$\eta_{Global}=\frac{P_{DC}}{P_{RF}} \qquad \textbf{(II.7)}$$

- ✓ Avec :

PDC : la puissance continue récupérée aux bornes de la charge de sortie ;

PRF : la puissance RF à l'entrée de l'antenne de réception.

II.7.Etude et réalisation de rectenna en utilisant les ondes EM du réseau mobile :

Afin de récupérer l'énergie à partir des ondes électromagnétiques utilisées dans la téléphonie mobile (2 G, 3 G, et 4 G), notre étude va concentrer sur l'étude et la réalisation d'un modèle de rectenna afin de réaliser ce but, et qui va être détaillé dans le **chapitre III**.

II.8.Conclusion :

Dans ce chapitre, le principe de base d'une Rectenna a été présenté et discutée. Plusieurs architectures de redresseurs ont été aussi présentées. Le redresseur avec une diode série était le plus adapté pour les applications de faible puissance et qui donne une efficacité et rendement de plus de 60%.

La diode Schottky est la diode qui convient à notre cas, vu que notre travail est basé sur les hautes fréquences, le choix de la diode Schottky va être pris suivant les fréquences sur les quelles notre travail est concentré et qui sont entre 900 MHz, 1800 Mhz (2G), jusqu'à 2.4 GHz (la 3G, et 4G).

Références bibliographique II :

[1] : Hakim TAKHEDMIT,<Modélisation et Conception de Circuits de Réception

Complexes pour la Transmission d'Énergie Sans Fil à 2.45 GHz>THESE de doctorat 18 octobre 2010

[2] : Véronique KUHN, "Capture opportuniste d'énergie micro-onde pour l'autonomie des objets communicants," thèse de doctorat, Télécom Bretagne, 2016.

[3] : Abderrahim Okba. Conception et réalisation de rectennas utilisées pour la récupération d'énergie électromagnétique pour l'alimentation de réseaux de capteurs sans fils. Micro et nano technologies/Microélectronique. Université Toulouse 3 – Paul Sabatier, 2017. Français. tel-01705139v1

[4] : Zied Harouni. Conception et caractérisation d'une Rectenna à double polarisation circulaire à 2.45GHz. Autre. Université Paris-Est, 2011. Français. NNT : 2011PEST1026. tel-00682898

[5]: Salah-Eddine Adami. Optimisation de la récupération d'énergie dans les applications de rectenna. L'Université de Lyon, 2013.français. PDF

[6]: S. Ladanet K. Wu, « High efficiency low-power microwave rectifier for wireless energy harvesting », IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), p. 1-4, juin 2013.

[7]: M. K. Hosainet A. Z. Kouzani, « Design and analysis of efficient rectifiers for wireless power harvesting in DBS devices », IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), p. 651-655, juin 2013.

[8]: Baptiste HORNECKER. « TRANSMISSION D'ENERGIE SANS FIL EN VUE

D'APPLICATIONS SPATIALES ».école polytechnique federale de Lausanne Juillet 2011.

[9] : Ismail Alaoui Abdallaoui. Contribution à l'analyse CEM globale de structures et de circuits. Application aux antennes Vivaldi en présence d'un système non linéaire pour la récupération d'énergie : une approche FDTD. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Normandie Université, 2018. Français. ffNNT : 2018NORMC213ff. fftel-01878778f.

[10] : Mohammed Cherif Derbal ,<<DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES RECTENNAS POUR LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE RF AMBIANTE>>,Juin 2019.

[11] : MANSOURI Assia et BOUAYED Hafeda<<Étude et Simulation d'une Rectenna, Application à la Récupération d'énergie RF>>, mémoire master , Université AboubakrBelkaïd– Tlemcen. 20 /06 / 2017.

CHAPITRE III :

Réalisation d'une rectenna à base d'une antenne patch rectangulaire

III.1. Introduction :

La consommation des systèmes et objets communicants sans fil est de plus en plus conséquente par rapport à la quantité d'information échangée et à la portée souhaitée, ce qui réduit d'autant la durée de vie de la batterie. Il y a une perte d'ondes électromagnétiques utilisées dans la téléphonie mobile (2G, 3G, et 4G), dans l'environnement sans intérêt. C'est pourquoi nous avons décidé de faire une étude pour la récupération de cette énergie à partir des ondes électromagnétiques. Pour rendre ces systèmes et objets communicants plus autonomes en énergie et augmenter la durée de vie de la batterie, les systèmes de récupération d'énergie électromagnétique sont une alternative très intéressante .Le composant clé d'un système de récupération d'énergie RF est le rectenna (antenne de rectification).

Les rectennas développés doivent posséder une forte sensibilité (faible puissance disponible), être compact et à faible coût et poids. Les principales caractéristiques qui doivent être optimisées quand on réalise un rectenna sont la tension continue de sortieV_{out} et le rendement de conversion RF-DC en pourcentage. Dans ce chapitre on s'intéresse aux Circuit de conversion en topologie série.

III.2. Contraintes rencontrés pendant la réalisation de notre circuit :

Au début de notre travail sur la réalisation, et après l'étude théorique, notre conception était faite afin de travailler sur une fréquence proche de 2GHz (les fréquences du réseau mobile 3G, 4G, et le 2G DCS (1.8 GHz). La diode choisie pour ces fréquences était HSMS 2860 et l'antenne patch équivalente était avec des dimensions très petits (l'ordre de 4cm). Mais on a constaté après que cette diode n'existe pas sur le marché algérien, et il faut la commander et attendre plus d'un mois pour la récupérer (chose qui n'est pas aussi sûr vu plusieurs contraintes de transport international).On a contacté aussi plusieurs universités algériennes afin de voir s'ils ont cette diode, mais sans résultats.et vu la date limite de dépôt de mémoire et de soutenance, et qu'il n ya qu'une seule session de juin, on était dans l'obligation de voir une diode Schottky disponible en Algérie et qui peut travailler avec des Hautes fréquences, même si ces fréquences sont loin des fréquences qu'on a choisi avant. La seule diode trouvé sur marché et qui travail en HF (plus de 500 Mhz) est la diode BAT85.

Ce choix de diode nous a obligés à changer la fréquence de travail pour l'antenne de 2.4 GHz à 1Ghz, chose qui nous a posé encore un contraire de dimensions de l'antenne, qui ont augmenté de 4 cm à presque 11 cm.

Le choix de la diode BAT85 nous a aussi limité coté tension de travail, parce que la tension de travail de cette diode est élevée par rapport à la diode choisi initialement (HSMS2860), et vu que tout notre travail est à la base sur des faibles tensions et puissances, tout ça nous a posé d'autres problèmes dans la partie mesure de tension et puissance.

III.3. Circuit de conversion en topologie série :

III.3.1. La Partie Simulation du circuit:

On a simulé le circuit en série pour le logiciel Kicad :

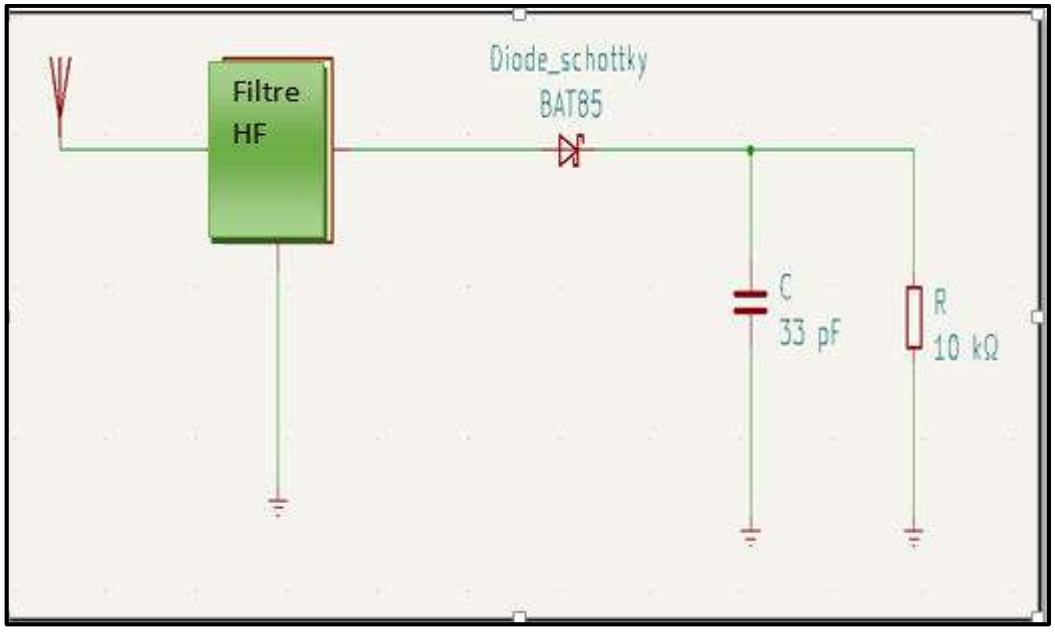


Figure III.1 : Schéma équivalent du circuit en série.

- Le schéma qu'on va réaliser est composé de :
  - Une antenne patch travail à la fréquence 1.1 GHz
  - Une ligne de transmission (micro bande) avec une impédance 50 ohm
  - Un filtre passe bande (micros trip) et qui travaille à une fréquence égale à 1.1Ghz
  - Une autre ligne de transmission (micro bande) avec une impédance 50 ohm

- Un condensateur avec une valeur de 33pF en parallèle
- Et une résistance à la sortie en parallèle avec la valeur 10 k ohms.

III.3.2.1. Réalisation d'antenne patch (rectangulaire) :

On a utilisé le logiciel HFSS suivant pour simuler l'antenne patch (figure III.2) :

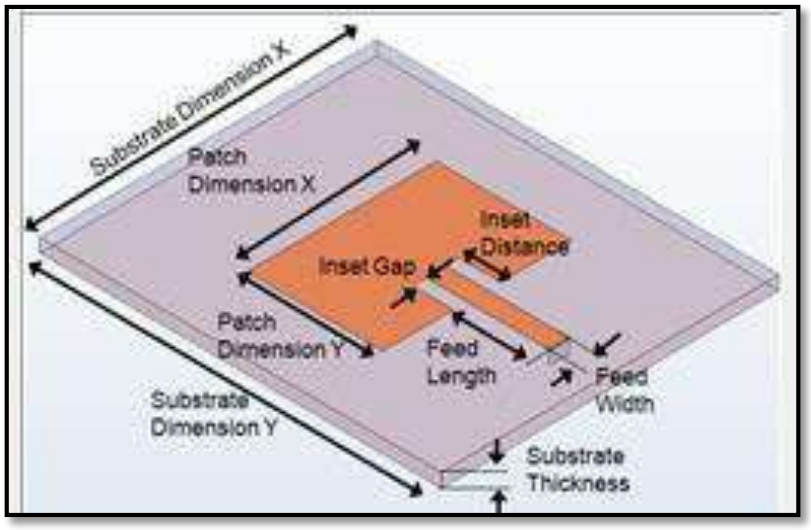


Figure III.2: Antenne patch rectangulaire.

A. HFSS :

HFSS (High Frequency Structure Simulator) est un logiciel de simulation en 3D, particulièrement adapté pour tous les types des problèmes des antennes : conception, analyse et simulation. Il intègre la simulation, visualisation, modélisation des solides, et l'automatisation dans un environnement facile à utiliser où les solutions des problèmes électromagnétiques 3D sont obtenues rapidement et avec précision. Les résultats de simulation des conceptions HFSS sont plus proches des valeurs réelles.

Ansoft HFSS peut être utilisé pour calculer des paramètres tels que paramètres S, fréquence de résonance, des champs électriques et magnétiques, digrammes de rayonnements ....

B. Les paramètres de l'antenne :

On veut simuler une antenne rectangulaire qui travaille dans la bande de fréquence :

L [800 Mhz–1.2 GHz], et qui a une impédance égale à 50 ohm.

- Les caractéristiques de cette antenne sont :

- Fréquence de résonance :f_0= 1.1GHz.
- Epaisseur de la métallisation : t = 1.5748mm.
- Substrat diélectrique :
  - ✓ Matériau : FR-4.
  - ✓ La constante diélectrique :ε_r = 4.4.
  - ✓ L'épaisseur :h = 1.58mm.

Ce matériau est utilisé comme un substrat pour la conception d'antenne patch rectangulaire alimentée directement par une ligne micro-ruban avec des encoches, on met les encoches pour améliorer l'adaptation de l'antenne patch.

C. Les dimensions de l'antenne :

En simulant avec le logiciel HFSS, les dimensions de l'antenne sont représentées dans la figure (III.3) suivant :

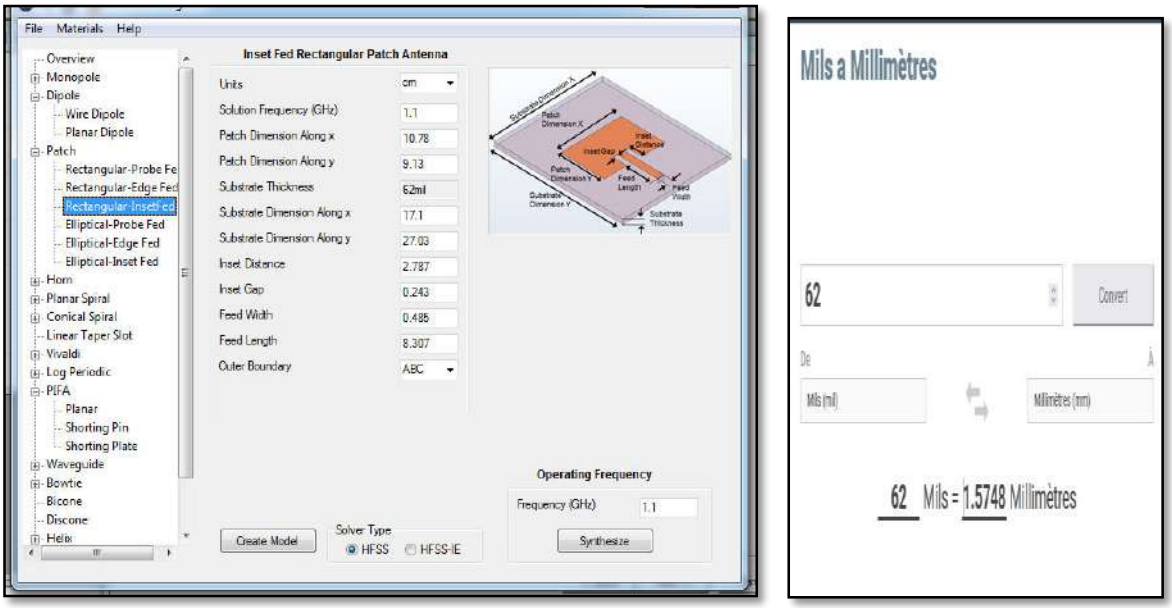


Figure III.3 : Les dimensions d'Antenne patch rectangulaire.

D. Le paramètre S_{11} d'antenne simulée :

Le premier paramètre qu'on va voir est le coefficient de réflexion S11.Dans la figure dessous, on peut voir clairement que l'antenne choisi travail spécialement dans les deux fréquences 1.3 GHz et 1.5Ghz, ainsi que la fréquence 760 Mhz (0.76GHz).et comme notre diode Schottky travail uniquement dans les fréquences proches de 500 Mhz, alors on va faire des tests pour des fréquences proches de 700 Mhz.

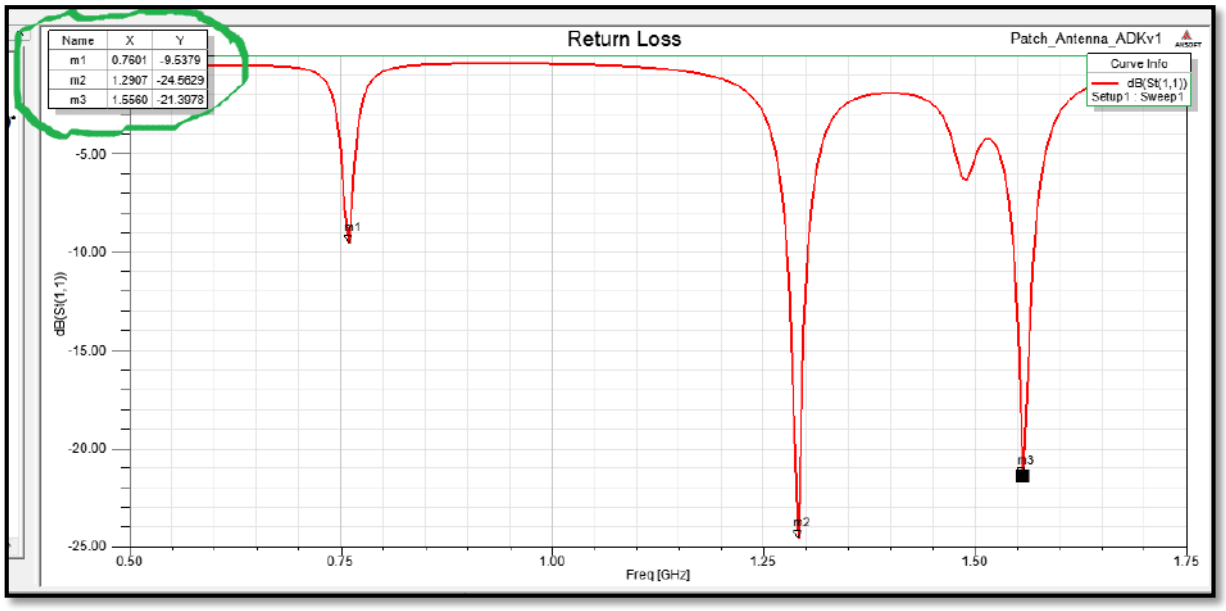


Figure III.4 : La courbe de paramètre S_{11}d'antenne simulée.

III.3.2.2. La ligne micro ruban :

On a utilisé l'application« Microstrip Line Calculator-emtalk » pour avoir les caractéristiques de la ligne de transmission (micro-ruban) dans la figure (III.5) suivant :

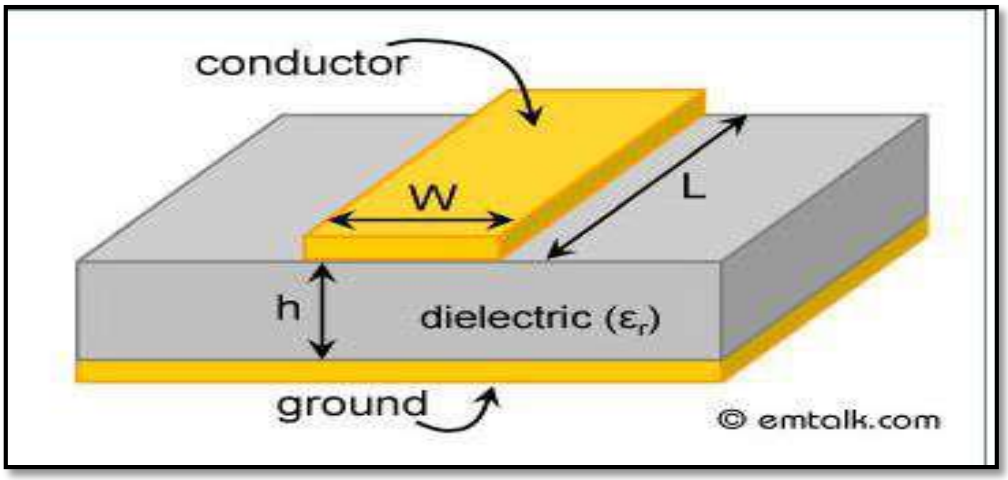


Figure III.5: Ligne de transmission (micro-ruban).

A. Microstrip Line Calculator-emtalk:

Le calculateur micro-ruban déterminer la largeur et la longueur d'une ligne micro-ruban pour une impédance caractéristique (Z_0) et une longueur électrique données. Les paramètres du substrat (ε_r;h) et la fréquence d'intérêt sont requis.

B. Les paramètres de ligne micro ruban :

- Les paramètres caractérisant la ligne de notre antenne patch sont :

- La permittivité relative du substrat. L'utilisation d'un substrat diélectrique de forte Permittivité a pour effet de concentrer le champ électromagnétique dans le substrat, en réduisant ainsi le rayonnement.
- L'épaisseur h du substrat.
- La largeur w du micro ruban.
- L'impédance caractéristique(Z_0) de la ligne dépend de w et h.

C. Les dimensions de ligne micro ruban :

Après l'étude de l'application « Microstrip Line Calculator-emtalk » a été représentées dimensions de ligne de transmission d'un notre Antenne dans la figure(III.6) suivant :

- La longueur du micro ruban : L=3.0207mm.
- La largeur du micro ruban : W=22.8324 mm.

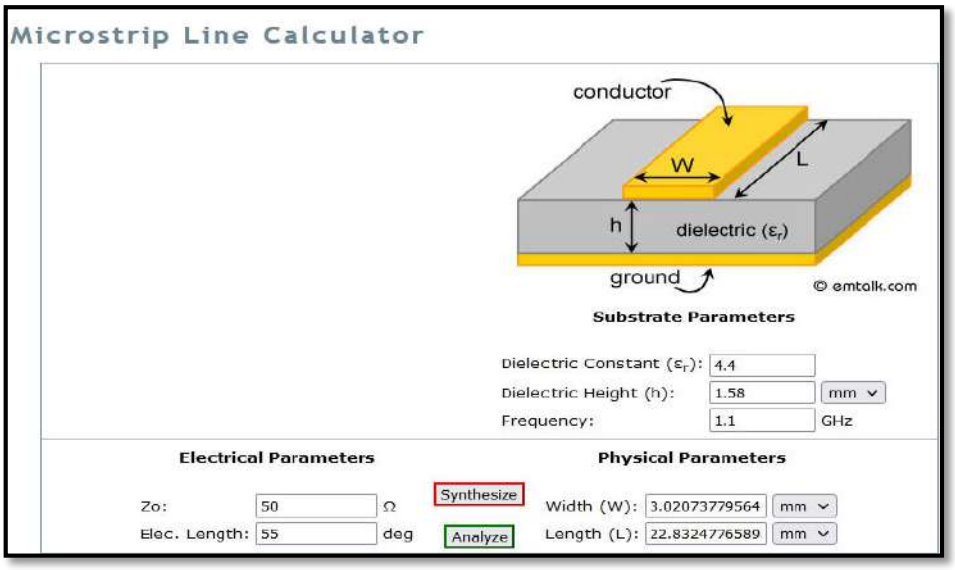


Figure III.6: Les dimensions de ligne de transmission.

III.3.2.3. Filtre HF :

On a utilisé un filtre HF dans la fréquence centrale de résonance est 1 GHz et avec une bande de fréquence de 10% (étroite), afin de laisser passer uniquement les fréquences qui sont proches de la fréquence centrale de travail du réseau mobile 2G et qui aura le maximum de puissance et éliminer les autres avec des faibles valeurs. Pour cette raison et pour trouver les dimensions exactes de ce filtre HF, on a fait appel à un logiciel spécialisé de ce genre de filtre et qui s'appelle« Filter Design Wizard » :

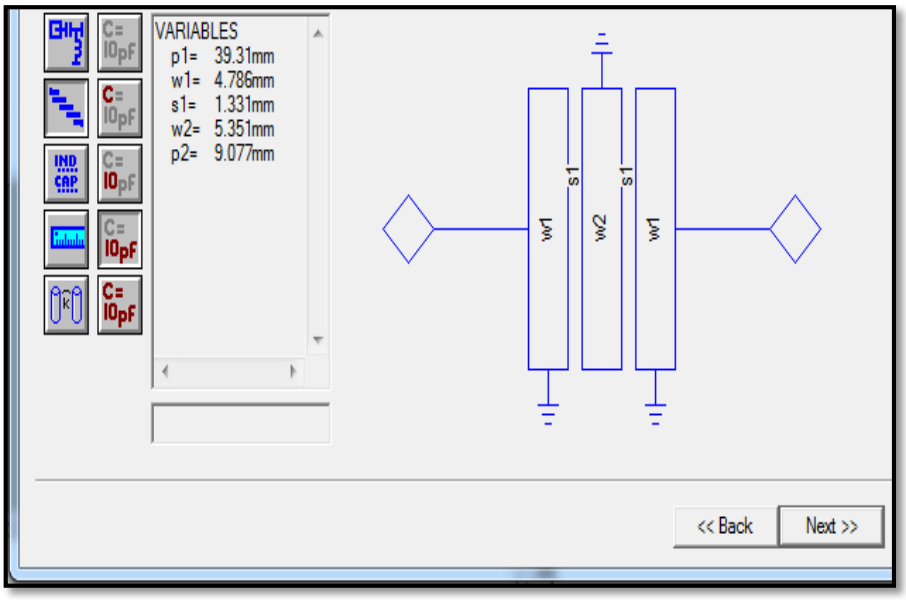


Figure III.7: Filtre haut fréquence.

A. Filter Design Wizard :

Ansoft Designer SV contient un simulateur de circuit linéaire haute fréquence complet, une entrée de conception de schéma et de mise en page, de puissants utilitaires de conception et un post-traitement, le tout intégré dans un environnement facile à utiliser. Le logiciel comprend également un ensemble complet de modèles de lignes de transmission distribuées linéaires, de discontinuités, de composants de fournisseur et d'éléments de circuit idéaux. Ansoft Designer SV permet la simulation des paramètres S, Y et Z, du retard de groupe, du facteur de bruit et des cercles de stabilité des circuits RF et micro-ondes.

B. Les paramètres de Filtre HF :

Ce filtre Haute Fréquence utilisé avec des paramètres a été présenté dans figure (III.8) :

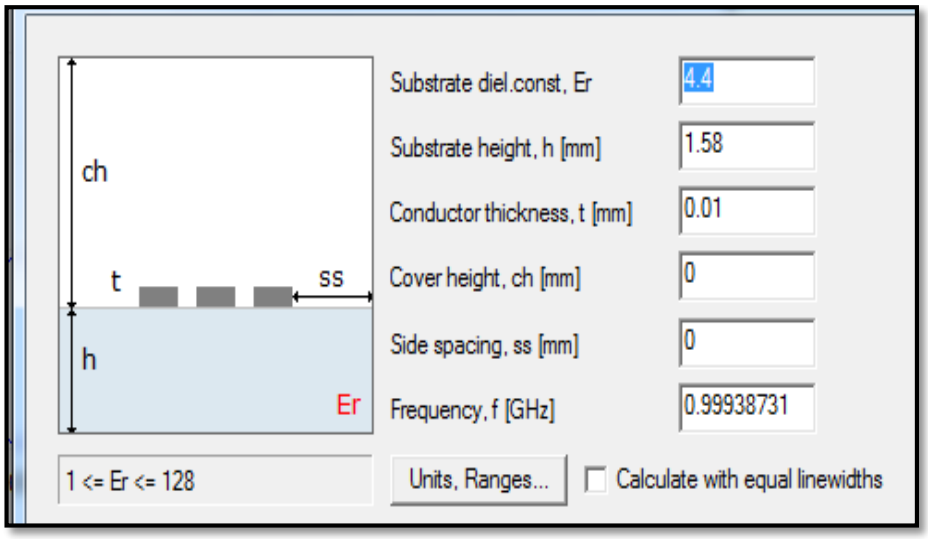


Figure III.8: Les paramètres de Filtre Haute Fréquence.

C. Les dimensions de Filtre HF :

Ce filtre Haute Fréquence utilisé avec des dimensions bien précises a été présenté dans la figure (III.9) suivant:

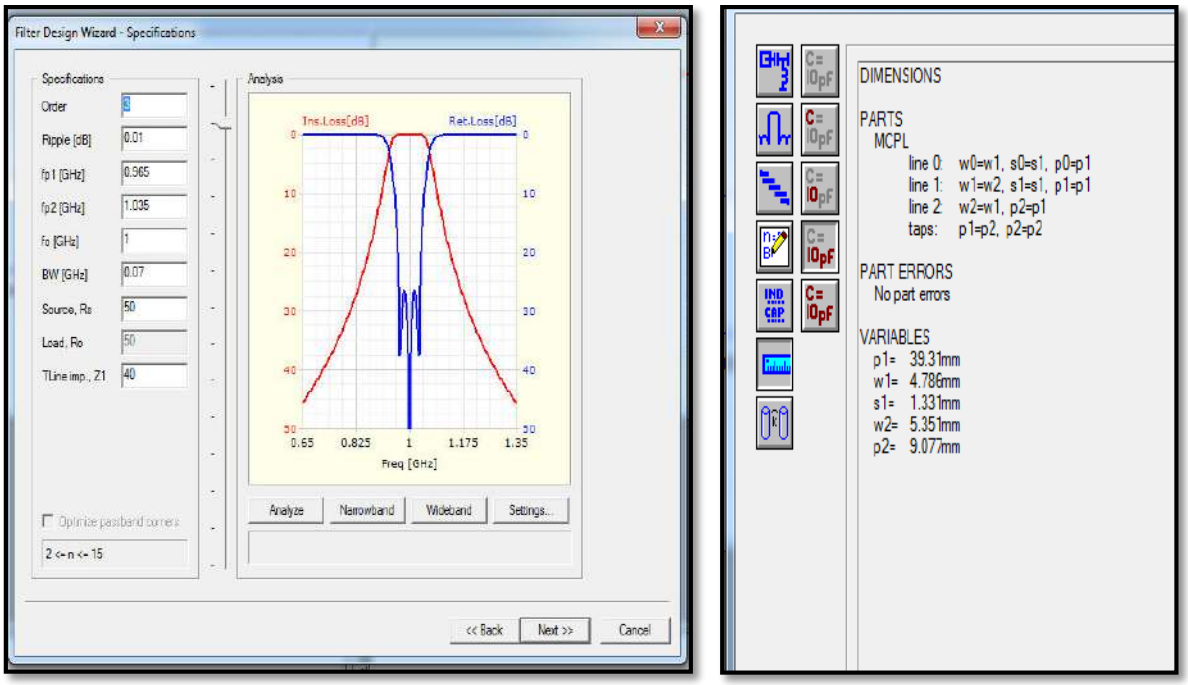


Figure III.9: Les dimensions de Filtre Haute Fréquence.

III.3.2.4. Choix de la diode :

Dans le cas de la récupération d'énergie RF environnante, et vu la très faible densité de puissance reçue, il est important de concevoir un circuit de redressement de forte sensibilité pour avoir une quantité de puissance DC exploitable. La sensibilité du redresseur est directement liée à la sensibilité des diodes utilisées.

Afin de faire le choix de la diode Schottky BAT85, une étude paramétrique sur les éléments de la diode a été réalisée.

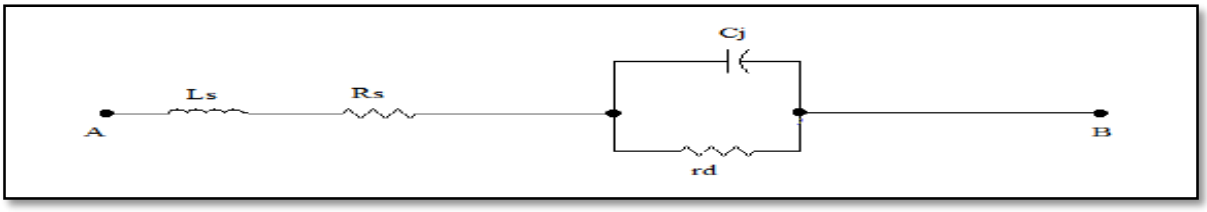


Figure III.10: Circuit de diode Schottky.

III.3.2.5. Diode Schottky BAT85 :

Cette figure c'est un Diode Schottky BAT85 en Réelle a été présenter dans figure (III.11) suivant :



Figure III.11 : La composante Diode Schottky BAT85 en Réelle.

Utilisation de diode Schottky qui travaille à la fréquence plus que 500 MHz dans la figure(III.12) :

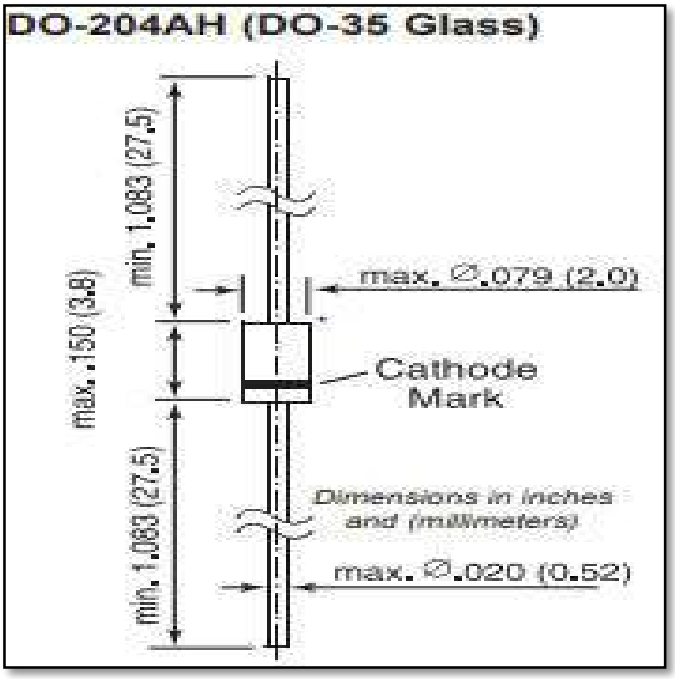


Figure III.12 : Schéma équivalent de la diode Schottky BAT85.

A. Les Dimensions de Diode Schottky BAT85 :

Paramètre	Symbole	Condition de test	Min	Max	Unité
Tension de claquage inverse	V(BR)R	IR = 10µA (pulsé)	30	_	V
Courant de fuite	IR	VR = 25V	—	2	µA
Temps de récupération inverse	trr	IF = 10mA à IR = 10mA	—	5	nS
Tension inverse continue	VR	Valeur : 30			V

Tableau III.1: Les dimensions de diode BAT85.

III.3.2.6. Filtre DC :

Nous avons utilisé un condensateur de **33pF** afin de rendre en continu le signal redressé avec une seule alternance positive via le principe de chargement et de déchargement de ce condensateur. Ce condensateur est présenté dans la figure (III.13) suivant :



Figure III.13 : La composante Condensateur « 33pF » en Réelle.

III.3.2.7. La Charge :

Nous avons utilisé une résistance de haute qualité de **10KΩ**pour pouvoir mesurer les tensions de sortie du circuit redresseur.



Figure III.14 : La composante Résistance « 10KΩ »en Réelle.

III.3.2.8. Le schéma global de circuit imprimé :

Pour faire le schéma du circuit imprimé avant la réalisation, on utilise le logiciel Adobe Illustrator.

A. Adobe Illustrator :

Adobe Illustrator est un logiciel de création graphique vectorielle. Il fait partie de la gamme Adobe, peut être utilisé indépendamment ou en complément de Photoshop, et offre des outils de dessin vectoriel puissants. Les images vectorielles sont constituées de courbes générées par des formules mathématiques. L'un des outils principaux d'Illustrator étant « la plume » qui permet de tracer des courbes à l'aspect parfait grâce au placement de points d'ancrage et de tangentes qui vont en modifier la courbure.

Un des avantages des images vectorielles est qu'elles sont indépendantes de la résolution, c'est-à-dire qu'elles ne perdent pas en qualité lorsqu'on les agrandit. Adapté aussi bien à la création de document papier qu'à celle d'illustrations pour Internet (logos, affiches, etc.) Le schéma du circuit imprimé avant la réalisation :

Le schéma global de circuit imprimé se montre en Figure (III.15) :

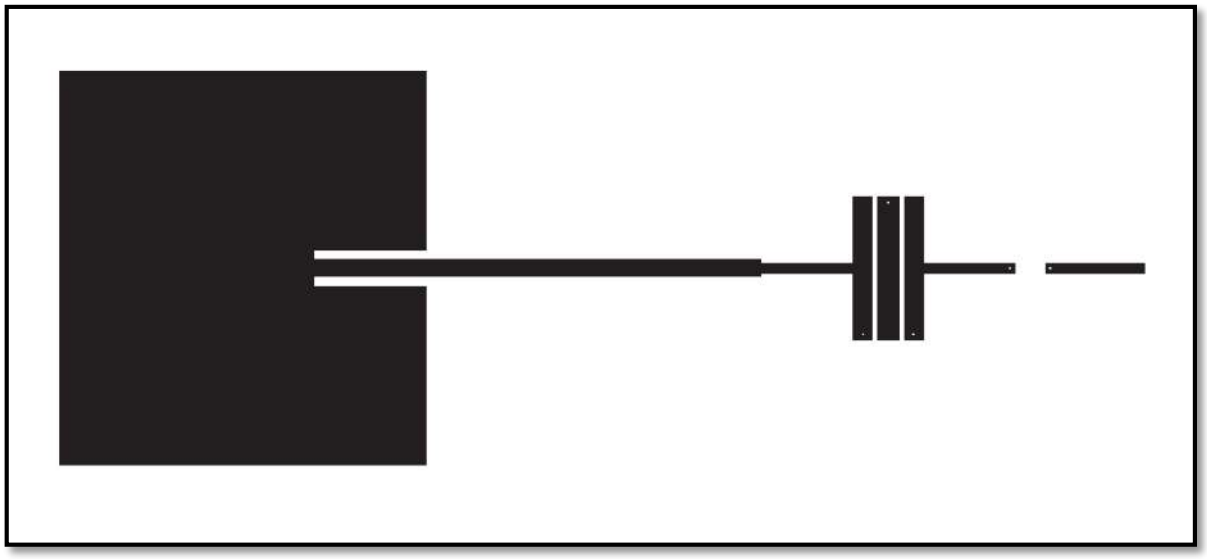


Figure III.15 : Le schéma global de circuit imprimé.

III.3.2. La partie réalisation du circuit :

La réalisation a était faite comme suit : après la conception du circuit, on a fait une carte PCB à deux faces supérieures et inferieur (la face inferieure se comporte comme plan de masse pour l'antenne le filtre et la ligne de transmission), sur laquelle on a imprimé l'antenne, les deux lignes de transmission et le filtre passe bande HF, après on a déposé les autres composants à savoir le condensateur et la résistance.

Les tests effectué, et pour évaluer notre circuit réalisé par rapport au but principale qui est la récupération d'énergie électromagnétique, et vu que la diode utilisé travail avec des tensions (puissances) plus grandes que les tensions (puissances) de travail de la diode choisie au début (HSMS2860) et vu que les puissances des ondes à récupérer sont très faible, alors et pour montrer le comportement de notre circuit.

- On a décomposé notre test à deux parties :

- La première : tester l'antenne, par l'émission directe d'un signal à partir d'une antenne Yagi vers notre antenne (cette émission remplace les ondes électromagnétiques des réseaux mobile 2G (GSM).
- La deuxième : tester le circuit redresseur, à partir du filtre jusqu'à la résistance, par l'application directe d'un signale avec une puissance suffisante pour la diode afin de voir le travail du circuit.

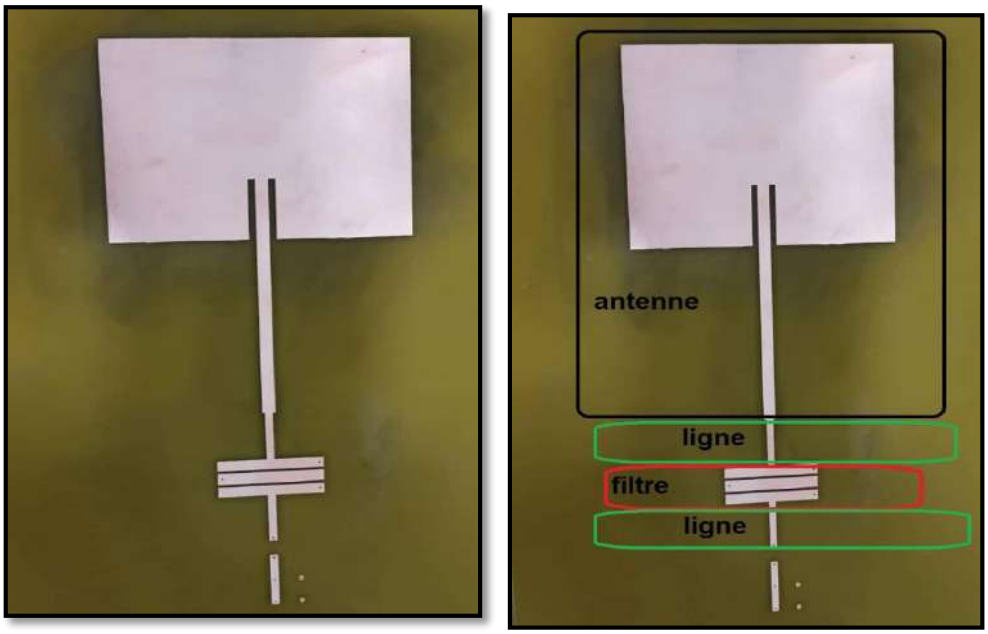


Figure III.16 : La carte PCB : antenne ; lignes et filtre imprimés.

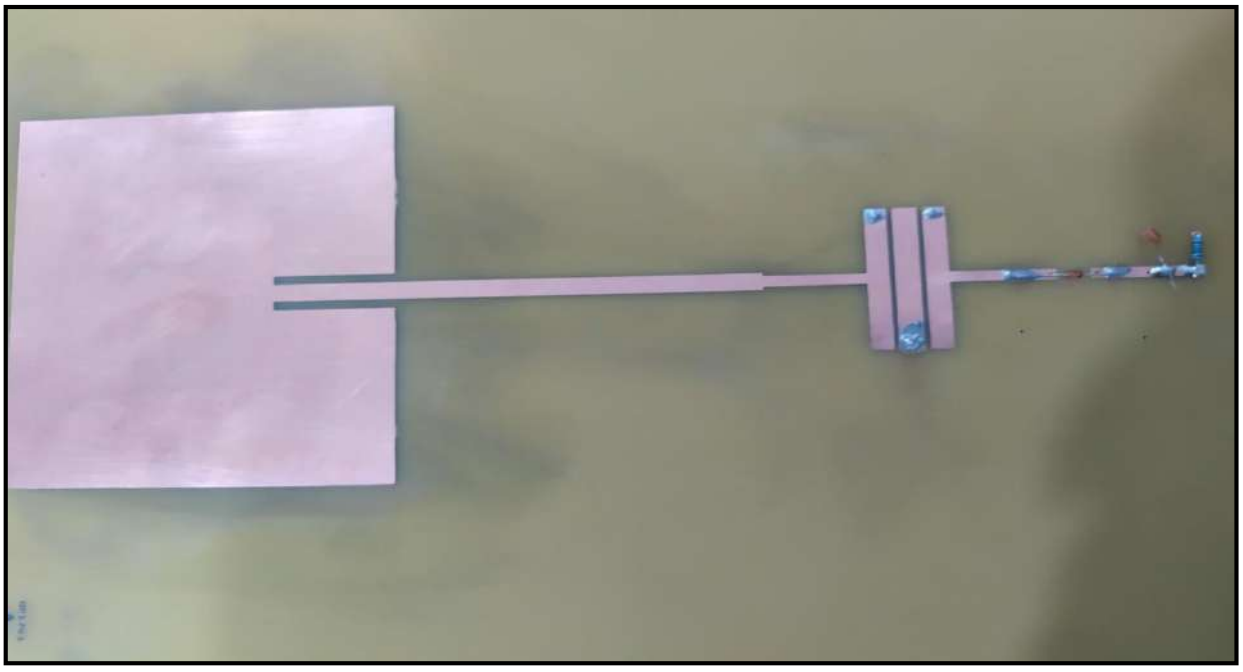
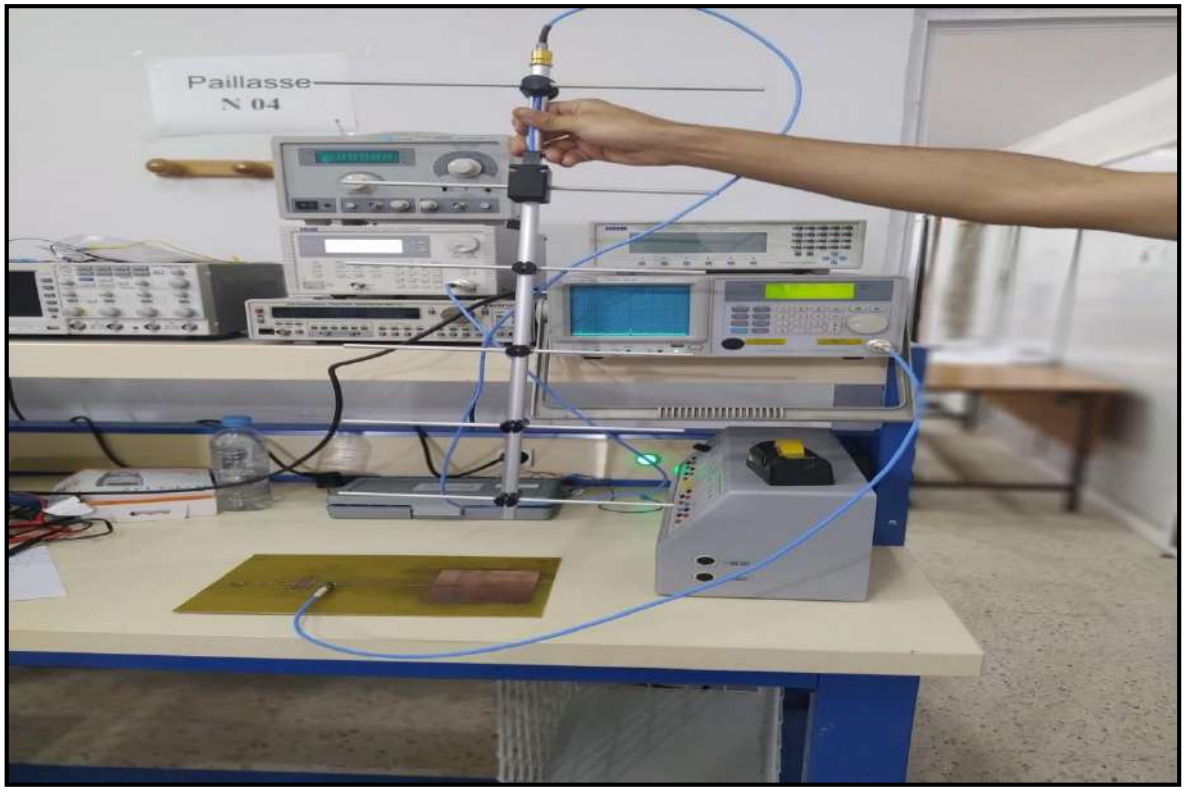


Figure III.17 : Le circuit avec les Composants : Diode ; Condensateur et Résistance.

III.3.2.1. Test sur l'antenne :

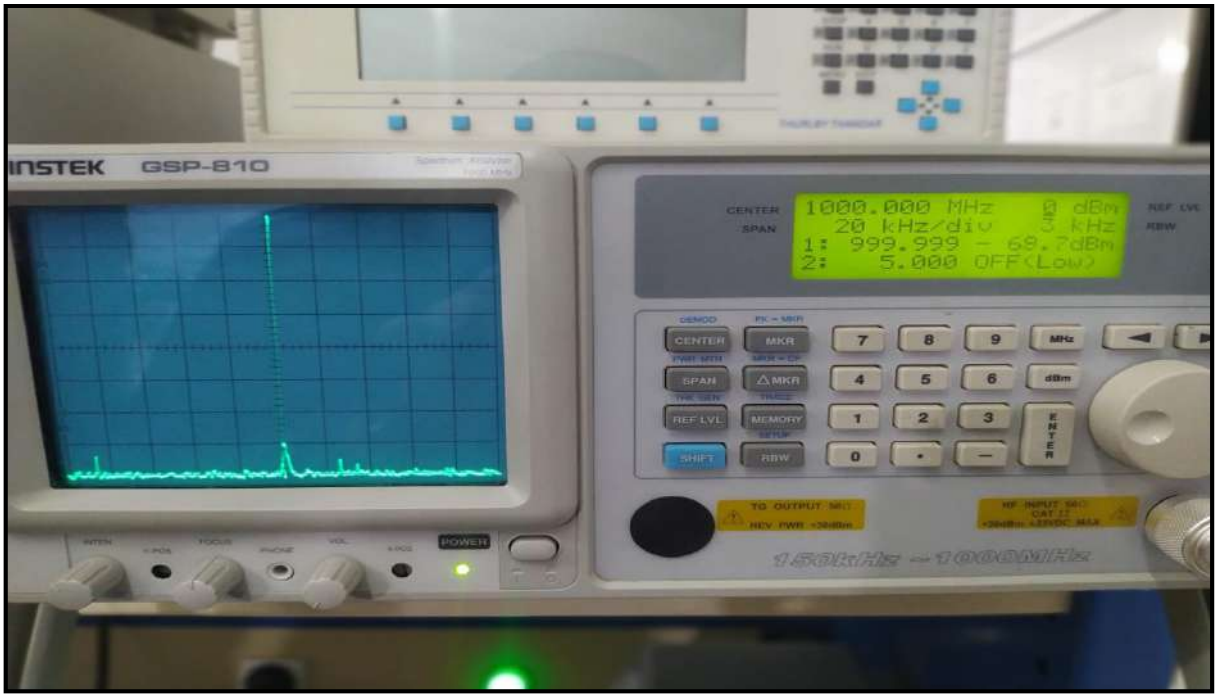
Nous avons utilisé l'antenne Yagi pour tester le fonctionnement de l'antenne patch. À Travers les étapes illustrées dans les figures (III.18): (a), (b), (c)] suivantes :



(a)



(b)



(c)

Figure III.18 : (a ,b, c) Les étapes de test sur l'antenne.

Les test effectué consiste à envoyer un signal de frequence entre 0.7Ghz et 1Ghz avec une puissance egale à 7dBm, et de mesurer le signal reçu à la sortie de l'antenne.Ce test est pour voir le comportement de notre antenne pour un signal qui a une frequence proche de la frequence des ondes electromagnetiques du reseau mobile 2G (GSM) qui sont entre 860 MHz et 950MHz.

On calculant le coeficiant de reflection S_{11}de cette antenne par simulation par HFSS (figure dessous) , on constate qu'elle travail spécialement dans les deux frequences 1.3 GHz et 1.55Ghz, ainsi que dans la frequence 0.760 GHz avec un coefficient de reflection S_{11}plus grand, ce qui fait que pour les frequences proches de 700 MHz le comportement de l'antenne ne sera pas très fiable, et qu'il aura une importante partie de la puissance reflechie.par contre pour les frequences proche de 1.3 Ghz et 1.55Ghz le comportement sera plus efficace.maleheureusement, nos tests sont effectués uniquement pour les frequences inferieurs à 1Ghz vu que notre generateur ne donne pas plus de cette valeur (1Ghz).

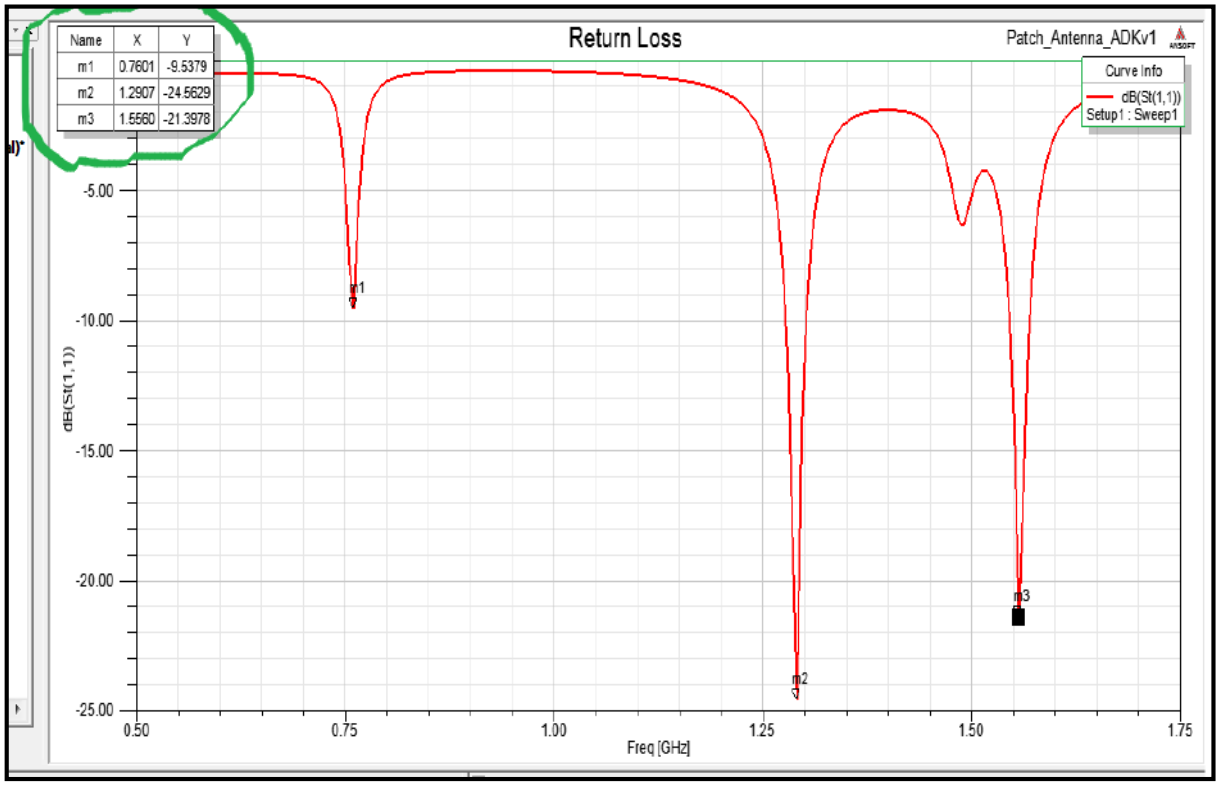


Figure III.19 : La courbe de coeficiant de reflection S_{11}.

- **Les resultats de puissance emise par l'antenne yagi :**

Les resultats trouvés sont regroupés dans le tableau dessous sachant qu'on a appliqué une puissance emise par l'antenne yagi egale à 7dBm, ce choix d'une faible puissance c'est pour etre dans le meme ordre des signaux ou ondes electromagnetiques du reseau mobile 2G à recuperer, qui est en général en faible puissance.

fréquence (MHZ)	300	400	500	600	620	640	660	680	700	730	750
Puissance (dBm)	-53	-55.3	-55.6	-46.5	-58.7	-61.4	-56.8	-55.5	-57.5	-60	-52.5

Fréquence (MHZ)	760	780	840	860	880	900	920	940	960	980	990	1000
Puissance (dBm)	-53.1	-42.2	-51.2	-48.9	-52.2	-53.8	-46.8	-39.4	-47.4	-47	-50.3	-51.6

Tableau III.2 : les résultats de puissance de l'antenne patch.

- **Programme MATLAB :**

On utilise ce programme pour dessigné les courbes :

```
f=[300 400 500 600 620 640 660 680 700 730 750 760
780 800 820 840 860 880 900 920 940 960 980 990
1000];
p= [-53 -55.3 -55.6 -46.5 -58.7 -61.8 -56.8 -55.5 -
57.8 -60 -52.5 -53.1 -42.2 -44.2 -54.3 -51.2 -49.8 -
52.2 -53.8 -46.8 -39.4 -47.4 -47 -50.3 -51.6];
figure; plot (f,p)
xlabel ('fréquence(MHZ)')
Ylabel ('puiss (dBm)')
```

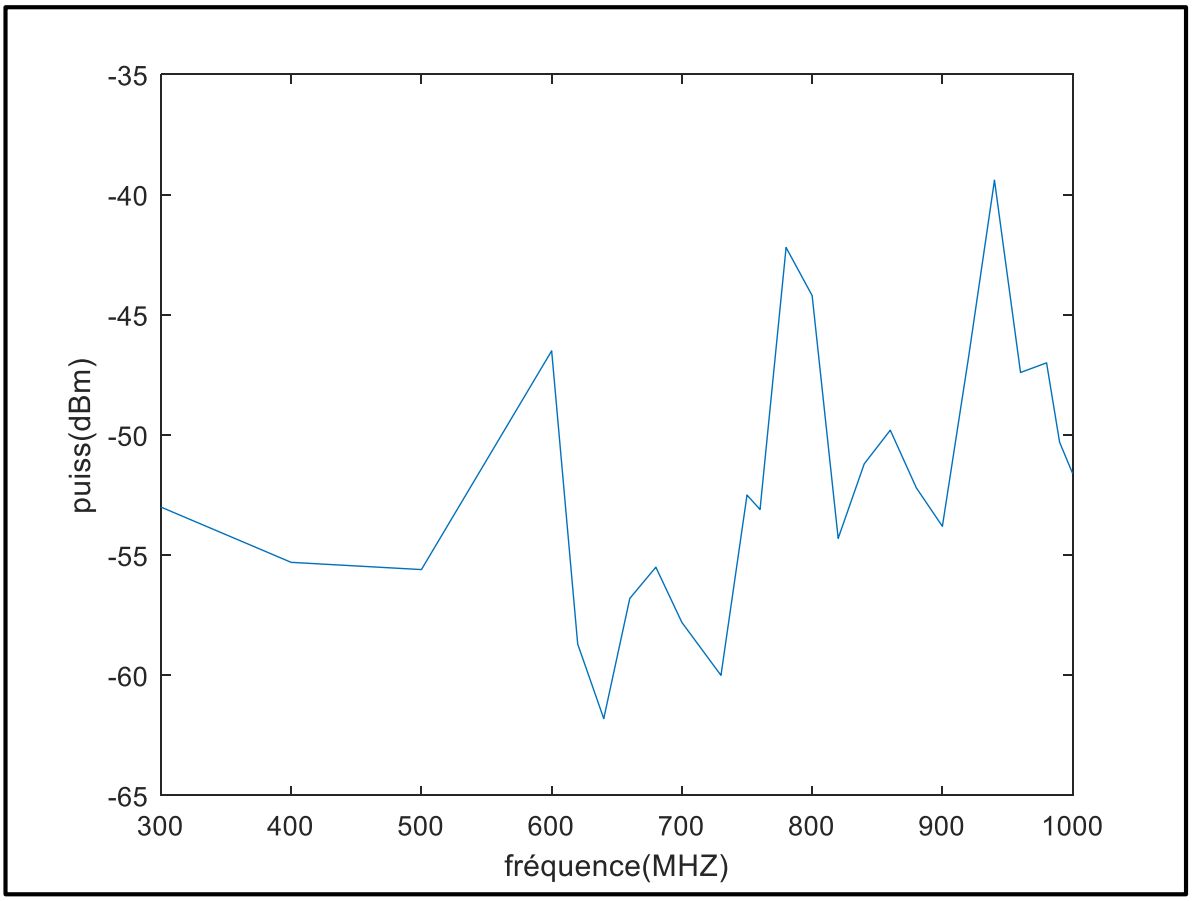


Figure III.20: La courbe de puissance en fonction de la fréquence.

- **discussion des résultats:**

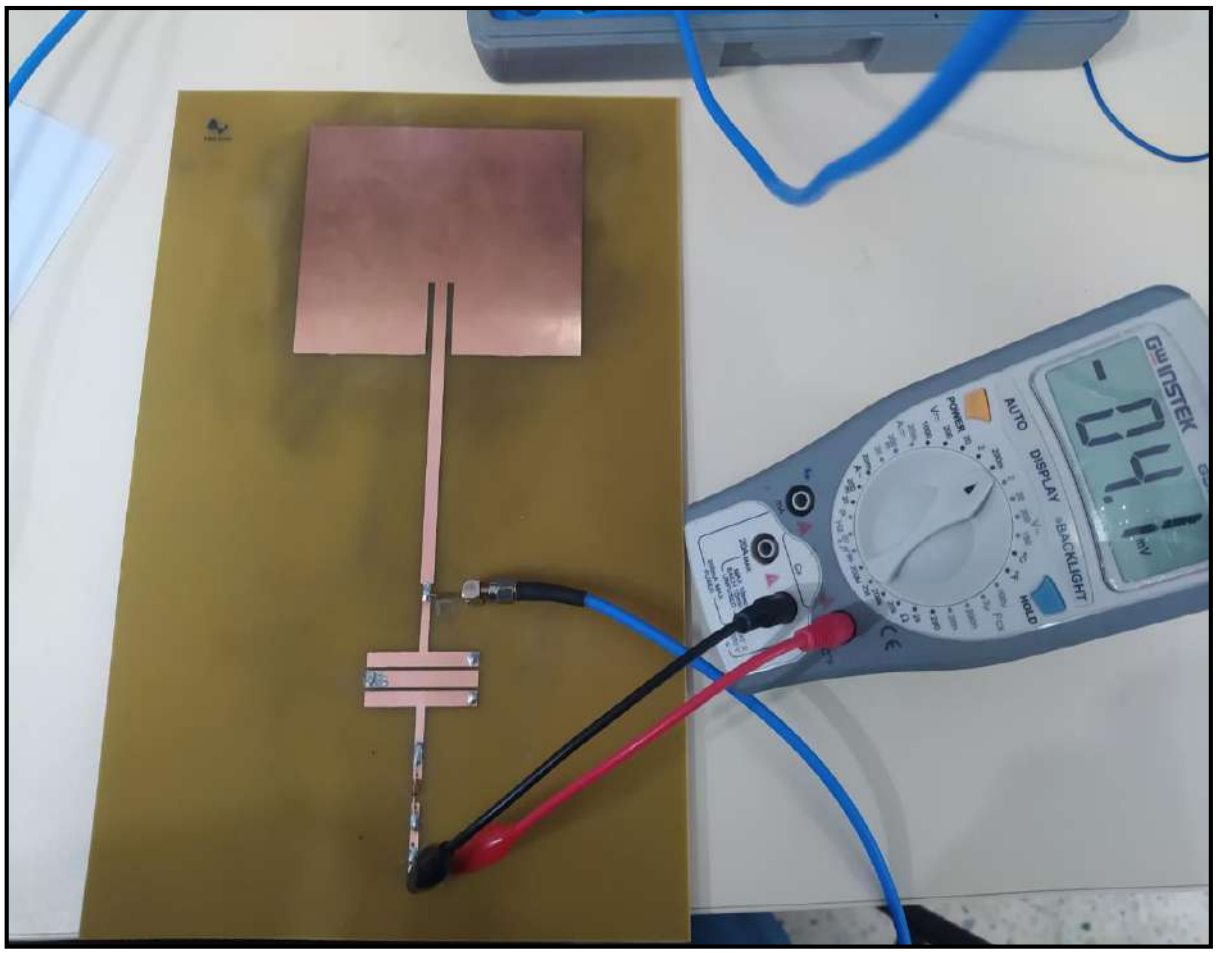
On remarque bien que les valeurs sont un peu petites, vu qu'on a travaillé avec des fréquences un peu loin des valeurs favorisées de l'antenne, et que la puissance source émise via l'antenne yagi était aussi faible (7dBm).on peut remarquer qu'il ya deux valeurs ou la puissance reçu est grande par rapport aux autres, la première et pour la fréquence 780 et 800 Mhz et l'autres et pour la fréquence 940 Mhz. Ces fréquences nous conviennent bien (même si cette bande n'est pas la bande idéale pour le bon fonctionnement de notre antenne) vu qu'ils sont dans la bande de fréquence du réseau mobile 2G (GSM). Alors on peut dire qu'avec toutes ces contraintes, on a pu récupérer de la puissance des ondes électromagnétiques.

Maintenant et après avoir récupérer des signaux à partir des ondes électromagnétiques, et vu qu'ils sont des signaux alternatif, notre but initial c'est d'avoir des signaux continues afin

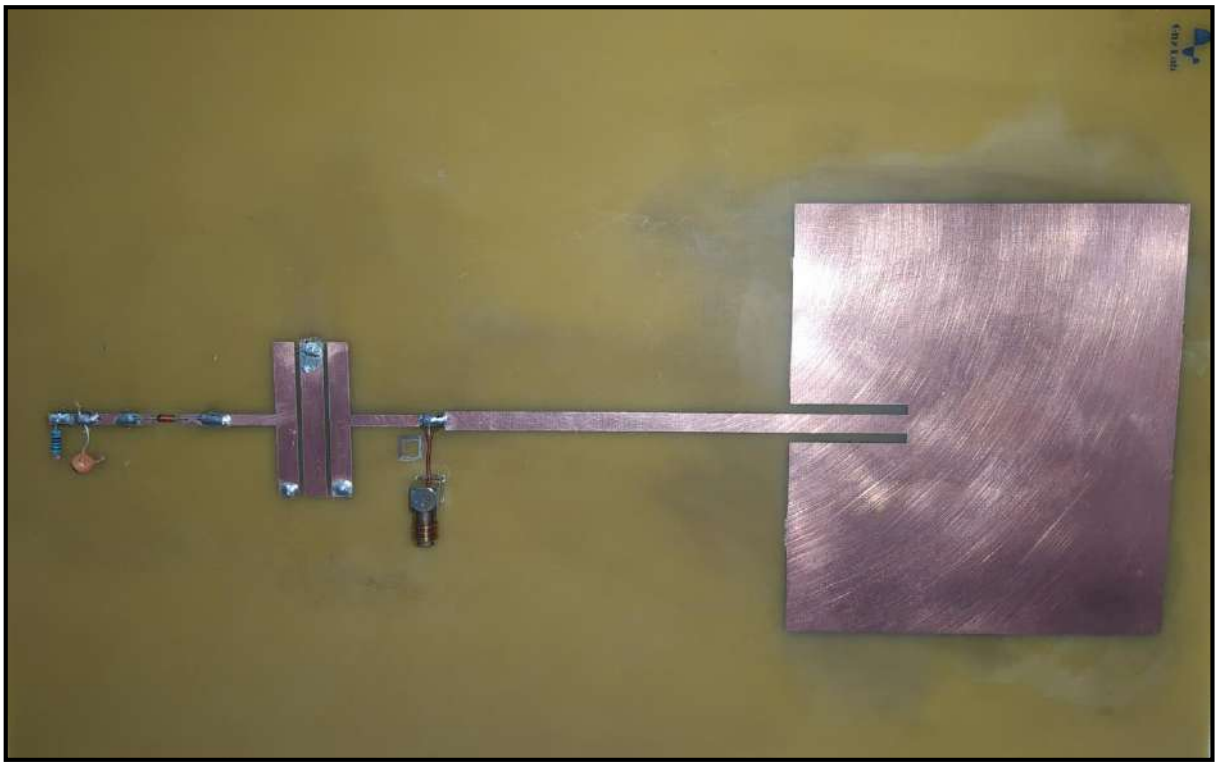
de les utiliser pour alimenter des dispositifs lointains et à faible consommation d'énergie. Alors on va passer à la deuxième étape de test de notre réalisation qui est le circuit redresseur.

III.3.2.2. Test sur le circuit redresseur :

Nous avons utilisé un générateur pour mesurer la tension et calculer le rendement de circuit redresseur dans les figures (III. 21): (a), (b) suivantes :



(a)



(b)

Figure III.21 : (a, b) Les étapes de test sur le circuit redresseur.

Le test effectué consiste à envoyer le meme signal de frequence entre 0.7Ghz et 1Ghz avec une puissance egale à 7dBm à l'entrée de la ligne de transmission, et de mesurer le signal reçu à la sortie de circuit au borne de la resistance.on a fait ce test de cette manière, car au debut on a fait un test d'envoyer un signal via l'antenne yagi, et on voulait mesurer la valeur de puissance au sortie du circuit au borne de la resitance, les valeurs etaient tous zero, vu que les signaux à la sortie de l'antenne sont très faibles (comme on déjà expliqué sur la partie premiére du test dessus) et que la diode travail avec des puissance plus elever que cette faible puissance, alors les valeurs mesurés sont tous nul.

C'est pour cette cause et pour tester notre circuit redresseur à partir de la ligne, suivant par le filtre et une autre ligne, la diode et en fin la resistance, on a injecté un signal avec une puissance acceptable afin d'etre dans la zone de travail de la diode et avoir des resultats(la diode principalement choisie et non trouvé la HSMS2860 travail avec des puissance plus faible que notre diode utilisé BAT85).

Le filtre utilisé est un filtre passe bande qui travail en haute frequence, et qui est centré dans la frequence 1 Ghz avec une bande de frequence de 10%.

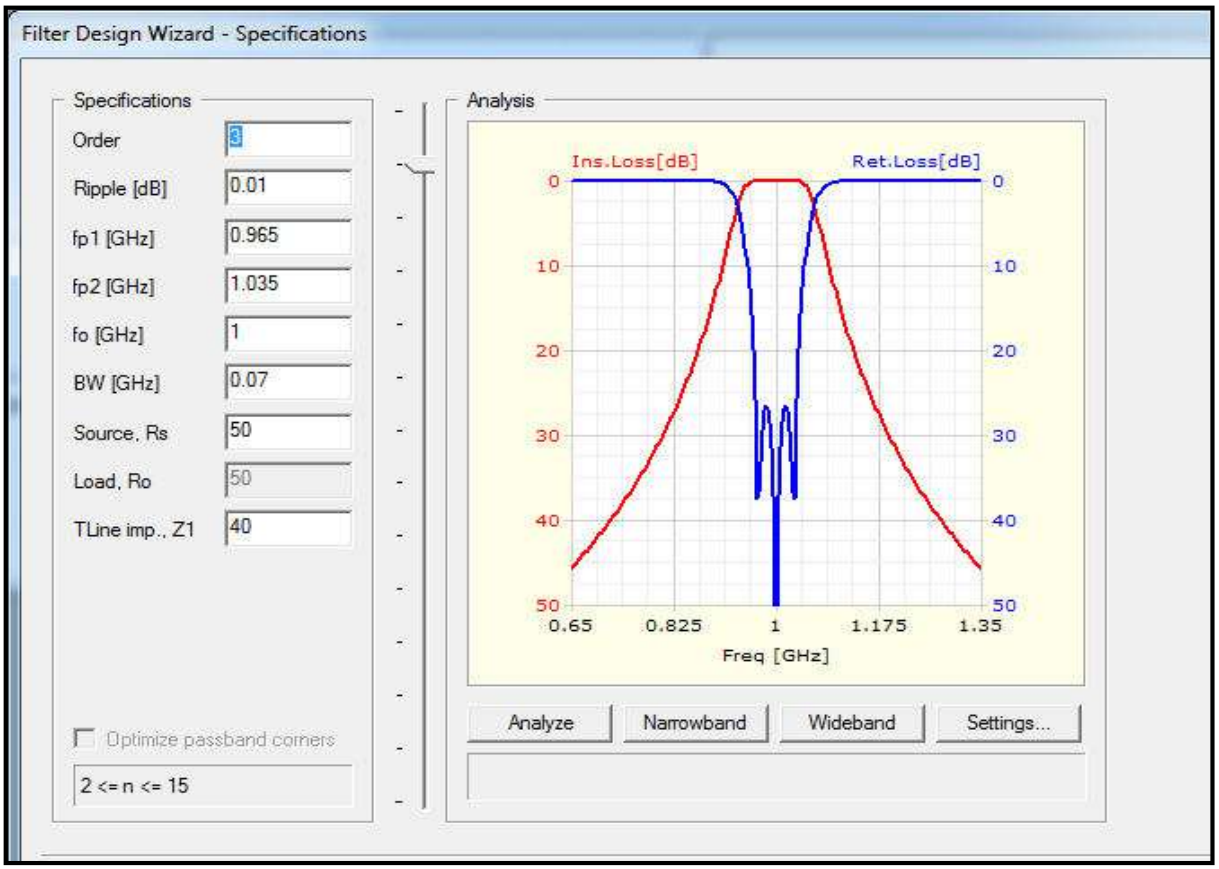


Figure III.22 : La courbe de filtre passe bande utilisé.

- **Les resultats de puissance du signal emise :**

Les résultats trouvés sont dans le tableau dessous, sachant que la puissance du signal émis est de 7dBm:

In (Mhz)	400	900	910	920	930	940	950	960
Out (mv)	0	0.1	0.2	0.4	0.9	1.7	2.2	3.2
P_{out} (mv)	0	10^-6	4*10^-6	1.6*10^-5	8.1*10^-5	2.89*10^-4	4.84*10^-4	10.24* 10^-4

η	0	1.99* 10^-7	7.98*10^ -7	3.19*10^-6	1.61*10^-5	5.76*10^-5	9.64*10^-5	2.043* 10^-4

In (mhz)	970	980	985	990	995	1000
Out (m)	2.5	2.7	3.7	4.6	4.8	4.6
P_{out} (mv)	6.25*10^-4	7.29*10^ -4	13.69*10^- 4	21.16*10^- 4	23.04*10^- 4	21.16*10^- 4
η	1.24*10^-4	1.45*10^ -4	2.72*10^-4	4.22*10^-4	4.5*10^-4	4.22*10^-4

Tableau III.3 : les résultats de rendement.

- **Programme MATLAB :**

On utilise ce programme pour dessigné les courbes :

```
In(Mhz)=[400 900 910 920 930 940 950 960 970 980 985
990 995 1000];
Out(mv)=[0 0.1 0.2 0.4 0.9 1.7 2.2 3.2 2.5 2.7 3.7
4.6 4.8 4.6];
figure; plot(in,out)
xlabel('in(MHZ)')
ylabel('out(mV)')
```

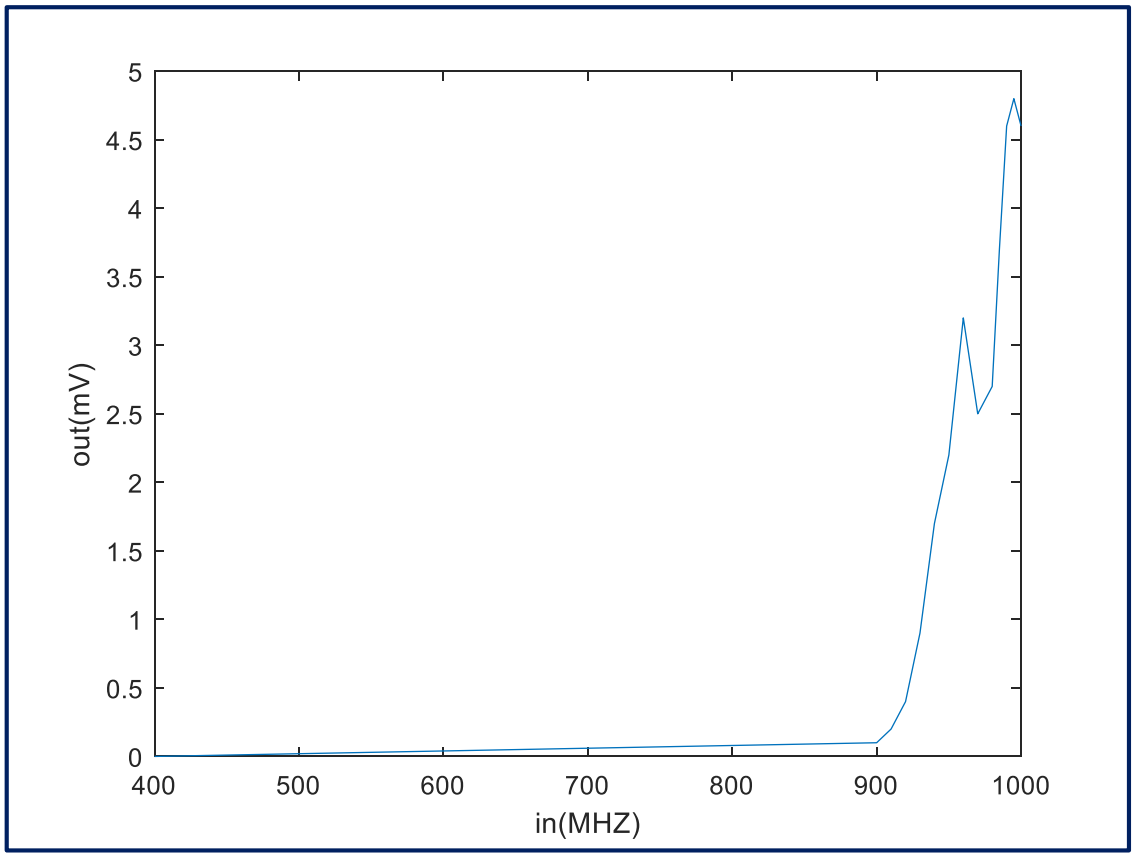


Figure III.23: La courbe de tension(out) en fonction de la fréquence(in).

- **Discussion de résultats:**

Sachant que dans ce test l'antenne peut émettre de la puissance, alors il y aura de perte de puissance de ce côté, et le reste va passer via la ligne, le filtre et le circuit de redressement.

On remarque, que les valeurs de sortie commencent à augmenter au-delà de la fréquence inférieure de la bande passante du filtre (1Ghz -10%) et qui égale à 900 MHz. Après cette valeur les tensions augmente avec une valeur considérable jusqu'à ce qu'elle atteinte 4.8 mv pour la fréquence 1 Ghz . on peut dire que le circuit redresseur fonctionne normalement mais avec la diode BAT85 il faut que la puissance d'entrée prendre en considération le seuil de travail de cette diode (ce seuil est très faible pour la diode initialement choisi HSMS2860).

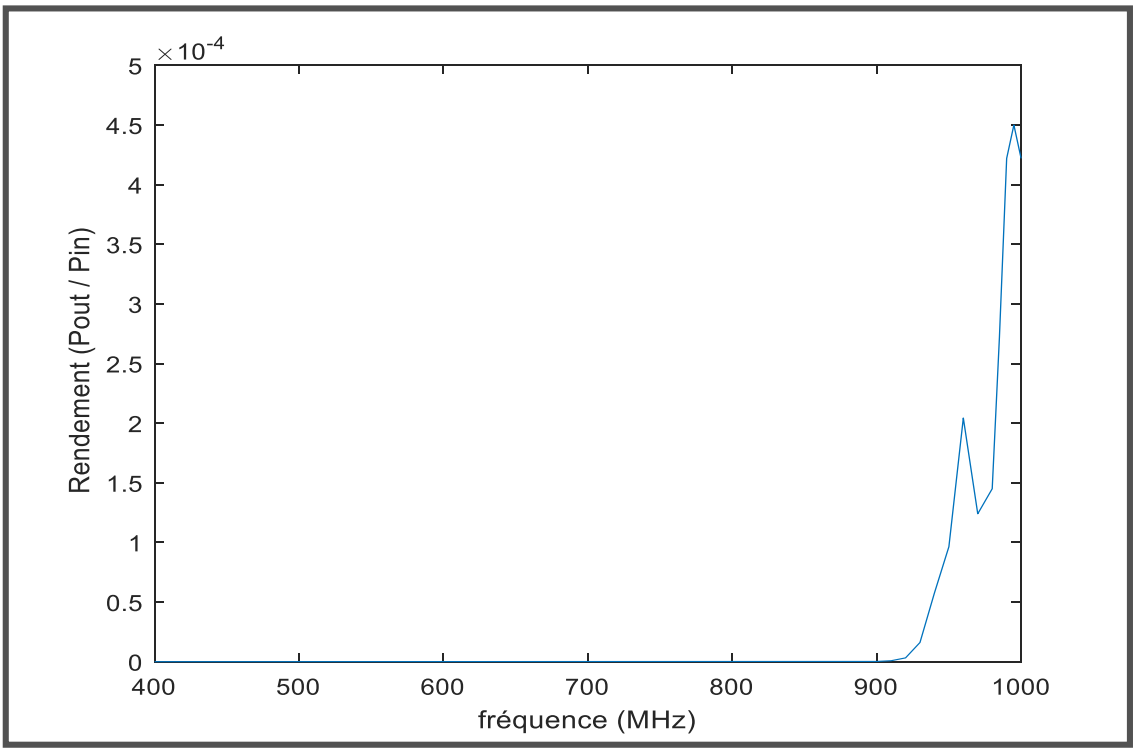


Figure III.24: La courbe de rendement en fonction de la fréquence.

III.4. Conclusion :

Une rectenna basée sur une antenne patch à 1GHz a été présentée dans ce chapitre. Elle permet de récupérer des tensions faibles de l'ordre de mV à partir d'un champ électrique incident faible qui représente une onde électromagnétique. Dans cette rectenna, on a préféré utiliser toutes les dispositifs sur la même carte PCB (imprimé) que ce soit pour l'antenne, le filtre ainsi que les lignes de transmissions, afin de minimiser le volume, avoir une architecture presque en 2D et non pas 3D, réduire le poids le maximum possible.

Les résultats trouver sont en général acceptable, vu les contraintes trouvé surtout concernant la diode et après le volume de l'antenne. Pour l'antenne on a remarqué qu'on peut récupérer des puissances de l'ordre de -40dBm (10^{-4} mW) pour les fréquences proches de 1Ghz, pourtant cette fréquence est un peu loin de la fréquence de travail idéal pour l'antenne ou le S11 est minimale. La même chose pour le circuit redresseur, on a pu récupérer et redresser des faibles signaux de l'entrée vers la sortie de l'ordre de 4.5 mV à la fréquence 1Ghz, et pourtant cette gamme de fréquence ne correspond pas réellement à celle de la diode Schottky.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Dans ce travail, on a présenté sur le chapitre1 quelques types d'antennes utilisés, les différentes caractéristiques ainsi que quelques avantages et inconvénients.

Dans le chapitre2, on a donné l'historique et l'idée de la récupération d'énergie électromagnétique, les premiers gens qui ont pensé à le réaliser. Ensuite on a donnée en détailles le schéma synoptique de rectenna, les composants utilisés, le détail technique de chaque composant et son utilité dans le circuit à réaliser.

Dans le chapitre3, on a parlé de la partie conception et réalisation du rectenna. On a expliqué chaque étape et partie de circuit toute seule et parlé du logiciel de conception et après la réalisation. Plusieurs contraintes ont limité notre réalisation et spécialement l'indisponibilité de la diode Schottky(HSMS2860) choisi dans le chapitre 2 pour être la base de notre réalisation de cette rectenna. On a utilisé alors une diode Schottky BAT85 qui travail en haute fréquences, mais elle a deux valeurs techniques qui nous limitent : la fréquence de travail loin de celle du 2G , et la puissance de travail un peu élevé par rapport à la diode choisi initialement HSMS2860.

Une rectenna basée sur une antenne patch à 1GHz a été présentée dans ce chapitre. Elle permet de récupérer des tensions faibles de l'ordre de mV à partir d'un champ électrique incident faible qui représente une onde électromagnétique. Dans cette rectenna, on a préféré utiliser tous les dispositifs sur la même carte PCB (imprimé) que ce soit pour l'antenne, le filtre ainsi que les lignes de transmissions, afin de minimiser le volume, avoir une architecture presque en 2D et non pas 3D, réduire le poids le maximum possible.

Les résultats trouver sont en général acceptable, vu les contraintes trouvées surtout concernant la diode et le volume de l'antenne. Pour l'antenne on a remarqué qu'on peut récupérer des puissances de l'ordre de -40dBm (10^{-4} mW) pour les fréquences proches de 1Ghz, pourtant cette fréquence est un peu loin de la fréquence de travail idéal pour l'antenne ou le S11 est minimale. La même chose pour le circuit redresseur, on a pu récupérer et redresser des faibles signaux de l'entrée vers la sortie de l'ordre de 4.5 mV à la fréquence 1Ghz, et pourtant cette gamme de fréquence ne correspond pas réellement à celle de la diode Schottky.

Comme perspective : on peut faire une réalisation d'une rectenna qui travaille aux fréquences plus élevées de l'ordre de 3Ghz jusqu'à 6Ghz pour se préparer à la 5G, et dans ce cas l'antenne va être très petit (l'ordre millimétrique) et alors on peut utiliser des dizaines d'antennes dans une même carte PCB et voir l'énergie qu'on peut récupérer, mais à condition de voir avant tout la disponibilité des composants qui conviens à cette réalisation.