

الجمهورية  
الجزائرية الديمقراطية  
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد -  
تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

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

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de Télécommunications

Par : TRAORE SANABA

Sujet

# Conception de topologies de rectenna pour la récupération d'énergie RF

Soutenu publiquement, le **28 / 06 / 2018**, devant le jury composé de :

**Mr CHIKH-BLED Mohammed** Professeur à l'université de Tlemcen Président

**Mr MERIAH Sidi Mohammed** Professeur à l'université de Tlemcen Encadrant

**Mr Derraz Fouad** Maitre Conférence « MCB » à l'université de Tlemcen Examineur

# DEDICACE

*Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire " Ya Kayoum "*

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère **Fanta** et à mon père **Dougoufana**, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes ces années des études, et qui a veillé sur moi tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner de l'aide et à me protéger.*

*Que dieu les gardes et les protèges.*

*À mes chères tantes: **Diaminatou et Mariatou***

*À mes adorables frères et sœurs et à toute la **famille TRAORE***

*À mes meilleurs ami(e)s: **Naminata, Oumou, Sarata, Fatoumata, Aly, Jean, Daouda**.....pour leurs soutiens, leurs amours, et tous leurs encouragements*

*et tous mes collègues du master en particulier ceux qui se reconnaîtront pour m'avoir encouragée*

*À mon encadreur **Mr Mériah Sidi Mohamed** pour son encadrement et pour son soutien constant qu'il n'a cessé de me prodiguer*



# REMERCIEMENTS

*Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la foi et le courage pour l'accomplissement de cette tâche*

*Je commence par exprimer mes remerciements les plus sincères aux honorables jurys :*

*M<sup>r</sup> CHIKH-BLED Professeur à l'université Abou Bakr Belkaid Président et M<sup>r</sup> DERRAZ FOUAD « MCB » à l'université de Tlemcen Examineur et Cher encadreur : M<sup>r</sup> MERJAH S.M, Professeur à l'université ABOU-BAKR BELKAID de Tlemcen et responsable du laboratoire LTT pour son encadrement, ses critiques et ses remarques pertinentes du début du mémoire à sa fin.*

*Je remercie aussi le personnel du laboratoire, pour leur aide et aussi Ilyes ,Bachir ,Jéan, Maciré, Ali, Samaké pour leur soutien inconditionnel et leurs judicieux conseils durant la réalisation de ce travail*

*J'évoque mes remerciements le plus profond à toute personne qui m'a aidé et qui a contribué à l'élaboration de ce travail ,dans le but du développement du savoir et l'amélioration du savoir-faire.*

*Enfin des remerciements particuliers sont dédiés à toute ma **famille***

*Pour leur amour et leur confiance.*



## *LISTES DES ABRÉVIATIONS*

<b>ADS :</b>	Advanced Design System
<b>AGC :</b>	Commande de Gain Automatique.
<b>ARCEP :</b>	Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes.
<b>ANFR :</b>	Agence Nationale des Fréquences.
<b>CST :</b>	Computer Simulation Technology.
<b>DC :</b>	Direct Curent (régime continu).
<b>EM :</b>	Champ Électromagnétique.
<b>GSM:</b>	Global System for Mobile Communications.
<b>HF :</b>	Hyperfréquence (Haute Fréquence).
<b>ISM:</b>	Industrial, Scientific and Medical.
<b>MIC:</b>	Microwave Integrated Circuit.
<b>MSA:</b>	Micro strip Antenna.
<b>RECTENNA:</b>	RECTifying+antENNA
<b>RF:</b>	Radio Frequency.
<b>RF-DC:</b>	Régime alternatif -continu
<b>RMSA :</b>	Rectangular Micro Strip Antenna.
<b>SMA :</b>	SubMiniature version A.
<b>TEM :</b>	Transverse Électromagnétique.
<b>TESF :</b>	Transmission d'Énergie Sans Fil



# *RÉSUMÉ*

Ce travail de recherche résume les points clés de la conception de topologie rectenna pour la récupération d'énergie RF.

Nous avons détaillé la structure complète d'une rectenna, pour mieux comprendre son principe de fonctionnement en mettant en évidence, les difficultés susceptibles pour le choix de la diode Schottky et de l'antenne patch.

Afin d'améliorer le rendement des rectennas nous avons utilisé un réseau d'antenne patch pour me permettre d'atteindre des efficacités élevées sur le logiciel CST.

Nous avons également explicité les différents composants avec les types de Rectennas et les différentes topologies de redresseurs.

Notre circuit de redressement était lié à un diviseur de puissance 1X2, celui de Wilkinson simulé sous le logiciel ADS à une fréquence de 2.4Ghz, afin d'avoir un circuit Rectenna total.

Et pour terminer nous avons présenté des résultats des différentes simulations du Rectenna et des perspectives.

This research work summarizes the key points of rectenna topology design for RF energy recovery.

We have detailed the complete structure of a rectenna, to better understand its operating principle by highlighting, the likely difficulties for the choice of the Schottky diode and patch antenna.

To improve the performance of the rectennas we used a patch antenna network to allow me to achieve high efficiencies on the CST software.

We also explained the different components with Rectennas types and different rectifier topologies.

Our turnaround circuit was linked to a 1X2 power divider, that of Wilkinson simulated under ADS software at a frequency of 2.4Ghz, in order to have a total Rectenna circuit.

And finally, we presented results from the different Rectenna simulations and perspectives

## Introduction générale

A l'heure actuelle, nous vivons dans un monde où la consommation d'énergie ne cesse de s'accroître, les besoins énergétiques augmentent de manière considérable tandis que les réserves s'épuisent peu à peu.

La consommation d'énergie mondiale dépend environ de 40% du pétrole, les profits dégagés par celui-ci sont donc au cœur de la problématique économique et géopolitique. Ainsi, une alternative à ces énergies fossiles serait les énergies renouvelables, malheureusement en faible émergence et ne couvrant actuellement qu'environ 13% des besoins énergétiques mondiaux.

En effet, le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant des ressources, naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes.

En outre, le soleil peut être considéré comme à l'origine de la plupart des énergies renouvelables à notre disposition: énergie éolienne, photovoltaïque, etc.

Le rayonnement solaire constitue une ressource 10000 fois supérieure à la consommation mondiale d'énergie, ressource qui serait inépuisable et disponible continuellement si l'on se situait dans l'espace.

De ce fait, le principe de transport d'énergie sans fil, qui a vu le jour il y a de cela près d'un siècle, apparaissait dans ce contexte comme une alternative intéressante.

Ce concept, dans le cadre d'une fourniture d'énergie propre et écologique à la planète, consiste à collecter l'énergie solaire disponible durablement en orbite terrestre avant de la transférer vers une station de réception via des ondes RF.

Dans ce dernier cas, l'idée directrice consiste à s'affranchir de l'utilisation des piles et batteries en captant une fraction de l'énergie environnante pour la convertir en puissance utile continue pouvant être utilisée pour alimenter l'électronique embarquée ou, autre alternative, pour prolonger la durée de vie des sources embarquées dans le cas d'un apport ponctuel et plus faible de l'énergie récupérée. Le recours aux systèmes de récupération et conversion d'énergie devrait répondre à ces besoins énergétiques et permettre ainsi de libérer l'utilisateur des contraintes de recharges périodiques, permettant ainsi une durée d'utilisation plus grande en rendant ces systèmes totalement autonomes.

Plusieurs sources d'énergie environnantes et récupérables sont disponibles. On trouve :

- L'énergie solaire qui utilise des cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité par effet photoélectrique à partir de la lumière.
- L'énergie thermoélectrique exploite le gradient de température pour produire de l'électricité.
- L'énergie vibratoire qui utilise des structures MEMS (Micro Electro Mechanical System) afin de récupérer l'énergie mécanique et la transformer en électricité.

## Introduction générale

- L'énergie radiofréquence quant à elle récupère l'énergie émise depuis des sources sans fils (FM, TV, GSM, UMTS, WIFI) via une antenne de captation, pour transformer ce signal en puissance continue par l'intermédiaire d'un convertisseur RF-DC basé généralement sur des diodes Schottky. Parmi ces micro-sources d'énergies disponibles, on trouve les sources de rayonnement Électromagnétique avec des fréquences d'émission allant du kHz au GHz.

**Du fait des normes de limitation à l'exposition aux champs électromagnétiques, le niveau de puissance RF accessible reste faible. Cependant, l'énergie RF offre des performances supérieures en termes de mobilité et de flexibilité.**

**En effet, et malgré la faible densité de puissance disponible, la récupération d'énergie RF a certains avantages, parmi lesquels le fait que les ondes radio peuvent se propager à travers les matériaux tels que le plastique, le bois, les plaques de plâtre, le béton. Cela confère aux ondes électromagnétiques une forme de disponibilité car finalement, elles sont omniprésentes dans notre environnement.**

**De plus, la multitude des sources RF et des standards de communications peut permettre d'optimiser la quantité d'énergie récupérée en concevant des dispositifs, communément appelés Rectenna (Rectifying antenna), plus évolués car multi-bande et capables de capter l'énergie sur plusieurs standards avec des niveaux de puissance souvent déséquilibrés. [1]**

**Dans certaines situations, des structures de rectification RF-DC (« rectenna ») à haute sensibilité peuvent être utilisées pour faire de la récupération d'énergie électromagnétique ambiante provenant généralement des réseaux de téléphonie cellulaire ou des réseaux informatiques sans fil. [2]**

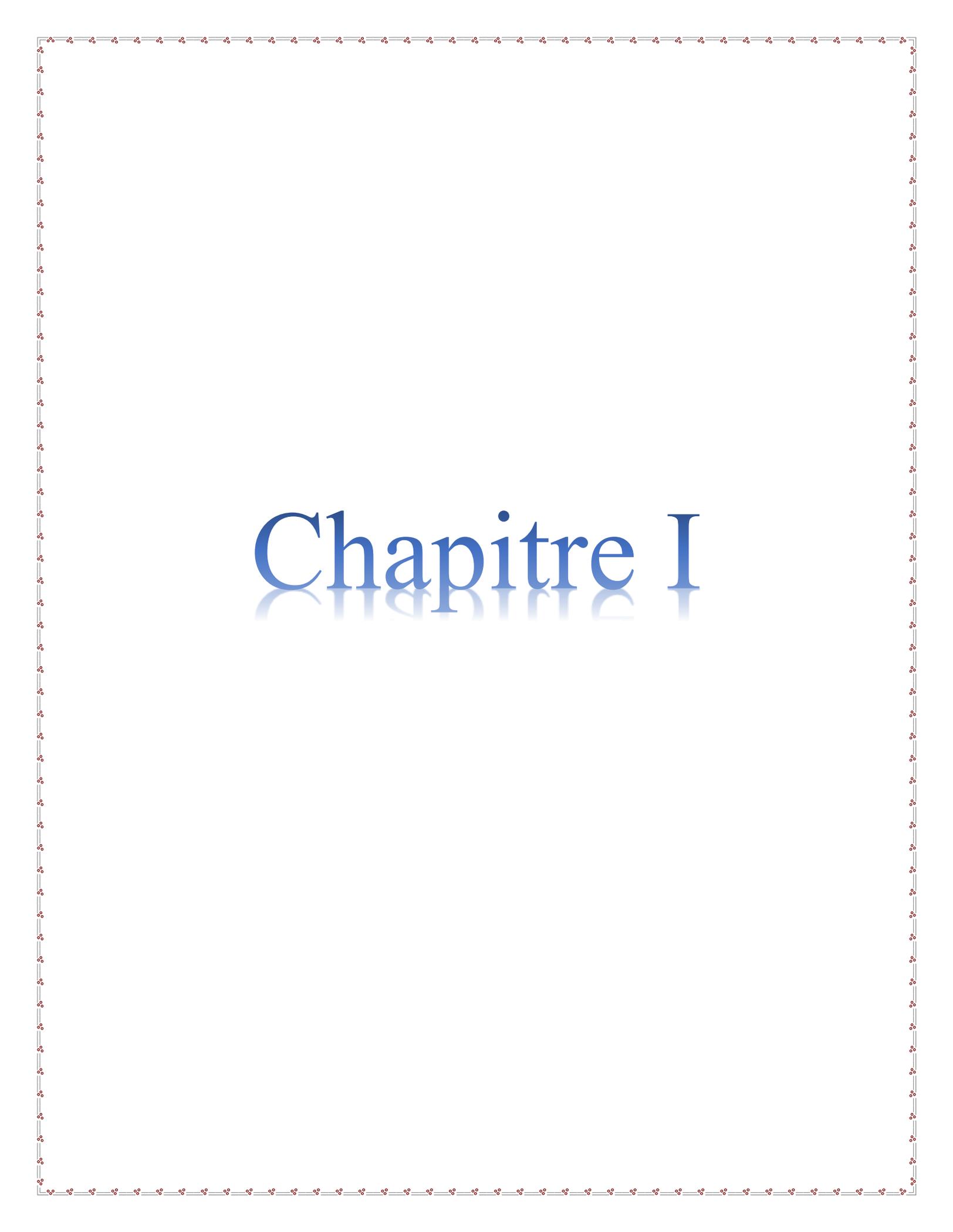
**Le but de ce mémoire de Master est une conception de topologie rectenna pour la récupération d'énergie, ce travail sera composé de trois chapitres.**

**Dans le premier chapitre, nous allons nous axer sur : une généralité des Rectennas, tout en détaillant sa structure, et le choix de la diode Schottky, avec ses différentes topologies en appliquant son utilisation avec la technologie micro ruban enfin d'avoir un meilleur rendement avec le circuit de conversion.**

**Dans le second chapitre, on parlera sur : les réseaux d'antennes et les différents types de celui-ci ,nous énonçons également un diviseur de puissance avec sa simulation sur le logiciel ADS(Momentum) ,qui est généralement utilisé pour l'optimisation et l'adaptation de la ligne d'alimentation et nous allons simulé sur CST pour l'antenne patch.**

**Et le troisième chapitre sera la présentation les résultats de simulations.**

**Pour enfin terminer par une conclusion générale et des perspectives**



# Chapitre I

## CHAPITRE I : Généralités des rectennas

### I. Introduction

De nos jours, avec la miniaturisation et le développement de l'intelligence répartie des systèmes électroniques, il est devenu de plus en plus difficile d'imaginer un domaine où l'électronique n'est pas encore présente.

Ces systèmes sont de plus en plus présents dans la plupart des domaines de la vie, sans restriction sur leur localisation dans l'espace. Pour faciliter leur mobilité et assurer une meilleure intégration dans l'environnement, leur taille devra être réduite. L'un des problèmes à résoudre et qui représente l'enjeu de cette étude est :

- ✚ Leur autonomie énergétique ;
- ✚ Le choix de la structure d'antenne la plus appropriée pour une meilleure efficacité;
- ✚ La modélisation exacte du redresseur (diode Schottky) pour les puissances RF;
- ✚ Avoir une structure la plus compacte possible pour l'obtention d'un rendement élevé dans les systèmes RF ;
- ✚ L'optimisation de la rectenna complète dans un même logiciel de simulation;

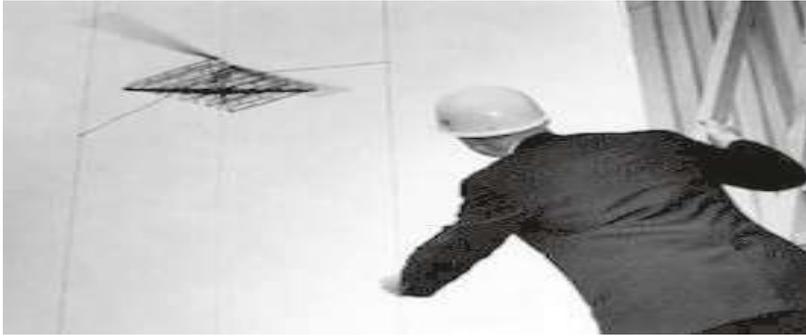
Les techniques d'alimentation classiques par pile ou par batterie restent difficiles à envisager dans certaines applications, elles sont limitées en autonomie, nécessitent des remplacements périodiques et leur recyclage est coûteux. Pour rendre ces systèmes et objets communicants plus autonomes en énergie et augmenter la durée de vie de la batterie, les systèmes de récupération d'énergie électromagnétique sont une alternative très intéressante. La récupération et la conversion de l'énergie RF en tension continue est possible grâce à l'utilisation de la rectenna qui est une antenne rectificatrice inventée et construite par William C. Brown dans les années 1960.

Ces rectennas fonctionnent avec un maillage de diodes Schottky et n'importe quel type d'antenne. La sortie finale de la rectenna est un courant continu [3]. Les rectennas développés doivent posséder une forte sensibilité (faible puissance disponible), être compact et à faible coût [4].

### II. Historique

En 1960, William. C. Brown, le pionnier de la transmission de l'énergie microonde (MPT) a mené plusieurs expériences sur la TESH, il est le premier à avoir réalisé une antenne rectificatrice communément appelé aujourd'hui «Rectenna» ses recherches sur le redressement de signal lui ont permis de régler le problème de rectification RF-DC.

Par conséquent, en 1964, il a pu, en partenariat avec « l'U.S. Air force », faire planer un hélicoptère en l'alimentant depuis le sol, par un faisceau d'ondes électromagnétiques à une fréquence de 2,45 GHz, l'hélicoptère, représenté sur la figure 1 a plané pour une durée de 10h à une altitude d'environ 15 m [5].



*Figure I.1: Photographie de William C. Brown et du prototype de plateforme hélicoptère alimentée sans fil*

L'efficacité de la conversion RF-DC dépend de la quantité d'énergie absorbée et de la charge connectée. Si l'entrée et la charge connectée ne sont pas optimales, le rendement diminue considérablement. 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. Cependant, le rendement le plus important fut atteint par Brown chez Raytheon William en 1977. 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'entrée de 8 W.

En 1982, 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 60Mw. [6] Plusieurs projets de recherche axés sur l'étude et l'optimisation de rectennas ont été entrepris par le laboratoire Ampère et ses partenaires : le laboratoire SATIE et le laboratoire ESYCOM de l'université de Paris-Est Marne-la-Vallée.

En 2009, Vlad Marian entama l'étude et l'optimisation de circuits de rectennas pour une application de réveil à distance d'un circuit à zéro-consommation en mode veille. Dans ce contexte, il était question de travailler sur des niveaux de la puissance RF entre quelques  $\mu\text{W}$  et quelques mW. Enfin, au sein du projet ANR REC-EM, deux thèses ont été financées et ont démarré en 2010. Elles sont axées sur le développement de systèmes de grappillage de l'énergie électromagnétique ambiante basés sur l'usage de rectennas compactes et multi-bandes associées à des dispositifs de conversion DC-DC à très faible consommation. L'utilisation de la rectenna telle qu'elle est pour l'alimentation des systèmes portables présente plusieurs limitations. Ainsi, les niveaux de tension délivrés par la rectenna sont relativement faibles et insuffisants dans le cas où la puissance RF est proche du niveau ambiant. Aussi, les performances énergétiques de la rectenna ne dépendent pas uniquement de sa conception interne mais également des conditions extérieures de charge [7].

### III. Description de quelques structures RF-DC à très faibles puissances

#### III.1 Définition

La rectenna tire son nom de l'association de deux mots anglo-saxons qui sont « Rectifying +antenna », pour « Antenne » et « Redresseur ». Comme son nom l'indique, elle est typiquement composée d'une antenne de réception et d'un circuit de redressement qui convertit l'énergie électromagnétique collectée par l'antenne en tension continue.

#### III.2 Structure d'une rectenna

La conversion des radiofréquences en tension continue (RF-DC) est réalisée grâce aux actions conjointes de ces éléments distincts illustrés ci-dessous sur la figure 2 qui forment le circuit de redressement.

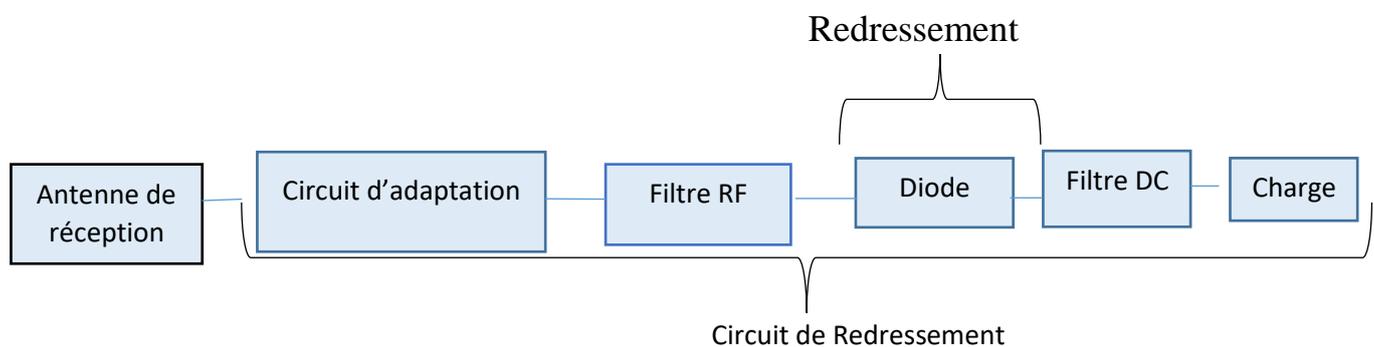


Figure I.2: Schéma bloc d'une rectenna

##### III.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une rectenna (Schéma représenté sur la Figure I.2) est le suivant: une antenne de réception suivie d'un circuit de conversion RF-DC. Ce dernier est composé d'une ou de plusieurs diodes, d'un filtre RF, d'un filtre DC et d'une charge résistive. Le filtre RF ou HF bloque les harmoniques créés par les non-linéarités des diodes et assure l'adaptation entre l'antenne et le reste du circuit de conversion. Le filtre DC est composé le plus souvent d'un bloc capacité parallèle, il permet d'isoler la charge de sortie de la partie RF.

##### III.2.2 L'antenne de réception

L'antenne est l'interface entre l'espace libre et le milieu guidé (redresseur) et vice-versa. En émission, l'antenne convertit le signal RF à son entrée en ondes électromagnétiques et rayonne ces ondes dans l'espace libre, l'opération inverse est réalisée en réception. Dans le but d'obtenir le meilleur rendement possible, l'antenne doit respecter quelques critères tels que l'adaptation, le gain, le diagramme de rayonnement, l'efficacité de rayonnement, la polarisation et la taille. [8]

### III.2.2.1 Coefficient de réflexion S11

Comme ceci a été expliqué avant, une antenne est définie par la norme comme étant un dispositif utilisé pour rayonner le champ électromagnétique dans l'espace ou pour le capter. L'antenne est donc la structure de transition entre la propagation libre dans le vide et la propagation guidée dans la matière. Dans les deux cas (antenne en émission et en réception), l'antenne doit assurer un transfert maximal de l'énergie. En effet, il est souhaitable que toute l'énergie soit convertie et transmise.

Pour ce faire, il faut adapter l'antenne à la source d'énergie électromagnétique, si cela n'est pas fait, les ondes électromagnétiques seront réfléchies vers la source, interféreront avec les ondes électromagnétiques incidentes et des interférences destructives indésirables se produiront. Une onde dite stationnaire s'établira donc dans le milieu guidé. Le paramètre qui nous permet de quantifier l'adaptation en impédance est le coefficient de réflexion exprimé par  $\Gamma$  ou S11. Son module peut être exprimé en linéaire ou en décibel (dB), même s'il est plus commun de l'exprimer en dB.

Rappelons qu'une grandeur exprimée en décibel est reliée à la grandeur naturelle par l'expression :

$$S_{11 \text{ dB}} = 20 \cdot \text{Log}_{10} (|S_{11}|) \quad (\text{I.1})$$

Il est le rapport entre l'onde réfléchie  $b_1$  et l'onde incidente  $a_1$ , son module peut également être exprimé en fonction de l'impédance d'entrée de l'antenne :

$$|S_{11}| = \frac{|Z_e - Z_c|}{|Z_e + Z_c|} \quad (\text{I.2})$$

Où  $Z_c$  est l'impédance caractéristique de la ligne de transmission (guide d'ondes, microstrip, Coplanaire ...), et  $Z_e$  est l'impédance (complexe) d'entrée de l'antenne.

Le coefficient de réflexion est un paramètre utilisé également pour définir la bande passante (BP) de l'antenne. La bande passante peut être définie comme la bande de fréquence où le transfert d'énergie est maximal. De façon générale, nous considérons la BP quand le coefficient de réflexion est inférieur à -10dB.

Dans le cas de la rectenna, la fréquence de fonctionnement est déterminée en amont. Cependant, il est indispensable que l'antenne et le redresseur soient adaptés en impédance à la même fréquence, il est également souhaitable que la BP de l'antenne soit large pour permettre de garder une bonne adaptation même quand les fréquences de fonctionnement de l'antenne et du redresseur sont disjointes. Rappelons que les deux entités sont conçues de manière séparée et souvent leurs fréquences de fonctionnement sont légèrement décalées. Ceci est dû aux incertitudes inévitables sur les paramètres intrinsèques du substrat utilisé et aux incertitudes sur la valeur des éléments localisés (diode, capacité, inductance...). Il serait donc appréciable d'avoir une BP large afin d'atteindre une bonne efficacité malgré les décalages fréquentiels éventuels entre l'antenne et le redresseur.

### III.2.2.2 Diagramme de rayonnement

Par définition, il s'agit de la représentation des propriétés de rayonnement suivant les coordonnées spatiales. Habituellement, c'est dans la région de champ lointain où la distribution de la puissance rayonnée est indépendante de la source qui détermine le diagramme de rayonnement. Le modèle présente normalement les valeurs de champ normalisé (puissance) en respectant les valeurs maximales.

La propriété de rayonnement la plus préoccupante est la distribution spatiale à deux ou à trois dimensions (2D ou 3D) de l'énergie rayonnée en fonction de la position de l'observateur le long d'un chemin ou d'une surface de rayon constant.

Dans la pratique, le modèle à trois dimensions est parfois nécessaire et peut être construit en une série de modèles à deux dimensions. Pour la plupart des applications pratiques, quelques graphiques du diagramme en fonction de  $\varphi$  pour certaines valeurs particulières de la fréquence, ainsi que quelques graphiques en fonction de la fréquence pour certaines valeurs particulières de  $\theta$  fourniront la plupart des informations utiles nécessaires, où  $\varphi$  et  $\theta$  sont les deux axes dans un système en coordonnées sphériques.

Le rendement des antennes à polarisation linéaire est habituellement décrit en termes des deux plans E et H. Le plan E est défini comme étant le plan contenant le vecteur champ électrique et la direction du rayonnement maximal tandis que le plan H est défini comme étant le plan contenant le vecteur champ magnétique et la direction du rayonnement maximal.

Il existe trois modèles de rayonnement couramment utilisés pour décrire la propriété du rayonnement d'une antenne:

- **Isotrope** – Une antenne hypothétique sans perte ayant un rayonnement égal dans toutes les directions. Il est valable uniquement pour une antenne idéale et est souvent pris comme référence pour exprimer les propriétés directives des antennes pratiques.
- **Directionnel** – Une antenne qui possède la propriété de rayonnement ou réception des ondes électromagnétiques d'une manière plus efficace dans certaines directions que dans d'autres. Cela est généralement applicable à une antenne où sa directivité maximale est significativement supérieure à celle d'un dipôle demi-onde.
- **Omnidirectionnel** – Une antenne ayant un modèle non-directionnel essentiellement dans un plan donné et un modèle directionnel dans n'importe quel plan orthogonal. Afin de définir les propriétés directionnelles du diagramme de rayonnement de l'antenne, l'on fait appel à la notion de directivité  $D$  [8].

### III.2.2.3 Directivité D

La directivité d'une antenne dans une direction est le quotient entre la valeur de la fonction caractéristique de rayonnement dans cette direction à sa valeur moyenne dans tout l'espace [9]. Elle est définie par :

$$D(\theta, \phi) = \frac{F_n(\theta, \phi)}{\frac{1}{4\pi} \iint F_n(\theta, \phi) d\Omega} \quad (\text{I. 3})$$

La directivité maximale est obtenue pour le cas où  $F_n(\theta, \phi) = 1$  et c'est cette direction qui est encore appelé l'axe de l'antenne [9].

### III.2.2.4 Efficacité d'une antenne

C'est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance d'alimentation définit par :

$$\eta = \frac{P_0}{P_t} \quad (\text{I. 4})$$

où  $P_t$  est la puissance d'alimentation et  $P_0$  la puissance rayonnée.

Elle permet de mesurer le taux de transformation et est toujours inférieur à 1.

$$\eta \leq 1 \quad (\text{I. 5})$$

### III.2.2.5 Gain d'une antenne

Le gain d'une antenne dans une direction est défini par le rapport de la densité de puissance rayonnée dans cette direction à la densité de puissance  $S_{ri}$  qui serait rayonnée par une antenne isotrope sans pertes, les deux antennes étant alimentées par la même puissance et placées à la même position [9].

$$G(\theta, \phi) = \frac{S_r(\theta, \phi)}{S_{ri}} \quad (\text{I. 6})$$

### III.2.2.6 Impédance d'entrée d'une antenne

On appelle impédance d'entrée de l'antenne l'impédance vue à l'entrée de celle-ci. Elle est représentée par :

$$Z_e = R_e + jX_e \quad (\text{I.7})$$

La résistance d'entrée  $R_e$  représente un terme de dissipation. Il est lié, d'une part à la puissance rayonnée et d'autre part, à la puissance perdue par effet Joule. Cette dernière est en général petite par rapport à la puissance rayonnée pour assurer le fonctionnement optimal de l'antenne. Cependant, les pertes par effet Joule peuvent représenter des valeurs non négligeables en fonction de la géométrie de l'antenne. Les pertes dans le plan de masse sont aussi à prendre en compte.

La réactance  $X_e$  est liée à la puissance réactive stockée au voisinage de l'antenne.

On peut utiliser des tronçons de lignes parallèles à la ligne d'alimentation afin de supprimer la réactance  $X_e$ .

### III.2.2.7 Adaptation d'une antenne

L'impédance d'entrée de l'antenne est utilisée pour insérer cet élément de façon optimale dans la chaîne de l'émetteur (ou du récepteur). Si l'impédance caractéristique de la ligne de propagation est  $Z_0$  et l'impédance d'entrée de l'antenne  $Z_e$ , le signal se réfléchit à l'entrée de l'antenne avec un coefficient  $\Gamma$  dont l'expression est :

$$\Gamma = \frac{Z_e - Z_0}{Z_e + Z_0} \quad (I.8)$$

Il correspond à un paramètre de transmission de la matrice de répartition ( $S_{21}$ ) proche de 1 et à un coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ) proche de 0 (en valeurs linéaires). On admet qu'une bonne adaptation est obtenue lorsque le coefficient de réflexion est inférieur à -10 dB. Cela correspond à un rapport d'ondes stationnaires (VSWR Voltage Standing Wave Ratio), compris entre 1 et 1,2. Le rapport d'ondes stationnaires est défini comme le rapport de la tension maximale à la tension minimale sur une ligne.

Dans le cas où le coefficient de réflexion est non nul, un système d'ondes stationnaires apparaît et la puissance émise par le générateur n'est pas transmise de façon optimale à l'antenne.

Pour améliorer l'adaptation d'une antenne, tous les moyens associés aux techniques hyperfréquences sont utilisables. Généralement l'impédance du générateur est soit  $50\Omega$  soit  $75\Omega$  [9].

### III.2.2.8 Alimentation d'une antenne micro ruban

Comme nous venons de le voir, l'adaptation est un point fondamental dans la conception des antennes. Nous allons présenter quelques exemples montrant l'influence de la forme du dispositif d'alimentation. Les antennes planaires qui ont une dimension de l'ordre de la demi-longueur d'onde présentent des exemples variés d'alimentations. Il est possible de choisir différentes formes d'alimentation et différents points d'excitation [9].

Le choix de l'antenne associée au circuit de rectification dépend avant tout du type de charge à alimenter et de la nature de l'onde incidente. Nous retrouvons dans la littérature une diversité importante dans le choix des antennes. La grande majorité des auteurs utilisent des antennes patch et des dipôles. Pour l'antenne patch, le gain important permet d'élever la puissance fournie au convertisseur et donc obtenir un meilleur rendement de conversion. D'autres formes d'antennes, moins utilisées que les deux citées, ont un intérêt grandissant, la plus connue est l'antenne circulaire (de forme spirale sur plan) qui est de plus en plus utilisée dans les travaux récents [10].

### III.2.2.8.1 Alimentation par ligne micro ruban

Dans ce cas d'alimentation, on relie une ligne microstrip au patch. Cette ligne lui amène de l'énergie. Il existe cependant un inconvénient dans ce type d'alimentation vu qu'elle génère un rayonnement parasite (figure I.3) [11].

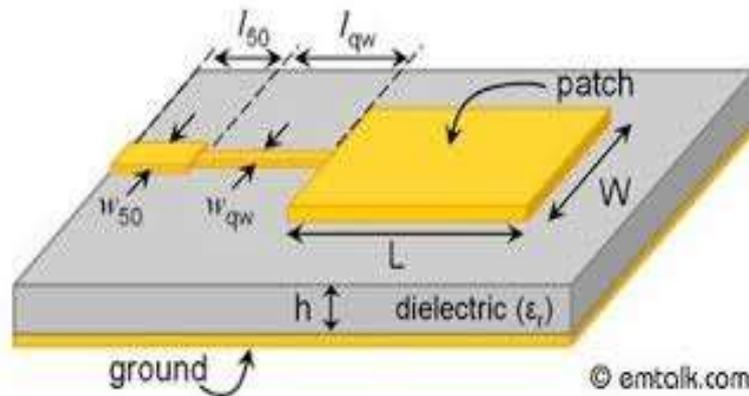


Figure I.3: Une ligne microstrip au patch

Cette disposition présente un inconvénient si la ligne rayonne. C'est le cas en très haute fréquence. Le rayonnement de la ligne perturbe alors celui de l'antenne qui ne présente pas la même pureté de polarisation. Cependant pour les cas usuels, cette technique très utilisée, présente le grand avantage de la simplicité de réalisation.

Pour améliorer l'adaptation entre la ligne micro ruban et l'antenne, il est courant de réaliser des encoches (figure I.4), dont la taille est à calculer afin d'obtenir une meilleure adaptation.

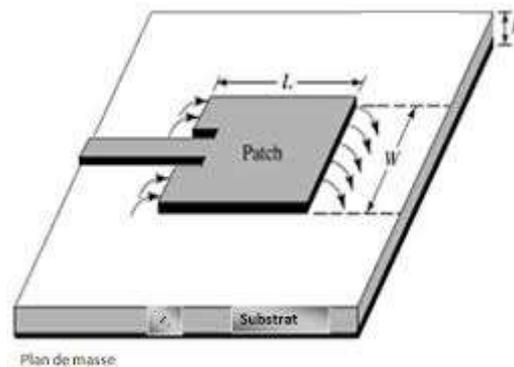


Figure I.4: L'antenne patch avec encoche

Dans notre cas nous utiliserons l'antenne patch pour la réception à la fois de l'énergie à convertir mais aussi un signal qui sera transmis par un port secondaire de l'antenne.

Pour pouvoir fixer l'impédance de l'antenne, et ceci est valable pour toutes les antennes patches, il suffit de faire translater le «feed point» du centre du patch à son extrémité, en effet, la position du point d'alimentation définit l'impédance de l'antenne.

Le choix d'une antenne n'est pas déterminé que par sa forme géométrique, le substrat utilisé pour la réalisation de l'antenne est également un paramètre important. En effet, plus la permittivité relative du substrat est élevée, plus l'antenne sera réduite. Le facteur de pertes est également important puisque celui-ci doit être le plus faible possible. [11]

### III.2.3 Circuit d'adaptation

Le signal RF est envoyé au redresseur, par l'intermédiaire d'un circuit d'adaptation, utilisé pour assurer un transfert maximal de la puissance RF. En outre l'adaptation, de ce module doit jouer le rôle d'un **filtre passe-bande**.

### III.2.4 Le Filtre RF

Le filtre d'entrée HF ou RF est un filtre passe-bas à double fonction. Il assure d'une part la rejection des harmoniques créées par le circuit de redressement (qui est un circuit non linéaire), et l'adaptation de l'antenne au circuit de redressement.

Ce filtre HF peut être directement intégré dans l'antenne de réception, pour obtenir ce qu'on appelle une antenne à rejection d'harmoniques. Ce type d'antenne est notamment intéressant du fait qu'il réduit les dimensions de la rectenna ainsi que son coût [12].

### III.2.5 La diode SCHOTTKY

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, une étude paramétrique sur les éléments de la diode doit être réalisée.

Le circuit de redressement est basé sur une ou plusieurs diodes Schottky, il utilise une jonction métal/semi-conducteur à la place d'une jonction PN comme pour les diodes conventionnelles. Pour une polarisation directe (d'environ 1mA).

La diode Schottky est un composant important, largement utilisé dans les applications de radiofréquence. Elle possède de nombreuses similitudes avec la diode à pointes. En fait beaucoup de premiers composants actuels sont faits à partir de techniques de fabrication complètement différentes. Ceci présente plusieurs avantages dans certaines circonstances, car la diode a une chute de tension directe très faible, et deuxièmement une vitesse de commutation très élevée. Ces deux propriétés la rendent idéale pour des applications de radiofréquence et lui permettent également d'être utilisée dans de nombreux autres domaines.

La structure de la diode SCHOTTKY est représentée sur la (figure I.5). La résistance série « RS » représente la résistance des contacts métalliques,  $C_j$  est la capacité de jonction qui est contrôlée par la surface du contact Schottky ainsi que de la tension appliquée à la jonction. La résistance  $R_j$  de la jonction dépend de la tension  $V_j$  ou  $V_f$  aux bornes de la jonction métal

semi-conducteur, ainsi que du courant total qui passe à travers la jonction et la résistance  $R_L$  de charge [13].

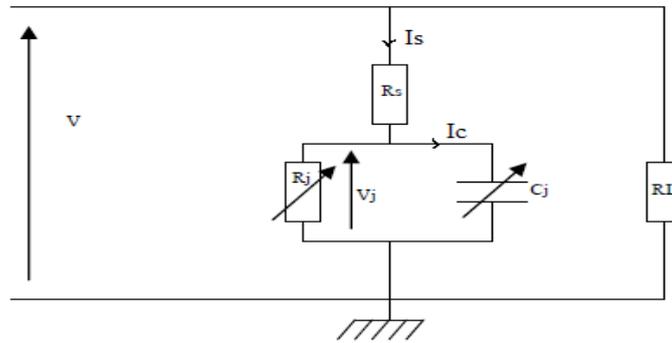


Figure I.5: Circuit équivalent de la diode Schottky en hautes fréquences.

La résistance de jonction  $R_j$  peut être exprimée par la relation suivante:

$$R_j = \frac{nkT}{q(Is+Ib)} \quad (I.8)$$

Avec

**n**: Facteur d'idéalité

**k** : constante de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$ )

**T** : température de la jonction en Kelvin

**q**: charge d'un électron ( $1.6 \cdot 10^{-9} \text{C}$ )

**Is** : courant de saturation

**Ib** : courant de polarisation

La résistance de jonction dépend de trois courants :

- ✓ Courant de saturation « **Is** ».
- ✓ Courant de polarisation « **Ib** ».
- ✓ Courant « **Ic** » qui est dû à la conversion dans la diode.

En faibles signaux, **Ic** est plus faible que **Is** et peut être négligé, mais en fort signaux, la diode se place dans la région non-linéaire donc **Ic** augmente, ce qui implique une variation de  $R_j$  et donc une variation d'impédance de la diode en fonction du niveau de puissance [13].

### III.2.6 Le Filtre DC

Le filtre de sortie DC est un filtre passe-bas comprenant une capacité en parallèle avec la charge. Ce filtre laisse passer la puissance DC et bloque l'énergie RF. La distance entre la

diode et la capacité de sortie est utilisée pour ajuster la capacitance de la diode, ce qui est nécessaire pour maximiser l'efficacité de la diode [12].

## IV. Topologies de redresseur

Le redresseur est la partie de la rectenna qui effectue la conversion RF-DC, l'objectif du redresseur est d'effectuer une conversion RF-DC avec le rendement le plus élevé.

Les convertisseurs RF-DC sont de deux types : les convertisseurs à diodes et les convertisseurs synchrones.

Les diodes Schottky restent à la base d'une grande majorité de circuits rectenna mais les semi-conducteurs FET ont une place de plus en plus importante, surtout lorsqu'il s'agit de convertir à des fréquences relativement faibles.

La fréquence de conversion et le niveau de puissance à convertir sont les critères principaux à prendre en compte dans le choix d'un mode de conversion. Le domaine fréquentiel d'utilisation des convertisseurs synchrones se situe en dessous du gigahertz alors que celui des diodes Schottky est compris entre 800 MHz et plusieurs gigahertz. En ce qui concerne la puissance, les convertisseurs synchrones sont limités généralement à des applications où la tension de sortie ne dépasse pas 2V, alors que les diodes Schottky vont bien au-delà.

Les convertisseurs d'énergie micro-onde à base de diodes sont tous réalisés à partir de diodes Schottky. A la différence des diodes classiques qui sont des jonctions p-n, les diodes Schottky sont une jonction métal – semi-conducteur.

Cette particularité leur procure une tension de seuil plus basse que celle des diodes classiques, mais surtout un temps de commutation très court ce qui rend leur utilisation en hyper-fréquence fort répandue [10].

Les diodes classiques ( $V_s = 0,6 \text{ V}$ ) ne peuvent pas être utilisées dans ce cas-là car elles ont une tension de seuil élevée. En effet, sa tension de seuil varie entre 0,1V à 0,3V, celle-ci est plus sensible aux faibles niveaux de tensions délivrées par l'antenne et peut fournir une tension DC à partir de faibles densités de puissance (de l'ordre de -20 dBm). Aujourd'hui, il existe également des diodes zéro-bias qui fonctionnent à des puissances encore plus .

### IV.1 Topologie série

C'est la topologie la plus simple, elle utilise une simple diode en série pour redresser le signal RF (Figure I.6).

Il s'agit d'un redressement simple alternance, le filtre passe-bas, qui est généralement une capacité, permet de récupérer la composante DC. Ce type de redresseur est le plus utilisé pour des niveaux de puissance faibles en entrée, de l'ordre de -15 dBm. Si le rendement de conversion doit être maximisé à une fréquence particulière, un circuit d'adaptation est utilisé en amont de la diode. Il peut être composé de composants localisés tels que les capacités et les inductances ou bien d'éléments distribués tels que les stubs. La simplicité de cette topologie et ses résultats en faibles puissances font de cette topologie celle qui est la plus répandue dans la conception des rectennas.

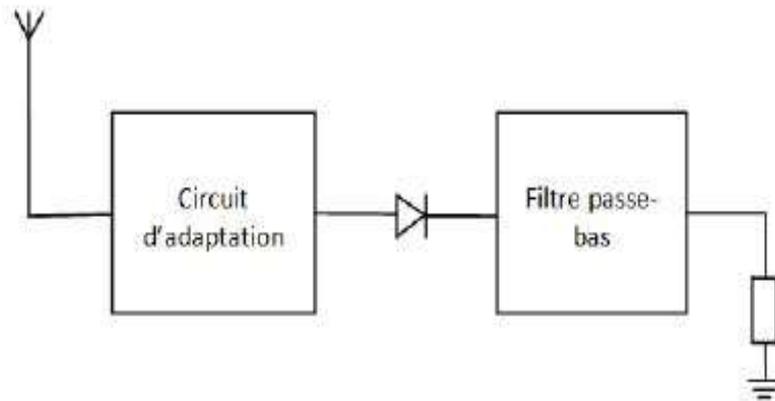


Figure I.6: Topologie série

#### IV.2 Topologie shunt (parallèle)

C'est une topologie à redressement simple alternance également, la diode est montée en parallèle (Figure 7), avec l'anode ou la cathode connectée à la masse, la diode est donc auto-polarisée par la tension DC qu'elle génère.

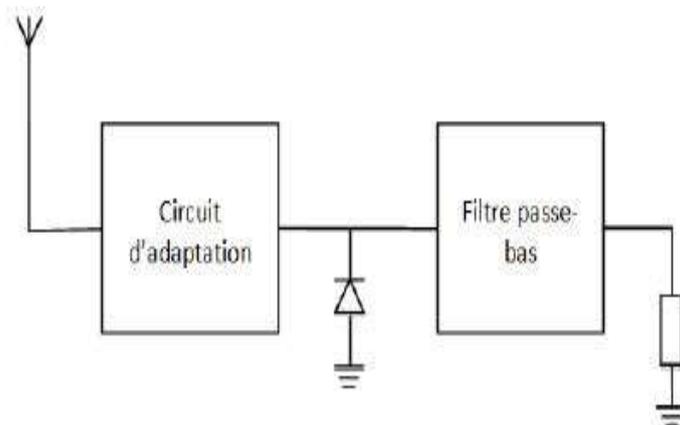


Figure I.7: Topologie parallèle

#### IV.3 Topologie doubleur de tension

Le doubleur de tension peut être vu comme l'association des deux topologies décrites précédemment (Figure 8), avec en plus une capacité de stockage en entrée pour l'une des deux alternances. Il s'agit d'un redressement double alternance, pour l'alternance positive par exemple, la diode D1 est passante et la diode D2 est bloquée, le signal est donc transféré à la charge. Dans le cas de l'alternance négative, la diode D2 est passante et la diode D1 est bloquée, le signal redressé est stocké dans la capacité à l'entrée et transmis en même temps que la prochaine alternance positive.

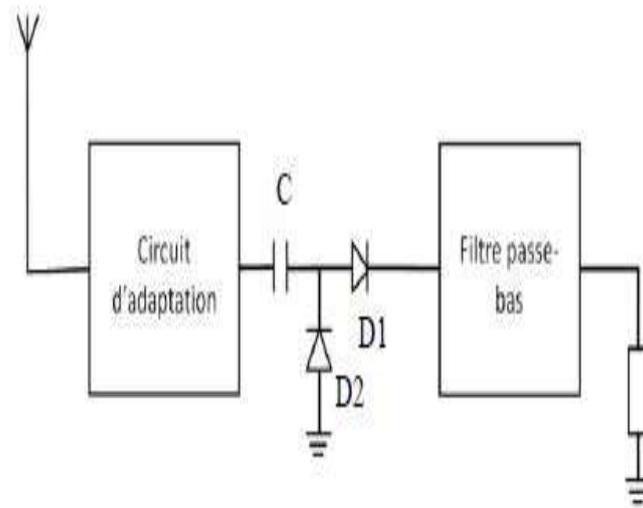


Figure I.8:doubleur de tension

La topologie doubleur est plus adaptée pour des niveaux de puissance en entrée plus importants que pour le cas de la simple diode. En effet, les pertes au niveau de la diode, dues particulièrement aux pertes par effet joule au niveau de sa résistance série intrinsèque, augmentent avec l'utilisation de plus d'une seule diode. Ces pertes-là deviennent négligeables quand la puissance en entrée est plus importante à cause de la faible valeur de la résistance série.

#### IV.4 Multiplieur de tension

Le multiplieur est réalisé en cascade de deux doubleurs de tensions. La topologie du multiplieur est donnée par la (Figure I.9).

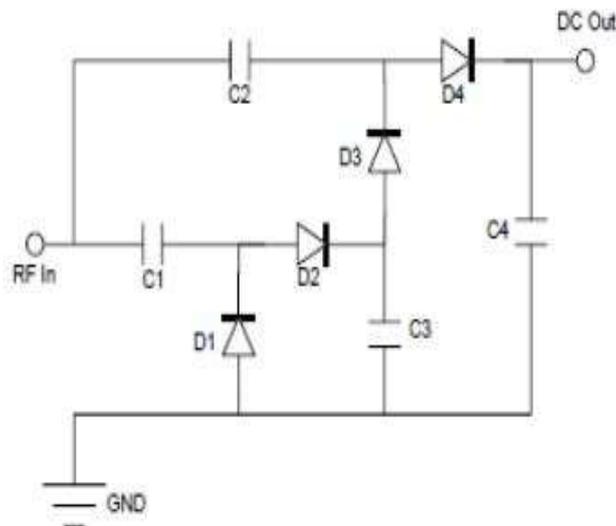


Figure I.9:Topologie multiplieur Pont de diodes

La topologie « pont de diodes » peut également, 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 I.10), 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 un pont de diode et une topologie plus adaptée pour des puissances élevées. [14]

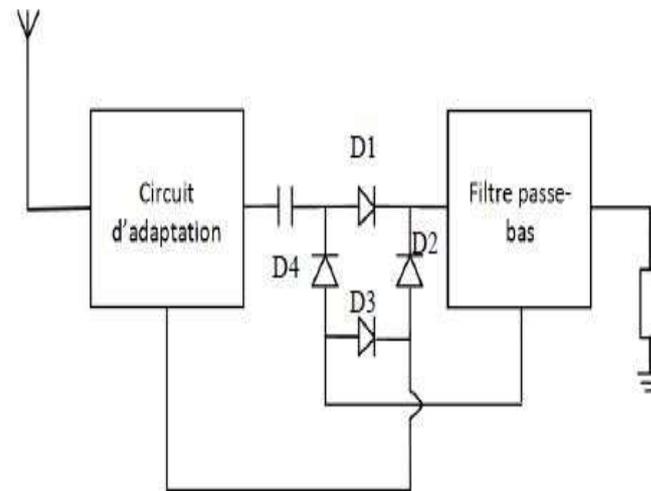


Figure I.10: Topologie de pont de diodes

#### IV.5 Comparaison entre les différentes topologies

La Table I.1 ci-dessous donne une comparaison vis-à-vis des performances et de l'utilisation typique de chaque structure de topologies de circuits rectenna:

	Description	Avantages	Inconvénients	Application
Monodiode 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
Monodiode shunt	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	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	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	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 I.1** : Comparaison entre les différentes topologies

## V. La charge

Les performances de la rectenna vont également dépendre de la valeur de la charge de sortie.

Le rendement ainsi que la tension de sortie ne seraient pas affectés de la même façon. Néanmoins, les dimensions de la ligne reliant la diode à la charge nécessitent une optimisation pour permettre un meilleur filtrage.

La charge modélise l'impédance présentée par le capteur sans fil que l'on souhaite alimenter [14].

## VI. Quelques exemples de circuits de rectennas

### VI.1 Rectenna avec une antenne micro-ruban à rejection d'harmoniques

La (figure I.11) montre le schéma d'une rectenna en topologie parallèle connectée à un patch circulaire à la fréquence 2.4 GHz. La rectenna, gravée sur le RT/ Duroid 5870, utilise une diode Schottky HSMS 2820 pour le circuit de redressement. Cette rectenna développée par J. Y. Park est capable d'éliminer les harmoniques générées par la diode avec la forme spécifique de l'antenne [12]. Son rendement de conversion est de 77.8% pour une charge de  $150\Omega$ .

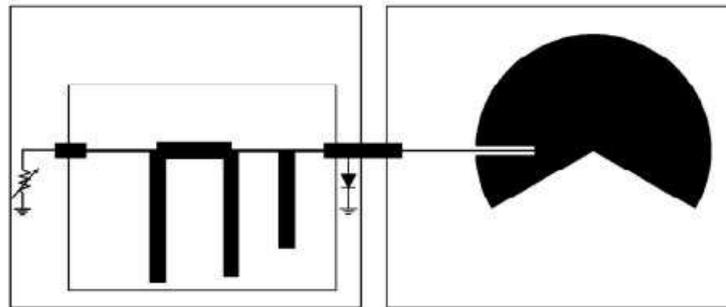


Figure I.11: Rectenna avec une simple antenne micro-ruban

### VI.2 Rectenna à double fréquence à polarisation circulaire

La (figure 12) présente une rectenna conçue par Jouko Heikkinen et travaillant à deux fréquences 2.45 GHz et 5.8 GHz. Cette rectenna se compose de deux fentes en anneaux formant l'élément rayonnant, et de deux circuits de redressement gravés de l'autre côté du substrat. [12]

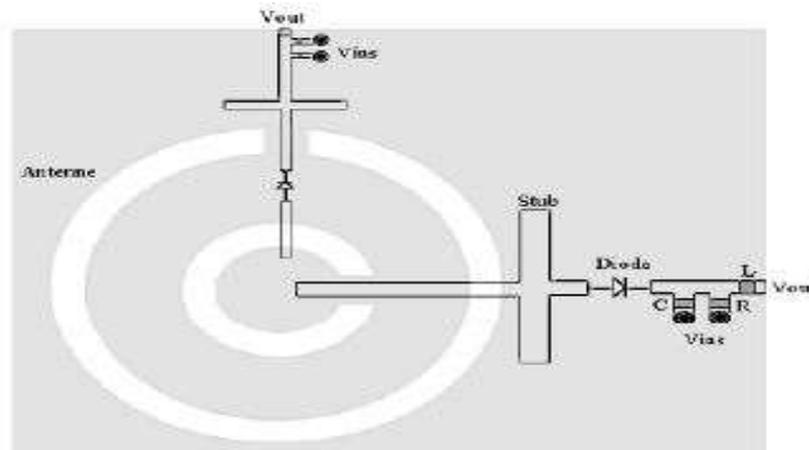


Figure I.12: Rectenna à double fréquence

La différence de dimensions sur les fentes en anneaux et les lignes et leurs positions orthogonales font que la rectenna possède deux fréquences de travail et que l'antenne génère

une polarisation circulaire. La rectenna est réalisée sur un substrat RO4232, une tension DC de sortie de 2V et de 1V sont respectivement obtenues aux 2 fréquences 2.45 GHz et 5.8 GHz. Les rendements de conversion pour les deux fréquences sont respectivement 62% et 19%.

### VI.3 Rectenna à double diode

Dans ce travail, une nouvelle structure de rectenna à polarisation circulaire était présentée par Yu-Jiun Ren dont le circuit comporte une ou deux diodes, figure I.13.

La rectenna se compose d'une ligne coplanaire, d'une antenne carrée tronquée et d'un filtre passe-bande pour bloquer les harmoniques générées par le circuit de conversion. [12]

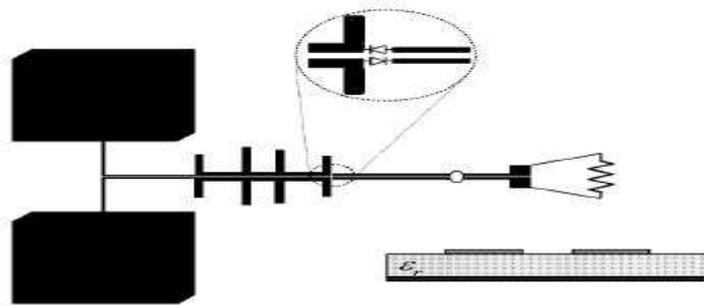


Figure I.13: Rectenna à double diode

La rectenna est imprimée sur un substrat Rogers Duroid 5880, elle peut fournir au moins deux fois la tension continue de sortie qu'une rectenna traditionnelle avec seulement une diode. Le dispositif à double diode atteint un rendement de conversion RF-DC de 76% à 5.8 GHz. Une structure en réseau a été développée de façon à fournir une tension de sortie plus élevée.

## VII. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons énuméré la structure d'une rectenna et les principales topologies des circuits de conversion.

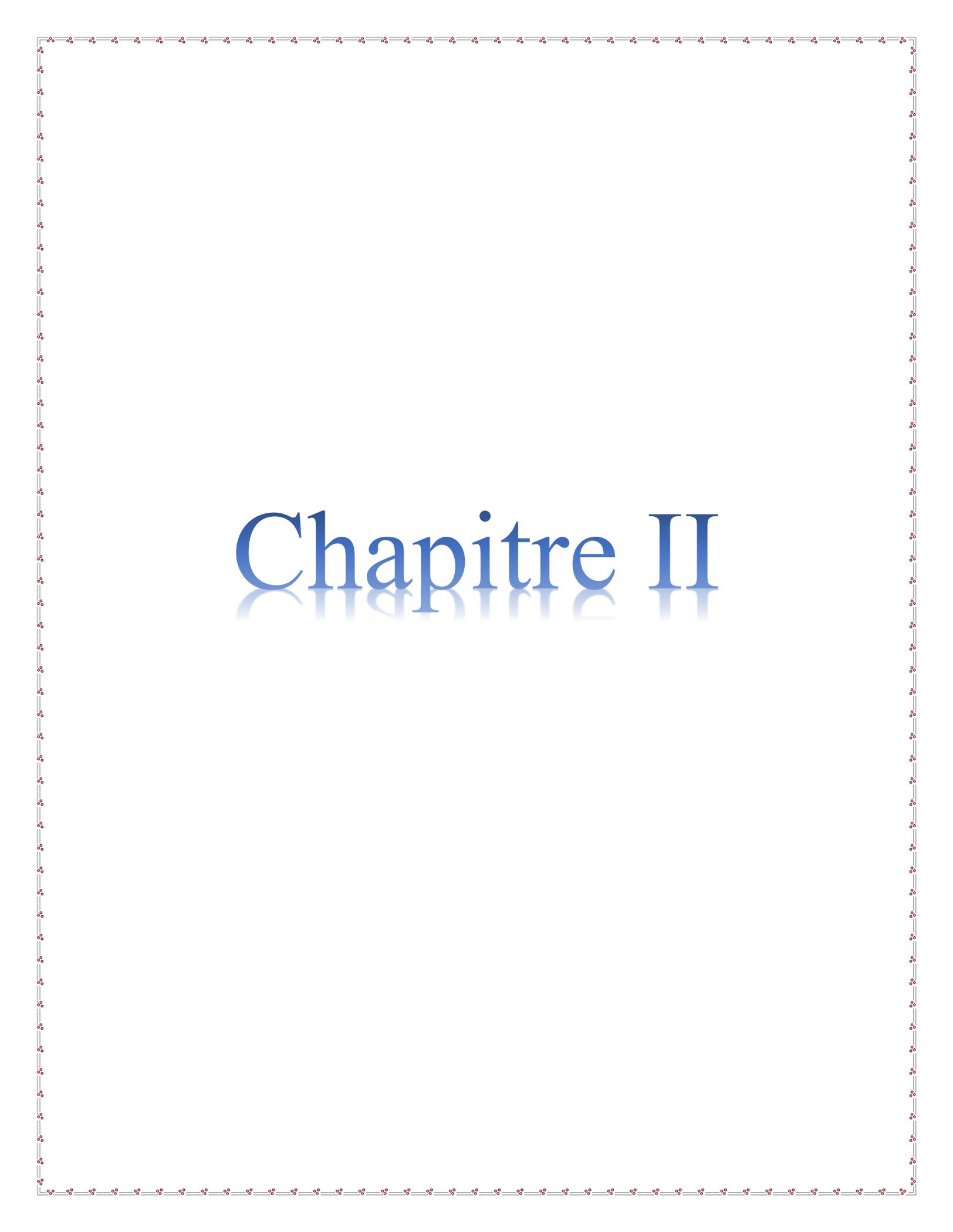
Nous avons également présenté quelques travaux sur les rectennas. Tout en montrant la contribution des diodes Schottky dans les systèmes de récupération d'énergie en utilisant la technologie micro-ruban.

Nous avons indiqué que la technique d'alimentation par couplage avec fente est la solution la plus appropriée.

Dans le chapitre suivant, nous détaillerons les diviseurs de puissances pour former un réseau d'antenne en utilisant le simulateur ADS.

I.	Introduction.....	3
II.	Historique .....	3
III.	Description de quelques structures RF-DC à très faibles puissances.....	5
III.1	Définition.....	5
III.2	Structure d'une rectenna .....	5
III.2.1	Principe de fonctionnement.....	5
III.2.2	L'antenne de réception .....	5
III.2.2.1	Coefficient de réflexion S11 .....	6
III.2.2.2	Diagramme de rayonnement .....	7
III.2.2.3	Directivité D.....	7
III.2.2.4	Efficacité d'une antenne.....	8
III.2.2.5	Gain d'une antenne.....	8
III.2.2.6	Impédance d'entrée d'une antenne.....	8
III.2.2.7	Adaptation d'une antenne .....	9
III.2.2.8	Alimentation d'une antenne micro ruban.....	9
III.2.2.8.1	Alimentation par ligne micro ruban .....	10
III.2.3	Circuit d'adaptation.....	11
III.2.4	Le Filtre RF .....	11
III.2.5	La diode SCHOTTKY .....	11
III.2.6	Le Filtre DC.....	12
IV.	Topologies de redresseur .....	13
IV.1	Topologie série.....	13
IV.2	Topologie shunt (parallèle) .....	14
IV.3	Topologie doubleur de tension .....	14
IV.4	Multiplieur de tension.....	15
IV.5	Comparaison entre les différentes topologies.....	16
V.	La charge .....	17
VI.	Quelques exemples de circuits de rectennas.....	18
VI.1	Rectenna avec une antenne micro-ruban à rejection d'harmoniques.....	18
VI.2	Rectenna à double fréquence à polarisation circulaire.....	18
VI.3	Rectenna à double diode.....	19
VII.	Conclusion .....	19

<i>Figure I.1: Photographie de William C. Brown et du prototype de plateforme hélicoptère alimentée sans fil.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.2: Schéma bloc d'une rectenna.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.3: Une ligne microstrip au patch.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.4: L'antenne patch avec encoche.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.5: Circuit équivalent de la diode Schottky en hautes fréquences.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.6: Topologie série.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.7: Topologie parallèle.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.8: doubleur de tension.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure I.9: Topologie multiplieur Pont de diodes.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure I.10: Topologie de pont de diodes.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure I.11: Rectenna avec une simple antenne micro-ruban.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I.12: Rectenna à double fréquence.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I.13: Rectenna à double diode.....</i>	<i>19</i>



# Chapitre II

## **Chapitre II : Conception d'antenne pour un circuit Rectenna**

### **I Introduction**

Les systèmes micro-ondes à structure micro ruban ont été à l'origine du développement des antennes imprimées (antennes plaques ou antennes patch) qui sont les plus souvent utilisées en réseaux afin d'améliorer leurs performances et de permettre la réalisation de fonctions très particulières.

Le comportement électromagnétique d'une antenne est complexe et l'on trouve dans la littérature de nombreuses formules d'approximation qui permettent d'approcher un comportement dans une bande de fréquence. L'optimisation est indispensable, elle peut se faire soit uniquement par la mesure (mais cela nécessite un équipement assez coûteux) soit à l'aide d'un simulateur électromagnétique qui permet de réduire les étapes de mesure. Ces logiciels sont cependant gourmands en temps de calcul puisqu'ils utilisent les équations de Maxwell numérisées.

Dans ce chapitre nous allons décrire la conception d'une antenne puis celle d'un réseau d'antennes avec l'application des diviseurs de puissances travaillant dans la bande de 2.4 GHz. Comme déjà souligner dans le Chapitre 1, nous allons utiliser des antennes patches de forme rectangulaire micro-ruban utilisant des lignes d'alimentations, afin de constater l'augmentation de la gamme de pouvoir (puissance d'incidence) et également d'analyser la distribution des composants hyperfréquences des ondes pour enfin finir par l'étude du diviseur de puissance .

### **II Structure des antennes imprimées**

Actuellement un réseau imprimé est largement utilisé puisqu'il permet de répondre à de nombreuses contraintes commandées par les systèmes. Il est caractérisé par le diagramme de rayonnement, la fonction caractéristique, l'angle d'ouverture, la dynamique d'une antenne, le gain et la directivité. Les domaines d'utilisation privilégiés de ces antennes, sont trouvés dans de nombreux systèmes de communication tels que la téléphonie mobile, les systèmes multimédias sans fil (WIFI, Bluetooth) ou encore les communications spatiales. Elles trouvent également des applications dans certains systèmes radar ou de télé- détection et sont utilisées dans des bandes de fréquences allant de 1GHz jusqu'aux bandes millimétriques. Ces applications sont soumises à des critères sélectifs et à des limitations de poids, de volume et d'épaisseur.

#### **II.1 Pourquoi le choix du patch rectangulaire ?**

Le patch, habituellement en cuivre, peut avoir diverses formes, mais les patches rectangulaires et circulaires (elliptiques) couvrent toutes les possibilités en termes de modèle de rayonnement, de bande passante et de polarisation.[1]

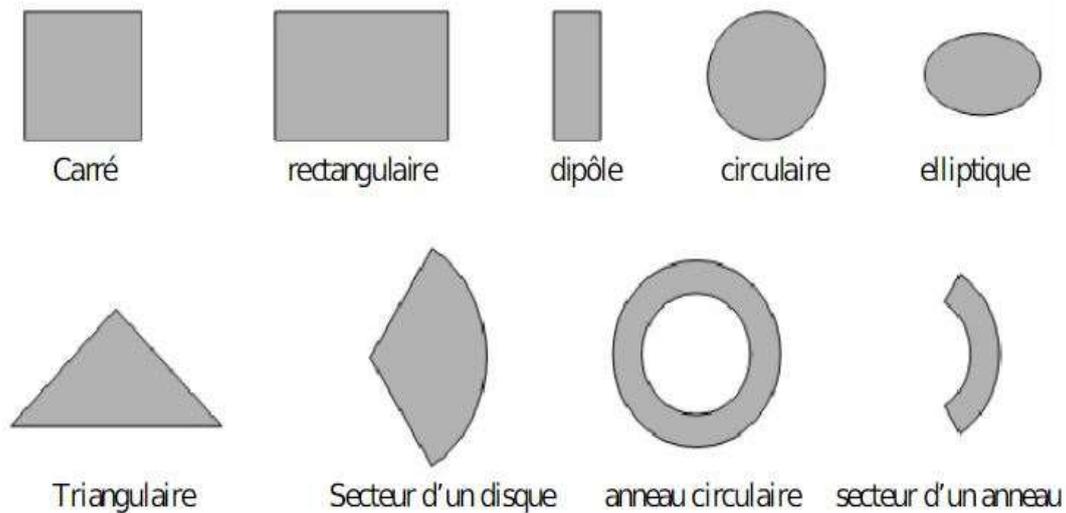


Figure II 1: Les différentes formes d'antennes

## II.2 Paramètres caractéristiques d'une antenne imprimée

Le concept des antennes imprimées a été proposé dès 1953 par Deschamps mais il n'a été possible de les réaliser efficacement qu'à partir de 1970 (Howel et Muson) grâce à l'arrivée sur le marché du diélectrique à faibles pertes.

Depuis, la recherche dans ce domaine n'a cessé de s'intensifier pour exploiter les nombreux avantages des antennes imprimées :

- Faible poids,
- Faible volume et épaisseur réduite,
- Faible coût de fabrication,
- Compatibilité avec des circuits intégrés (antennes actives), réseau d'antennes.

Ces antennes présentent également un certain nombre d'inconvénients qui peuvent limiter leur domaine d'applications (Tableau II.1).

Inconvénients	Observations
Bande passante souvent étroite, de l'ordre de 1 à 5% (pour les éléments résonnants de géométrie simple)	Fonctionnement d'une large bande obtenue au prix de l'utilisation : -D'un substrat de hauteur élevé (quart-d'onde) dans le cas d'antenne résonnante ; -D'antennes à ondes progressives de grandes dimensions (exemples : VIVALDI) - De résonateurs parasites latéraux ou verticaux
Directivité faible pour un seul élément (environ 6 dB)	Le gain peut être augmenté lors de la mise d'éléments en réseaux avec cependant une limitation à environ 30db due aux pertes dans les lignes d'alimentations.
Faible tenue en puissance	Quelques watts à quelques dizaines de watts
Rendement limité de surface	- Par les pertes diélectriques - Par l'excitation d'onde de surface dans le diélectrique - Par les pertes dans les lignes d'alimentations
Risque de rayonnement parasite dû aux jonctions avec l'alimentation ou à la limitation du plan de masse	
Difficulté d'élaborer des antennes à haute pureté de polarisations	
Problèmes de tolérances de fabrication si les motifs imprimés sont petits.	

Table II.1 : Les inconvénients des antennes imprimées

L'antenne la plus simple à étudier est sans doute le patch rectangulaire (figure II.2) qui est définie par :

- Ses caractéristiques électromagnétiques : son gain, son diagramme de rayonnement, sa largeur de faisceau, sa polarisation.
- Ses paramètres d'utilisations : sa fréquence de résonance  $f_r$ , sa résistance d'entrée  $R_{in}$  et sa bande passante  $B$ .

La première étape est le choix du substrat et du conducteur pour lesquels les caractéristiques à connaître sont:

- Pour le substrat :  $\epsilon_r$  sa permittivité relative,  $\tan \delta$  sa tangente de perte et sa hauteur  $h$ .
- Pour le conducteur : sa conductivité  $\sigma$  et son épaisseur  $t$

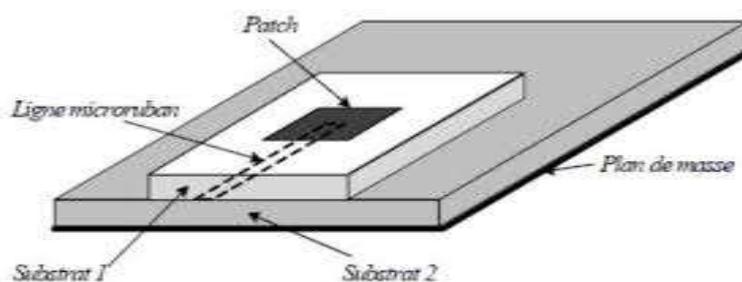


Figure II 2: Constitution d'une Antenne

### II.1.1 Conception pratique

Il existe de nombreux logiciels de simulation électromagnétique. Malheureusement la plupart n'est pas gratuit ! Il existe cependant des versions limitées de ces logiciels que l'on peut utiliser pour de petits projets de conception.

Pour ce mémoire, nous allons utiliser deux logiciels : le CST pour la conception d'antenne patch rectangulaire et l'ADS qui a l'avantage d'offrir la possibilité de simuler sur deux outils complémentaires présents sur la même plateforme et ne plus être dépendant d'une modélisation purement circuit qui s'accommode mal aux phénomènes électromagnétiques à des fréquences aussi élevées. Le temps de calcul est également réduit par l'utilisation de « Harmonic Balance » même si ceci introduit une prise en compte moins bonne des phénomènes non-linéaires.

L'inconvénient d'ADS réside dans la difficulté à y réaliser des simulations circuits car celles-ci exigent des ressources en mémoire très importantes et un temps de calcul bien supérieur à celui constaté sur PSpice [2].

### II.1.2 Antenne patch rectangulaire à 2.4 GHz

Dans cette partie on va simuler, une antenne patch rectangulaire sur CST et par la suite sur ADS (momentum).

La conception consiste alors à déterminer :

- La longueur et la largeur du patch (L et W),
- La position et le type de l'alimentation micro ruban.

Afin de formaliser notre conception, nous avons travaillé sur le cahier de charges suivant :

- Substrat FR4 (lossy)
- Hauteur de substrat :  $H = 1,58\text{mm}$
- Permittivité diélectrique  $\epsilon_r = 4,4$
- Pertes tangentiel  $\tan\delta = 0,03$
- Conducteur : cuivre, épaisseur de métallisation  $t = 35\mu\text{m}$

### II.1.3 Calcul des dimensions de l'antenne

La démarche adoptée pour déterminer les paramètres géométriques du motif imprimé s'articule autour des deux étapes suivantes :

- Calcul de la permittivité effective  $\epsilon_{\text{eff}}$  en fonction de la largeur du motif **W**.
  - Calcul de la longueur **L** du motif imprimé en fonction de la permittivité effective.
- 📌 Le calcul de la permittivité effective d'une ligne microstrip repose sur la largeur de la ligne et sur la hauteur du substrat :

$$\epsilon_{\text{reff}} = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right) + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2}\right) \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{II.1})$$

Cette équation est donnée pour  $W/h > 1$

- ✚ Calcul de la fréquence de résonance : chaque patch est caractérisé par sa longueur effective  $L_{eff}$  et sa largeur effective  $W_{eff}$  qui ont un effet mineur sur la fréquence de résonance.
- ✚ Pour faire un calcul rigoureux de la **fréquence de résonance**, on prend en considération ces deux paramètres d'où la formule :

$$f_{mn} = \left( \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \right) \sqrt{\left( \frac{m}{\pi W_{eff}} \right)^2 + \left( \frac{n}{\pi L_{eff}} \right)^2} \quad (\text{II.2})$$

Avec :  $C=3.10^8$  m/s

$f_{mn}$  étant la formule pour le calcul de la fréquence de résonance

m,n : le nombre de mode

Pour le calcul de la longueur effective, on utilise la définition suivante

$$W_{eff} = W + \Delta W \quad (\text{II. 3})$$

$$L_{eff} = L + \Delta L \quad (\text{II. 4})$$

$$\Delta L = 0.412 * h \left[ \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{W}{H} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{W}{H} + 0.8 \right)} \right] \quad (\text{II.5})$$

$$\text{La largeur } W \text{ du patch : } W = \frac{c}{2f_{01}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{II.6})$$

Où le terme  $f_{01}$  représente la fréquence de résonance fondamentale de l'antenne.

$$\text{La longueur du patch : } L = \frac{\lambda_{g \text{ dielectric}}}{2} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_{01}\sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (\text{II.7})$$

Pour calculer les dimensions de la ligne de transmission, l'outil «Microstrip Patch Calculatrice d'Antenne» sera utilisé afin d'accélérer le processus. Cet outil utilise tout de même les équations (II.1) à (II.7) définies ci-dessus.

D'où l'obtention des résultats suivants après l'optimisation du calcul de l'antenne patch :

**W= 38.03629 mm ; L=29.44956 mm** Ces valeurs ont été optimisé à **W'= 38.60 mm L'=29.5 mm** afin d'avoir le pic à la fréquence de résonance **Fr=2.4Ghz**

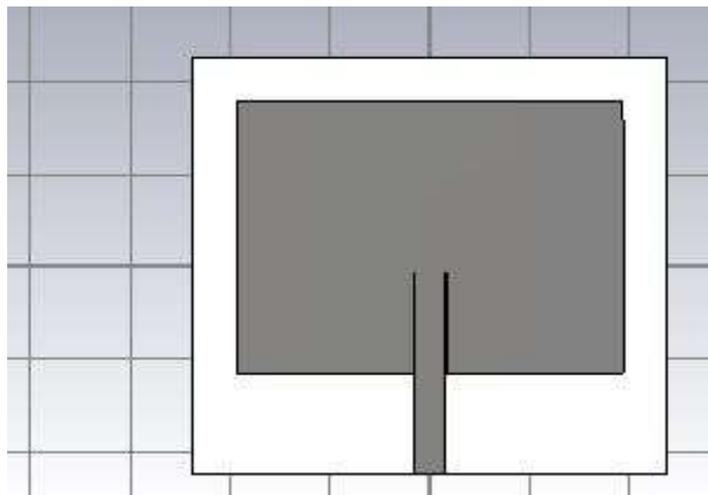


Figure II 3: Antenne patch réalisée sur CST

Les résultats obtenus après la conception du S-paramètres sur le logiciel CST, nous montre une adaptation à 2.4GHZ qui est représenté sur la figure ci-dessous

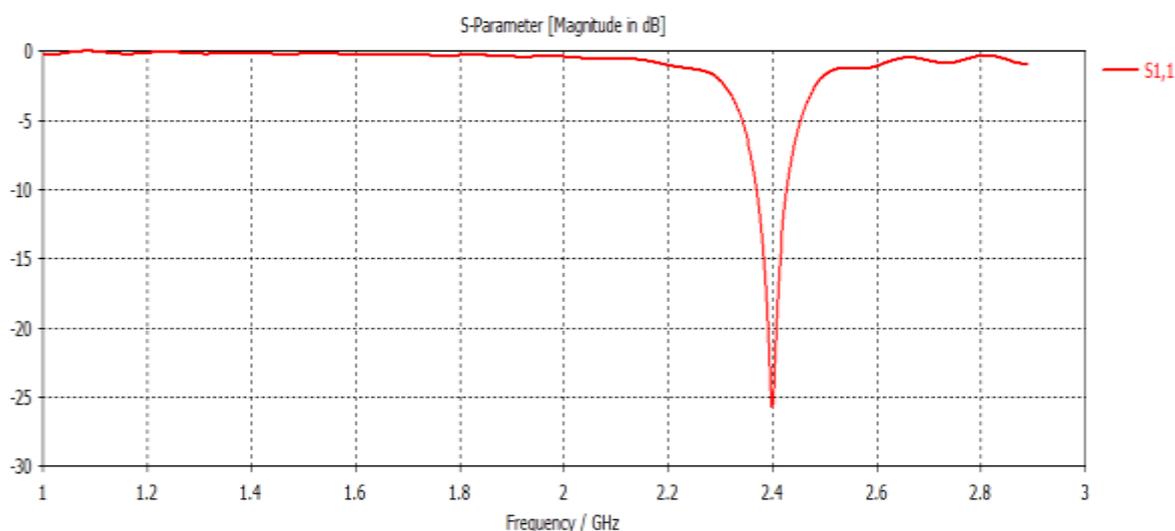


Figure II 4: Simulation du paramètre S 11 en CST

#### II.1.4 Méthodologie du design

Une fois les différents paramètres sont définis; après cette réalisation du patch sur CST ; on passe au choix du logiciel de simulation électromagnétique ADS (Advanced Design System) de chez Agilent Technologies « Momentum » Logiciel de 2D.

L'antenne qu'on va concevoir est composé principalement par deux composants : une ligne d'alimentation et d'une partie rectangulaire comme stub (à une seule entrée et ouvert de l'autre côté).

- Le calcul de L et W de MLOC qui représente l'antenne, on utilisera les mêmes valeurs calculées par la page internet « patch calculator », comme dans le cas de CST.

- Reste à déterminer les dimensions de la ligne de transmission, une ligne peut être caractérisée soit par des dimensions physiques (L1 et W1) soit par les grandeurs électrique  $\Theta$  et  $Z_c$ .
- A partir de Linecalc nous avons calculé les dimensions physiques à partir des caractéristiques électriques de la ligne ou vis-versa, on prend la longueur électrique  $\Theta=90^\circ$  et  $Z_c=50 \Omega$ , synthétiser nous donne  $L1= 17.177000$  et  $W1= 3.018800$  mm

Dans cette partie, nous allons représenter le design d'une antenne patch rectangulaire sur ADS

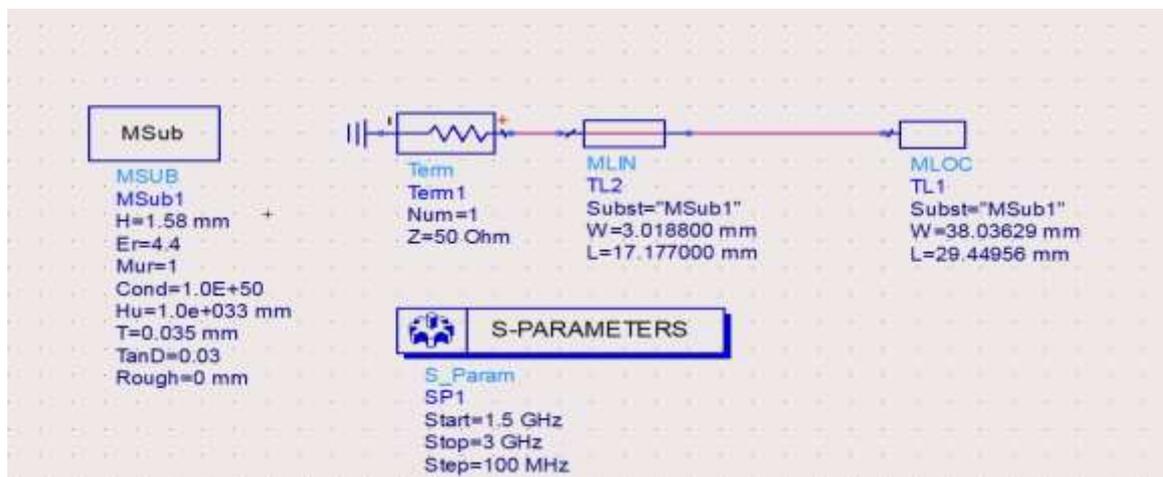


Figure II 5:Schéma de l'antenne patch

On a obtenu comme résultat (figure II.6), la valeur de la fréquence de résonance à 2.3Ghz, qui n'est pas la fréquence souhaitée , malgré que c'est les mêmes valeurs utilisées dans le CST, nous allons donc passer à optimiser cette valeur afin d'avoir un meilleur coefficient de réflexion à la fréquence 2.4Ghz

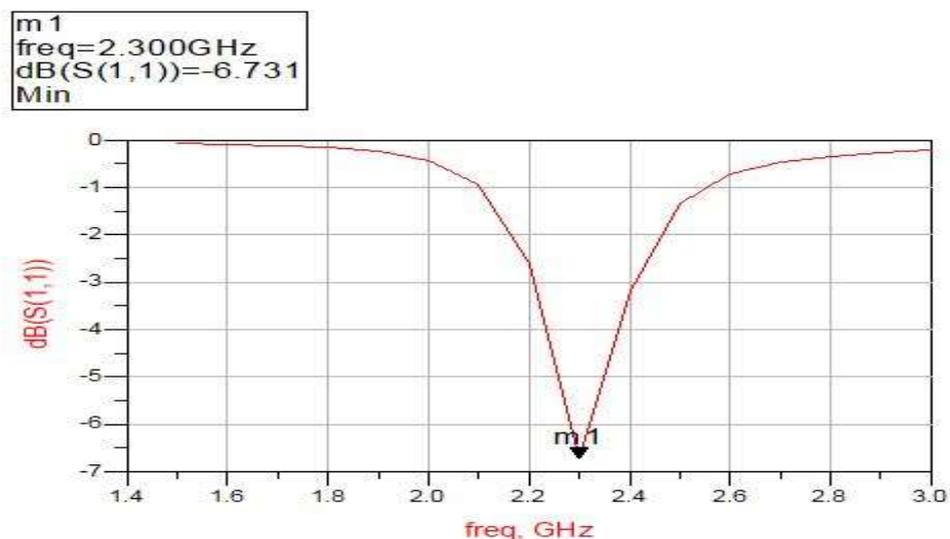


Figure II 6:Simulation du coefficient de réflexion

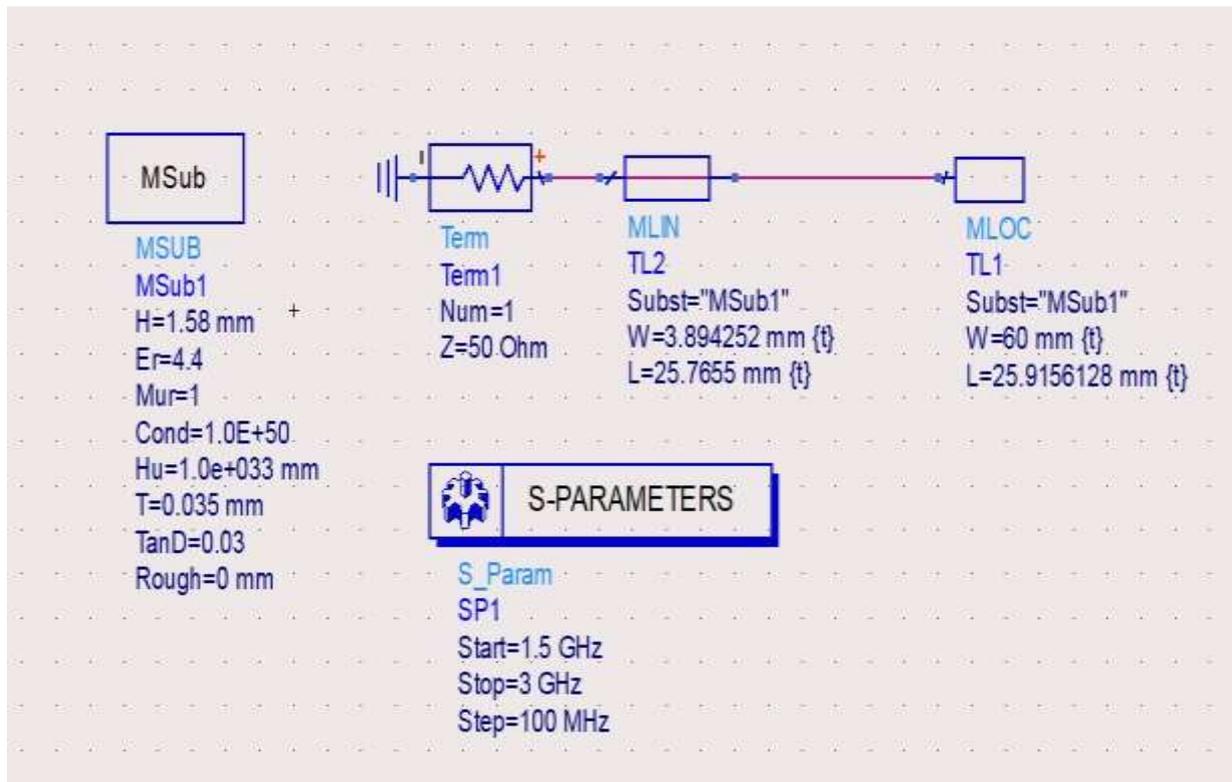


Figure II 7:Schéma de l'antenne patch optimisée



Figure II 8:Simulation du coefficient optimisé

### III Réseau d'antenne

Un réseau d'antenne par définition est l'association régulière d'antennes identiques pour créer un rayonnement de forme particulière. La puissance rayonnée est donc plus grande puisqu'on multiplie le nombre d'éléments rayonnants. Le rayonnement résulte de l'addition en phase des champs provenant de chaque élément. [3]

### III.1 Principe de fonctionnement

Les combinaisons possibles sont donc nombreuses et entraînent une grande souplesse dans la conception de réseaux.

Les applications des réseaux d'antennes sont nombreuses et utilisent tout type d'éléments: cornets, antennes filaires, antennes plaquées, etc.

Le réseau occupant un espace plus important que l'antenne élémentaire, son diagramme de rayonnement est plus étroit puisque sa directivité augmente avec sa surface. On parvient facilement à augmenter le gain de l'antenne élémentaire de 10 à 15 dB.

Le réseau est donc globalement plus puissant et plus directif que l'antenne élémentaire.

Un autre avantage du réseau d'antenne tient au fait que le choix d'un déphasage régulier entre les éléments fixe une orientation du faisceau dans l'espace dans certaines limites d'angles.[3] L'organisation spatiale des antennes d'une part, et le mode d'alimentation de chacune des antennes d'autre part, confèrent au réseau des propriétés de rayonnement bien définies.

Ces propriétés sont modifiables dans certains cas, grâce essentiellement à la possibilité d'agir sur la phase et l'amplitude de l'alimentation de chaque antenne. On obtient alors un réseau d'antennes reconfigurable. Lors de la conception de réseau, le couplage entre les antennes élémentaires est un point délicat car ce couplage modifie légèrement les caractéristiques de rayonnement et d'adaptation.

En particulier la bande passante du réseau est un peu plus large que celle de l'antenne élémentaire du fait des couplages.

La difficulté de modélisation d'un réseau est due à sa taille, qui peut être importante lorsque le nombre d'élément est grand.

Idéalement une conception de réseau commence par la synthèse, suivie d'une modélisation du facteur de réseau. Une simulation globale est ensuite nécessaire. Elle peut être associée à des mesures d'analyse et de conception d'une antenne imprimée en technologie imprimée.

L'évolution du domaine électronique, notamment au niveau de la miniaturisation et de la consommation des composants, donne aux systèmes de récupération d'énergie électromagnétique l'opportunité d'exister et d'être utilisés. [3]

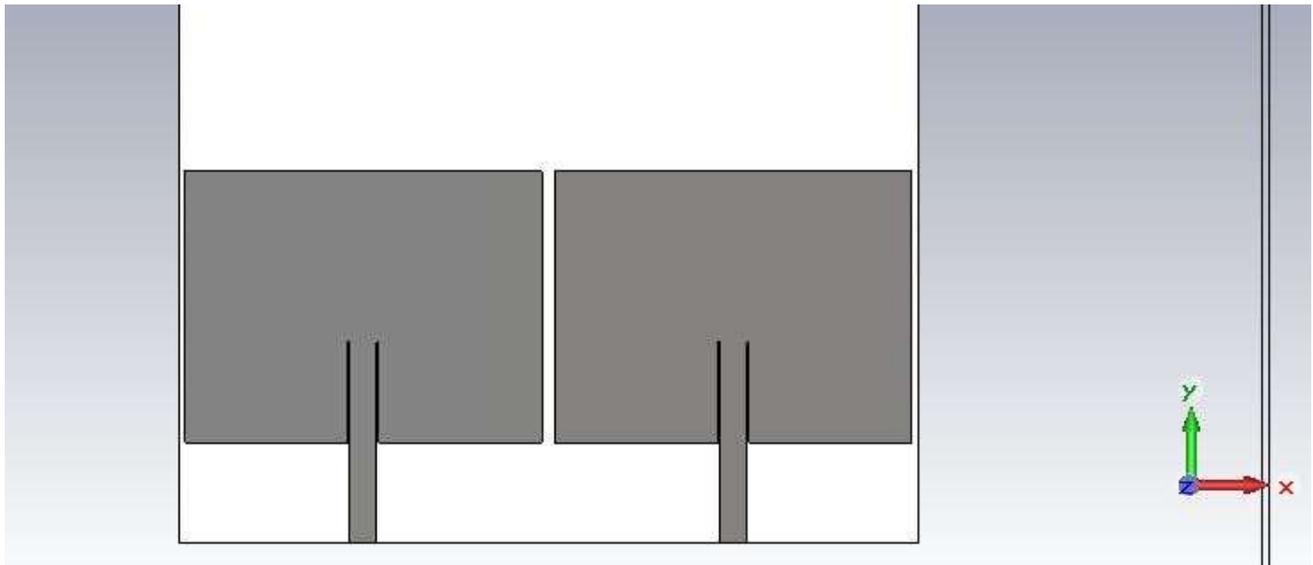


Figure II 9:Schéma d'un réseau d'antenne simulé sous CST

#### IV Les différents types de réseaux d'antennes

Pour maximiser la puissance récupérée par le système, il faut maximiser la puissance RF captée. Pour cela, nous pouvons soit augmenter la surface des antennes avec l'inconvénient de décaler la bande passante omnidirectionnelle vers les basses fréquences, soit conserver le bénéfice des antennes précédentes en combinant plusieurs en réseau.

- ✚ Réseau d'antennes larges bandes
- ✚ Réseau d'antennes « fente »
- ✚ Réseau d'antennes spirales
- ✚ Réseau d'antennes à double polarisation
- ✚ Réseau d'antennes à émission longitudinale
- ✚ Les réseaux bidimensionnels d'antennes
- ✚ Radiation d'une paire d'antenne

##### IV.1 Les principaux domaines d'application sont :

- Techniques spatiales : assurer une couverture terrestre spécifique à partir d'un satellite géostationnaire.
- Domaine militaire : réjection de brouilleurs
- Radars : balayage électronique

Plusieurs contraintes peuvent influencer la conception des réseaux d'antennes.

## IV.2 Problèmes pratiques propres aux réseaux d'antennes

Dans tout ce qui a été dit précédemment, nous avons gardé sous silence l'interaction entre antennes.

L'interaction entre éléments individuels induit des courants dans les autres éléments ce qui modifie l'impédance de l'élément, ce qui peut modifier la phase du courant d'alimentation. Ceci fait que fixer la phase de chaque élément quand les éléments interagissent est extrêmement compliqué.

Une façon de contourner le problème est d'alimenter un seul élément. De cette façon la phase du courant des autres éléments est fixée par la seule géométrie du réseau. C'est la solution utilisée dans les antennes Yagi-Uda. Une autre façon d'éviter les interactions est de choisir le type d'antenne individuelle et sa disposition. Ainsi, si on utilise des antennes dipolaires, on peut les disposer alignées, car ces antennes n'émettent pas dans le sens de leur longueur. Une autre possibilité est celle d'utiliser des antennes individuelles qui ne rayonnent pas.

Le couplage mutuel, l'adaptation de la ligne d'alimentation et la distance entre les éléments sont les facteurs les plus importants à prendre en considérations lors de la conception du Diviseur de puissance.[4]

## V Généralités sur les diviseurs/combineurs de puissance

Les antennes réseau fonctionnent mieux avec des diviseurs de puissance, qui vous permettent de configurer avec souplesse les antennes et de les installer à des endroits différents.

Trois modèles sont disponibles : 1 à 2, 1 à 3 et 1 à 4 [5].

Nous allons utiliser le diviseur de wilkinson 1X2 .

Le diviseur de puissance Wilkinson a été inventé vers 1960 par un ingénieur nommé Ernest Wilkinson . Il divise un signal d'entrée en deux signaux de sortie à phase égale, ou combine deux signaux de phase égale en un dans la direction opposée.

Wilkinson s'est appuyé sur des transformateurs quart d'onde pour faire correspondre les ports divisés au port commun [6].

Le combineur/diviseur de puissance est un élément essentiel dans la conception des amplificateurs de puissance. Un amplificateur de très haute puissance est un circuit formé de plusieurs diviseur/combineurs de puissance et de dispositifs semi-conducteurs identiques (cellules amplificatrices).

Ces dispositifs sont combinés en parallèle en utilisant N diviseurs à l'entrée et N combineurs à la sortie. Ce type d'amplificateurs est utilisé dans les systèmes de communication. La **Figure II.10** illustre le block diagramme d'un amplificateur de puissance. Dans la plupart des applications chacune des cellules amplificatrices sont identiques et il en est de même pour les parties passives.

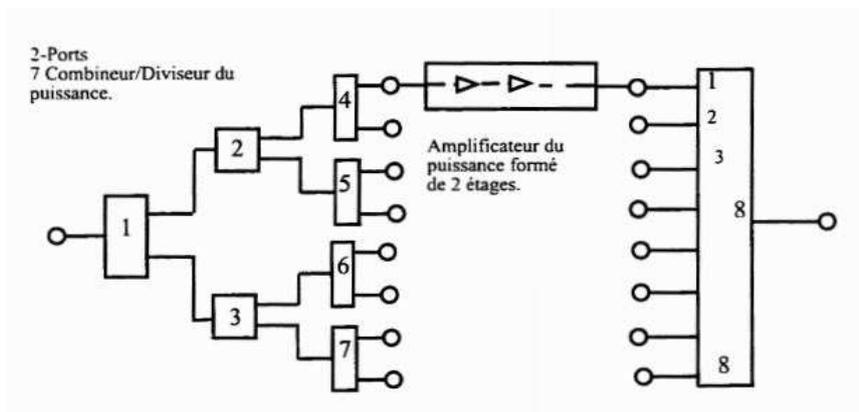


Figure II 10: Le bloc diagramme d'un amplificateur de puissance de combineur/diviseur de puissance

Le principe est de divise/combiner le signal amplifié à l'entrée sortie en plusieurs signaux identiques. Il est à noter que la recombinaison finale des signaux n'est faite qu'au moment où l'on obtient le niveau de puissance désiré. Il existe une vaste littérature sur les combineurs/diviseurs de puissances. Donc le bon choix d'un combineur/diviseur de puissance est très important pour obtenir les performances voulues [7].

Les diviseurs de puissance et les coupleurs sont des composants hyperfréquences passifs utilisés pour distribuer ou combiner des signaux micro-ondes. Un séparateur peut être utilisé comme un combineur de puissance ou un diviseur de puissance, c'est un dispositif réciproque .

Un coupleur peut être utilisé pour injecter un deuxième signal dans un réseau, ou comme un moyen pour échantillonner un signal dans un réseau (il est également réciproque) [6].

## V.1 Diviseurs de puissance de Wilkinson

Dans les systèmes micro-ondes, le diviseur de Wilkinson est un circuit de la famille des diviseurs de puissances qui isole les ports de sortie entre eux tout en conservant l'adaptation d'impédance sur tous les ports. Ce circuit peut être utilisé pour combiner deux signaux car il est constitué de composants passifs et est donc réciproque. Ce circuit trouve sa place en radiofréquence dans les systèmes à canaux multiples car il est très efficace pour minimiser la diaphonie

Le diviseur de Wilkinson est réalisé à l'aide de deux tronçons de ligne TEM connectés en parallèle à l'entrée, et interconnectés à la sortie par une impédance d'équilibre. Ce diviseur est un réseau à trois ports et généralement conçu pour fonctionner avec la même impédance caractéristique sur chacun des ports [6].

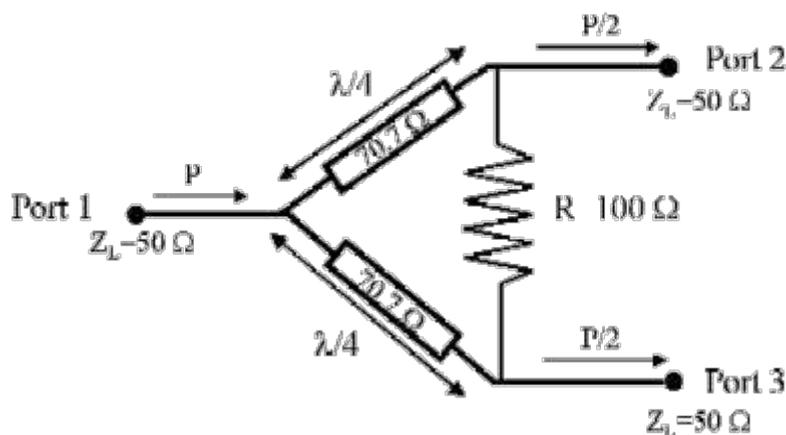


Figure II 11:Diviseur de Wilkinson

Pour voir comment fonctionne le diviseur de Wilkinson, considérons un signal entrant dans le port de gauche, port 1 dans le diagramme ci-dessus. Le signal atteint la division physique et passe aux deux sorties, les ports deux et trois du diviseur Wilkinson. Comme les deux branches du séparateur / diviseur sont identiques, les signaux apparaissant sur les sorties auront la même phase. Cela signifie que les ports 2 et 3 seront au même potentiel et qu'aucun courant ne circulera dans la résistance.

Comme la puissance est divisée, il est nécessaire de s'assurer que les impédances dans le diviseur de Wilkinson sont maintenues. Pour ce faire, les deux ports de sortie doivent chacun apparaître comme une impédance de  $2 * Z_0$ . Les deux ports de sortie de  $2 * Z_0$  en parallèle présenteront une impédance globale de  $Z_0$ . La transformation d'impédance est réalisée en plaçant une ligne de transmission quart d'onde entre le point étoile et la sortie, la ligne de transmission a une impédance de  $1,414 * Z_0$ .

De cette manière, l'impédance dans le système est maintenue. L'avantage de ce diviseur de puissance de Wilkinson est une forme idéale de diviseur pour de nombreuses applications RF.

Il fournit un faible niveau de perte et maintient un haut niveau d'isolation entre les ports de sortie.

Un autre avantage est qu'il peut souvent être fabriqué à un prix très bas lorsqu'il est utilisé à des fréquences micro-ondes parce que les éléments de ligne de transmission peuvent être imprimés sur la carte de circuit imprimé. Cela signifie que le seul composant requis pour le diviseur Wilkinson est une résistance [8].

Le rôle du diviseur est d'aider à équilibrer l'amplitude et la phase du signal [9].

## V.2 Les différents types du diviseur de puissance

Les lignes Transversales ElectroMagnétiques (TEM) permettent de réaliser plusieurs types de diviseurs de puissance aux hyperfréquences, en général ces diviseurs se distinguent par le nombre des ports de sortie et par la relation d'amplitude et de phase qui existe entre les signaux de sortie.[10]

Les diviseurs de puissance peuvent diviser un signal en plus de seulement deux sorties.

Vous pouvez trouver des diviseurs de puissance qui va diviser un signal en 3, 4, 6, 8, 9, 12 ou même 16. Vous pouvez également trouver des diviseurs de puissance avec différents types de connecteurs pour s'adapter à différentes sources et sorties. [9]

### V.3 Avantages:

- **Simplicité:** Le diviseur / répartiteur / combineur Wilkinson est particulièrement simple et peut facilement être réalisé en utilisant des composants imprimés sur une carte de circuit imprimé. Il est également possible d'utiliser des éléments d'inductance et de condensateur, mais cela complique la conception globale.
- **Coût:** Lorsque le diviseur de puissance Wilkinson est réalisé en utilisant des éléments de carte de circuit imprimé, le coût est très faible - la seule augmentation possible de la seule résistance utilisée résulte d'une augmentation de la surface de carte utilisée par les éléments imprimés. Cependant, pour réduire les pertes, il peut être nécessaire d'utiliser un substrat de PCB à faible perte, ce qui augmenterait le coût.
- **Perte:** Si des composants parfaits étaient utilisés, le diviseur de division Wilkinson n'introduirait aucune perte supplémentaire au-dessus de celle résultant de la division de la puissance entre les différents ports. En plus de cela, les composants réels utilisés pour le séparateur Wilkinson peuvent être très faibles, en particulier lorsque des lignes de transmission de PCB sont utilisées avec un matériau de substrat PCB à faible perte.
- **isolation:** Le diviseur / combineur Wilkinson fournit un degré élevé d'isolation entre les ports "de sortie".

#### Désavantages:

- **Réponse en fréquence:** Comme le séparateur Wilkinson est basé sur l'utilisation de lignes de transmission quart d'onde, il a une bande passante limitée, bien qu'il existe des répartiteurs Wilkinson qui offrent des largeurs de bande raisonnablement larges. [8]

### V.4 Applications du diviseur de puissance

Les diviseurs de puissance ont plusieurs applications :

- ✓ Un usage domestique commun est un diviseur qui divise une source audio unique et alimente à deux ensembles distincts de casque.
- ✓ Les stations de radio utilisent également régulièrement diviseurs de puissance pour égaliser la résistance entre les antennes, les combiner en un émetteur-récepteur stable.

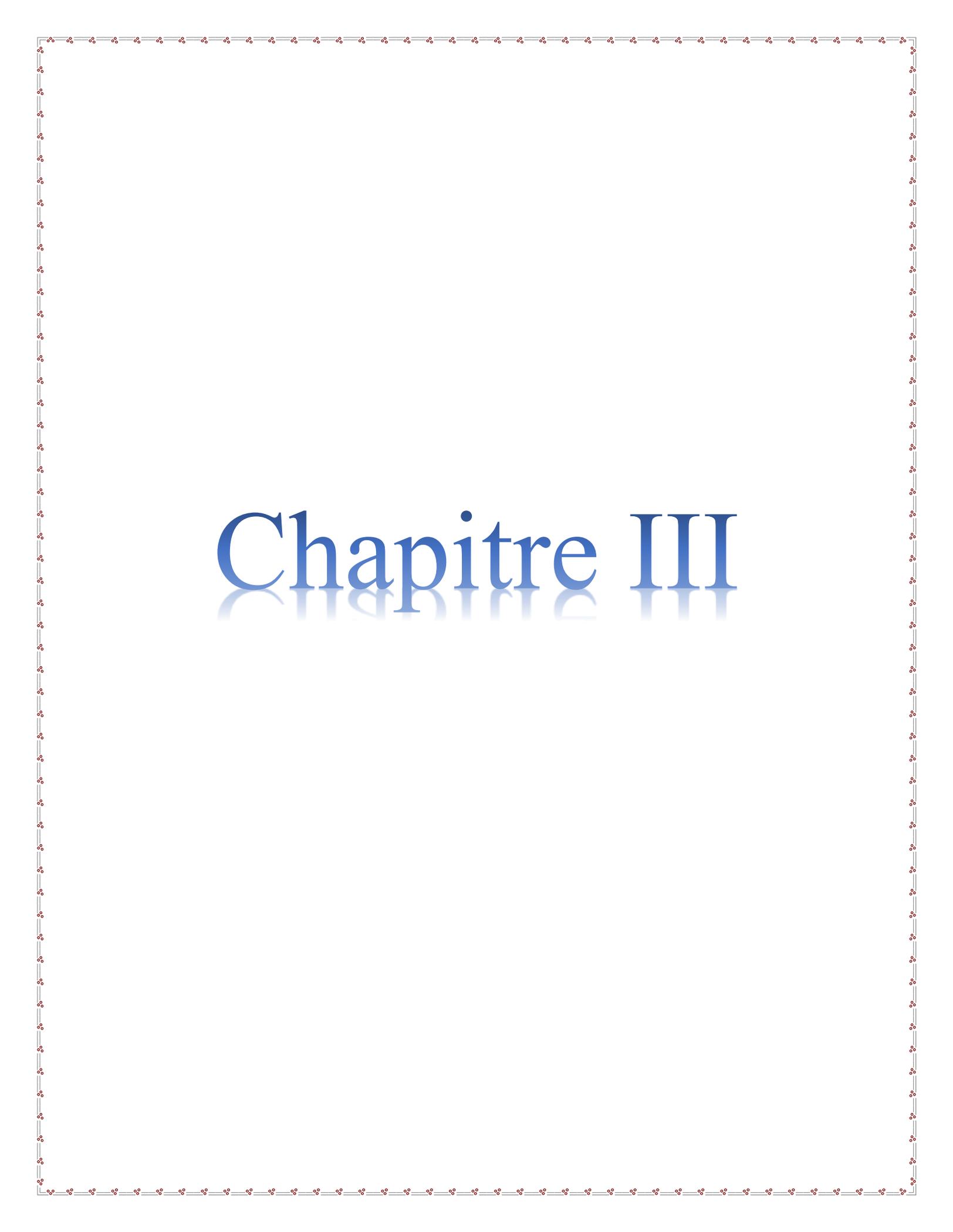
## VI Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons énumérer la procédure de la conception d'antenne patch rectangulaire sur CST et ADS, tout en remarquant la différence qui résident entre les deux logiciels. Nous avons aussi parlé des avantages de l'utilisation des réseaux d'antennes qui permettent d'augmentent non seulement le gain et la directivité de rayonnement de ces antennes à large bande.

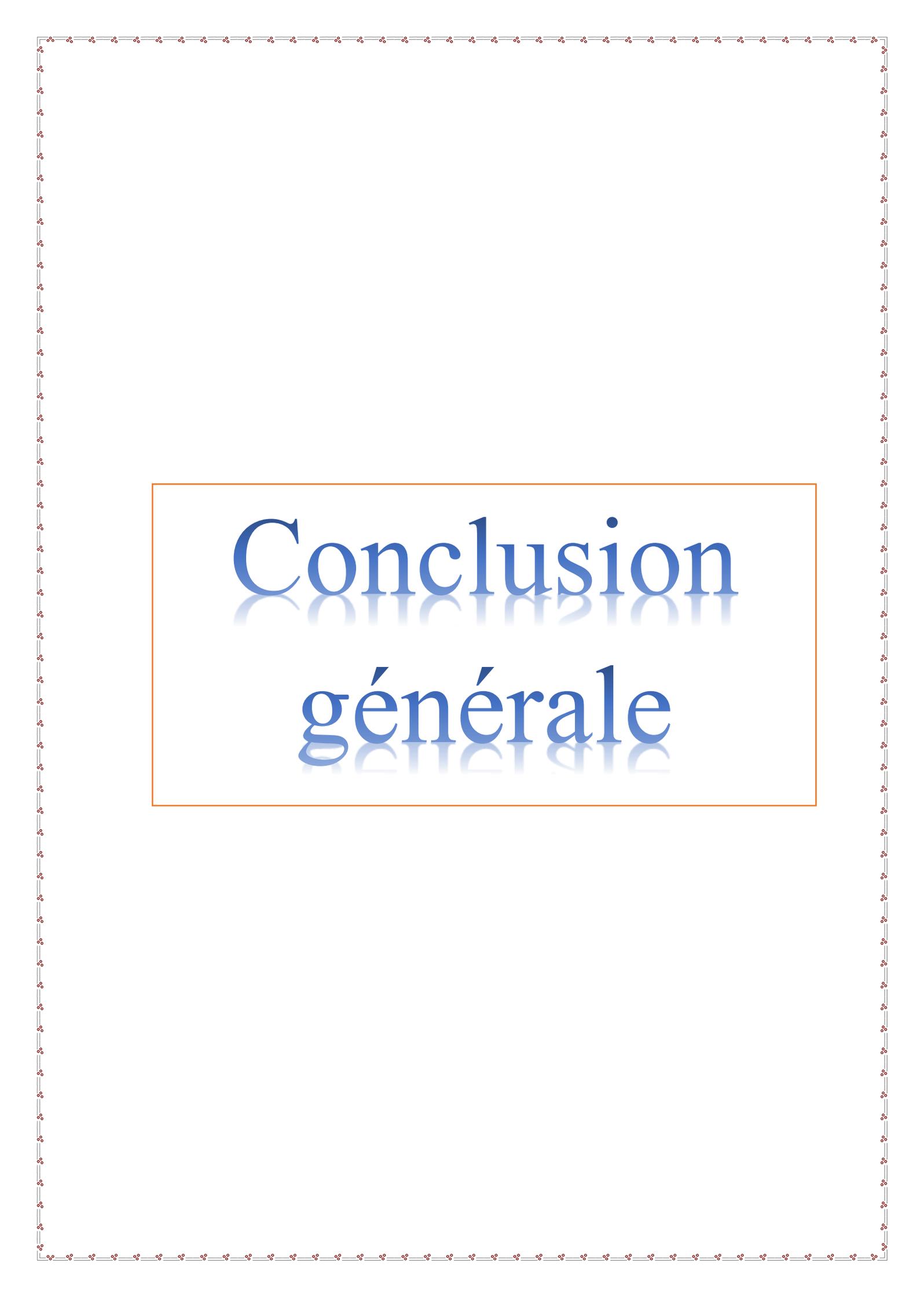
En plus, nous nous sommes decliner sur les diviseurs de puissances afin de l'associé avec l'antenne déjà conçu sur ADS qui a pour but d'avoir une Rectenna.

Nous allons étudier dans le chapitre 3 le circuit Rectenna, et présenter les différents résultats de simulations obtenus.

Chapitre II : Conception d'antenne pour un circuit Rectenna .....	20
I Introduction.....	20
II Structure des antennes imprimées .....	20
II.1 Pourquoi le choix du patch rectangulaire ?.....	20
II.2 Paramètres caractéristiques d'une antenne imprimée.....	21
II.1.1 Conception pratique.....	23
II.1.2 Antenne patch rectangulaire à 2.4 GHz.....	23
II.1.3 Calcul des dimensions de l'antenne .....	23
II.1.4 Méthodologie du design.....	25
III Réseau d'antenne.....	27
III.1 Principe de fonctionnement.....	28
IV Les différents types de réseaux d'antennes .....	29
IV.1 Les principaux domaines d'application sont : .....	29
IV.2 Problèmes pratiques propres aux réseaux d'antennes.....	30
V Généralités sur les diviseurs/combineurs de puissance.....	30
V.1 Diviseurs de puissance de Wilkinson.....	31
V.2 Les différents types du diviseur de puissance.....	32
V.3 Avantages: .....	33
V.4 Applications du diviseur de puissance.....	33
VI Conclusion .....	33
Figure II 1:Les différentes formes d'antennes.....	21
Figure II 2:Constitution d'une Antenne .....	22
Figure II 3:Antenne patch réalisée sur CST.....	25
Figure II 4:Simulation du paramètre S <sub>11</sub> en CST .....	25
Figure II 5:Schéma de l'antenne patch .....	26
Figure II 6:Simulation du coefficient de réflexion .....	26
Figure II 7:Schéma de l'antenne patch optimisée .....	27
Figure II 8:Simulation du coefficient optimisé.....	27
Figure II 9:Schéma d'un réseau d'antenne simulé sous CST .....	29
Figure II 10:Le bloc diagramme d'un amplificateur de puissance de combineur/diviseur de puissance .....	31
Figure II 11:Diviseur de Wilkinson .....	32



# Chapitre III



# Conclusion générale

## Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons abordé dans le chapitre 1, une généralité des rectennas illustrant l'historique et le principe de fonctionnement de la structure d'une rectenna, et nous avons montré également la topologie des différents redresseurs et celle d'une rectenna pour les circuits de récupération d'énergie RF.

Dans le second chapitre de ce travail, nous avons expliqué l'étude paramétrique détaillée des éléments qui constituent l'antenne (ligne micro-ruban patch).

En utilisant deux logiciels CST & ADS pour les mêmes valeurs de l'antenne patch afin de valider nos calculs théoriques.

L'antenne fonctionnant à 2.4 GHz a ensuite été optimisée pour faire partie du système complet associée au diviseur de puissance qui finira par former la rectenna.

Ce système entamera à la suite de l'antenne un circuit de redressement constitué d'une diode Schottky disposée en série et un diviseur de puissance 1x2.

Enfin pour le troisième chapitre nous avons fourni les résultats des différentes simulations de la structure de l'antenne qui exhibent les résultats sur le gain, le diagramme de rayonnement, et le rendement .

Pour terminer avec des redresseurs séries et doubleurs on a ajouté un état d'art sur l'influence des paramètres de la diode Schottky, afin de visualiser l'adaptation de l'antenne et du redresseur pour obtenir une Rectenna simulée sur ADS, satisfaisant à notre besoin dans la fréquence de résonance de 2.4Ghz,

**Plusieurs perspectives** peuvent être énoncées :

- Réalisation de la rectenna à 2.4 GHz.
- Etude et simulation du diviseur de puissance 1x4.
- Augmenter la fréquence à 5.8 Ghz .

# REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

## Chapitre I

[1] Walid Haboubi. Développements de circuits Rectenna bipolarisation, bi-bande pour la récupération et conversion d'énergie électromagnétique à faible niveau.

Electronique. Université Paris-Est, 2014. Français. < NNT : 2014PEST1089 >. PP 19- 25

[2] Vlad Marian, Christian Vollaire, Jacques Verdier, Bruno Allard. Conception de topologies de rectennas pour des applications d'alimentation sans fil. 17emes Journées Nationales Micron- des, May 2011, Brest, France. PP 2

[3] <http://mainland.cctt.org/istf2008/rectennas.asp>

[4] Rectenna 1,84 GHz à rendement optimisé par technique source-pull, pour des applications de récupération d'énergie PP 2

[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 nanotechnologies/Microélectronique. Université Toulouse 3 – Paul Sabatier, 2017. Français. <tel-01705139> PP 7-10 ,35- 40

[6] Hakim Takhedmit. Modélisation et conception de circuits de réception complexes pour la transmission d'énergie sans fil à 2.45 GHz. Autre. Ecole Centrale de Lyon, 2010. Français. <NNT :2010ECDL0025><tel-00564596> PP 36- 37

[7] Thèse de l'Université de Lyon. Délivrée par l'Ecole Centrale de Lyon Spécialité : Génie Electrique. Soutenue publiquement le 12 Décembre 2013. Par. Salah-Eddine Adami.

Ingénieur INSA de Lyon. Préparée au Laboratoire Ampère. Optimisation de la récupération d'énergie dans les applications du rectenna...PP 7-.23

[8] Conception d'une antenne patch ultra –large bande (3.1 GHz-10.6 GHz) Par ADIL KAMIL, Mémoire présenté pour l'obtention du grade du Maitre sciences (M.Sc) 2011

[9] Odile Picon et Coll, « Les ANTENNES Théorie, Conception et Application », DUNOD, 2011.

[10] Boubekeur Merabet. Contribution à l'étude de la transmission d'énergie à distance par ondes. Autre. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2010. Français. <NNT : 2010DENS0048>. <tel-00675751> PP 23

[11] [www.memoireonline.com/11/12/6502/m\\_Conception-dune-antenne-Patch-Microstrip2.html](http://www.memoireonline.com/11/12/6502/m_Conception-dune-antenne-Patch-Microstrip2.html)

[12] Zied Harouni. Conception et caractérisation d'une Rectenna \_adouble polarisation circulaire a 2.45 GHz. Autre. Université Paris-Est, 2011. Français. < NNT : 2011PEST1026 Pag 17

[13] MANSOURI Assia et BOUAYED Hafeda Sujet Étude et Simulation d'une Rectenna, Application à la Récupération d'énergie RF PP 38-39,68-69

[14] Abderrahim Okba, Alexandru Takacs, Hervé Aubert. Rectenna à 2.45 GHz utilisant une antenne à dipôle arrondi. Journées Nationales Micro-ondes, May 2017, Saint Malo, France. 6p., 2017. <hal-01596449> PP 35-38

## **Chapitre II**

[1] <https://fr.scribd.com/doc/131004803/ANTENNES-IMPRIMEES>

[2] Conception d'une antenne patch rectangulaire 2,45GHZ ET 3,5GHZ Réalisé par : Chigare Abdelkebir Kasraoui Walid 4/6/2016

[3] <https://fr.scribd.com/document/353880363/Reseaux-d-antennes-2-pdf>

[4] [http://www.wikiwand.com/fr/R%C3%A9seau\\_d%27antennes#/Probl%C3%A8mes\\_pratiques\\_propres\\_aux\\_r%C3%A9seaux\\_d'antennes](http://www.wikiwand.com/fr/R%C3%A9seau_d%27antennes#/Probl%C3%A8mes_pratiques_propres_aux_r%C3%A9seaux_d'antennes)

[5] <http://e.huawei.com/fr/products/enterprise-networking/wlan/accessories/power-splitters>

[6] <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/couplers-and-splitters>

[7] Analyse et caractérisation des structures planaires multi ports pour la conception et la réalisation des combineurs et des diviseurs de puissance KOBEISSI HASSAN DÉPARTEMENT DE &NIE ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE INFORMATIQUE ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL THÈSÉPRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (GÉNIE ÉLECTRIQUE) O Hassan Kobeissi, 1997

[8] <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/coupler-combiner-splitter/wilkinson-splitter-combiner-divider.php>

[9] <http://www.handpuzzles.com/comment-un-diviseur-de-puissance-ne-fonctionne/>

[10] [cel.archives-ouvertes.fr/cel-00156394/file/...](http://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00156394/file/...)

## **Chapitre III**

[III.1] Etude et simulation d'une antenne microbande dans la bande WiFi 5 GHz

Année 2016-2017Présenté par : MEDDOUR Meriem ,BENKEDDA Siham

[III.2] MANSOURI Assia et BOUAYED Hafeda Sujet Étude et Simulation d'une Rectenna, Application à la Récupération d'énergie RF PP 70-75