

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

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

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département : Electromécanique*

## ***Mémoire***

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Electromécanique**

**Spécialité : Commande Electrique**

Par

➤ **BENDJEBEL OUSSAMA**

➤ **BELMILOUD HANI**

*Intitulé*

***Développements d'un système de transfert d'énergie utilisant l'énergie***

***Solaire et Radio Fréquence***

**Soutenu le : .../... /2022**

***Devant le Jury composé de :***

***Mr Benhadouga Seddik***

***MCB***

***Président***

***Univ-BBA***

***Mme Chérife Aida***

***Pr***

***Examineur***

***Univ-BBA***

***Mr Meddad mounir***

***MCB***

***Encadreur***

***Univ-BBA***

***Année Universitaire 2021/2022***

*Remerciements :*

*Dieu soit loué, qui nous a permis de mener à bien ce travail*

*Nous remercions tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réussite de ce modeste travail, en particulier Monsieur : **Pr. Mounir Meddad**,*

*notre encadrant, pour sa patience et ses précieux conseils qui ont permis*

*d'alimenter nos idées,*

*Sincères remerciements à nos chers parents pour leur soutien continu et leurs*

*encouragements*

*Nous remercions également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils*

*portent à nos travaux*

*Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à*

*neutraliser les obstacles et à mener à bien cette mémoire.*

# Dédicaces

*Nous remercions Allah qui nous a donné la volonté et la  
force de faire ce travail*

*Nous remercions ceux que personne ne peut compenser pour  
les sacrifices qu'ils ont consentis pour nous à nos parents qui  
nous ont soutenu tout au long de nos études et qui sont à la  
base de notre réussite, que Dieu les protège*

*Nous remercions tous nos amis qui nous ont soutenu*

*Nous remercions tous les professeurs et responsables du  
Département d'électromécanique*

*Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de  
loin à la réalisation de nos travaux*

### Résumé :

Les travaux présentés dans cette mémoire incluaient le thème de la transmission d'énergie sans fil pour alimenter à distance des systèmes électroniques à faible consommation. Dans ce projet, un système en trois parties a été conçu. Dans une première partie, nous nous sommes appuyés sur l'énergie solaire comme énergie renouvelable et source propre pour produire une partie de l'énergie, et dans la deuxième partie nous l'avons convertie L'énergie en radiofréquence diffusée dans l'espace libre et nous récoltons finalement cette fréquence (RF) via l'antenne de réception qui est ensuite suivie d'un circuit d'adaptation et un redresseur pour obtenir un courant constant.

Les résultats de la simulation ont montré que l'efficacité du système varie avec la charge.

**Mots-clés : énergie sans fil, énergie solaire, radio fréquence**

### الملخص:

تضمن العمل المقدم في هذه الأطروحة موضوع نقل الطاقة اللاسلكية لتغذية الانظمة الإلكترونية منخفضة الاستهلاك عن بعد، في هذا المشروع تم تصميم نظام يتكون من ثلاث اجزاء في الجزء الاول قمنا بالاعتماد على الطاقة الشمسية كمصدر متجدد ونظيف لإنتاج الطاقة وكجزء ثاني قمنا بتحويل هذه الطاقة الى ترددات راديوية منتشرة في الفضاء الحر لنقوم اخيرا بحصاد هذه التردد عن طريق هوائي الاستقبال الذي يتبعه بعد ذلك دائرة مطابقة ومعدل للحصول على تيار مستمر. اظهرت نتائج المحاكات ان كفاءة النظام تختلف باختلاف الحمل  
الكلمات المفتاحية: الطاقة اللاسلكية، الطاقة الشمسية، ترددات الراديو

# **SOMMAIRE**

SOMMAIRE.....	4
INTRODUCTION GENERALE .....	9

## **CHAPITER I**

### **Généralité sur les énergies renouvelables**

I.1 Introduction .....	2
I.2 Définition d'énergie renouvelable.....	2
I.2.1 L'énergie éolienne.....	3
I.2.1,1 Principes de fonctionnement d'une éolienne .....	3
I.2.1.2 Types des turbines éoliennes.....	4
I.2.1.2 .1 Les éoliennes à axe verticale.....	4
I.2.1.2 .2 Les éoliennes à axe horizontale.....	5
I.2.2 L'énergie hydraulique .....	6
I.2.2.1 définition .....	6
I .2.2.2 Avantage des centrales hydrauliques .....	7
I .2.2.3 Inconvénients des centrales hydrauliques .....	7
I .2.3 Énergie de la géothermie.....	8
I .2.3.1 Les avantages d'énergie géothermie .....	8
I .2.3.2 Les inconvénients d'énergie géothermie.....	9
I .2.4 L'énergie Biomasse.....	9
I .2.4.1 Les Avantages d'énergie biomasse .....	10
I .2.4.2 Les Inconvénients d'énergie biomasse.....	10
I .2.5 L'énergie solaire.....	10
I .2.5.1 Rayonnement solaire .....	11
I .2.5.1.1 Types de rayonnement .....	11
I .2.5.2 L'énergie solaire thermique .....	12
I .2.5.3 Panneaux photovoltaïques.....	12
I .2.5.3.1 Cellule photovoltaïque .....	13
I .2.5.3.2 Composante de cellule PV .....	13
I .2.5.3.3Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) .....	14
I .3 Conclusion.....	15

**CHAPITER II**

**Les matériaux intelligents**

II.1 Introduction.....	17
II.2 Définition des matériaux intelligents .....	17
II.2.1 Les Alliages à Mémoire de Forme magnétique .....	18
II.2.1.1 Famille d’alliage .....	19
II.2.1.2 Les applications des AMF .....	20
II.2.1.2.1 Secteur aérospatial .....	20
II.2.1.2.2 Secteur industriel .....	21
II.2.1.2.3 Secteur biomédical.....	22
II.2.2 Les matériaux magnétostrictifs .....	23
II.2.2.1 Les applications .....	24
II.2.2.1.1 Capteur magnétostrictif.....	24
II.2.2.1.2 Les actionneurs .....	25
II.2.2.1.3 Émetteurs récepteurs d’ondes élastiques .....	26
II.2.3 Les matériaux piézoélectriques.....	26
II.2.3.1 Le phénomène de la piézoélectricité.....	26
II.2.3.2 Les applications .....	27
II.2.3.2.1 Des structures quasi-statiques .....	27
II.2.3.2.2 Des structures résonnantes .....	27
II.3 Radio fréquence .....	28
II.3.1 Transmission radio fréquence .....	28
II.3.2 Récupérateur d’énergie RF .....	29
II.3.3 Rectenna.....	29
II.4 Conclusion .....	37

**Chapitre III**

**Modélisation et simulation d’un système Transmission l’énergie**

III.1 Introduction .....	39
III.2 Modélisation d’une cellule photovoltaïque .....	40
III.2.1 Le photo-courant.....	41
III.2.2 Le courant de saturation $I_0$ .....	41
III. 2.3 Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite).....	41
III.2.4 Le courant du panneau.....	42
III.3 Résultats de simulation.....	42

## INTRODUCTION GENERALE

---

III.3.1 Caractéristiques I(V) et P(V) .....	43
III.4 Modélisation du système de récupération d'énergie RF .....	44
III.4.1 Antenne.....	45
III.4.1.1 Différents types d'antennes .....	46
III.4.2 Circuit d'adaptation :.....	47
III.4.3 Circuit redresseur.....	48
III.5 Résultats de simulation.....	48
III.5.1 la puissance, la tension et les efficacités en fonction de la charge : .....	52
III.6 Conclusion .....	55

## CONCLUSION GENERALE

### Bibliographie

### Liste Des Figures

Figure I. 1 les énergies renouvelables .....	3
Figure I.2 Éléments constituant une éolienne à axe horizontal.....	4
Figure I.3 Eolienne à axe vertical.....	5
Figure I.4 Eolienne à axe horizontal .....	6
Figure I.5 Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique [6].....	7
Figure I.6 Les énergies de la géothermie à haute énergie.....	8
Figure I.7 Le fonctionnement d'une centrale à biomasse.....	9
Figure I.8 Les types de rayonnement solaire.....	12
Figure I.9 Composantes de cellule photovoltaïque.....	14
Figure II.11 Les Alliages à Mémoire de Forme magnétique.....	19
Figure II.12 Télescope Hubble lancé en avril 1990 [15].....	20
Figure II.13 Micro actuateur pour la robotique.....	21
Figure II.14 Lunette avec monture super élastique [16].....	22
Figure II.15 Sten cardiovasculaire comprimé après relâché [17].....	23
Figure II.16 Un capteur magnétostrictif.....	24
Figure II.17 Exemple de cycle de fonctionnement d'un film piézo-composite produit par Smart matériel corporation.....	27
Figure I.18 Schéma de principe de fonctionnement d'un bi-morphe.....	28
Figure II. 19 structure d'une rectenna.....	30
Figure II. 20 Adaptation du circuit redresseur à l'antenne.....	31
Figure II. 21 Redresseur mono-diode, topologie série.....	33
Figure II. 22 Redresseur mono-diode, topologie parallèle.....	33
Figure II. 23 Redresseur multi-diode topologie en doubleur de tension.....	34
Figure II. 24 Redresseur multi-diodes topologie du multiplieur de tension.....	35
Figure II. 25 Topologie pont de diode.....	35
Figure II. 26 Courbe d'un filtre passe-bas (A) Circuit équivalent d'un filtre passe-bas(B) .....	36
Figure III. 27 Transmission l'énergie solaire par radio fréquence.....	39
Figure III. 28 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	40
Figure III. 29 Caractéristique courant – tension.....	43
Figure III. 30 Caractéristique puissance – tension.....	44
Figure III. 31 Schéma bloc d'une rectenne.....	45
Figure III. 32 Circuit équivalent d'antenne .....	46
Figure III. 33 antennes filaire .....	46
Figure III. 34 Antenne cornet.....	47
Figure III. 35 redresser.....	48
Figure III. 36 Transmission l'énergie par radio fréquence.....	49
Figure III. 37 montre les tracés la tensions pour différentes valeurs de R.....	51
Figure III. 38 montre les tracés la puissance pour différentes valeurs de R.....	51
Figure III. 39 montre les tracés les efficacité pour différentes valeurs de R.....	52
Figure III. 40 Tension de sortie DC par rapport à la résistance de charge.....	53
Figure III. 41 Puissance de charge moyenne par rapport à la résistance de charge.....	54
Figure III. 42 Efficacité de conversion de puissance par rapport à la résistance de charge.....	54



# **INTRODUCTION GENERALE**

### INTRODUCTION GENERALE

Avec les progrès que connaît l'électronique ces dernières années, il est devenu de plus en plus courant d'utiliser des capteurs, des réseaux de capteurs et des actionneurs sans fil dans beaucoup de domaines (spatial, militaire, médical, domestique, ...), et plus particulièrement dans les endroits qui sont dangereux et difficiles d'accès. Pour une meilleure intégration dans l'environnement, il faut réduire la taille de ces systèmes et leur assurer l'autonomie énergétique. Les techniques d'alimentation conventionnelles par pile ou par batterie restent contraignantes, voir même difficiles à envisager pour certaines applications. En effet, elles sont limitées en autonomie, nécessitent des remplacements périodiques et leur recyclage est coûteux.

L'objectif de ce travail de mémoire est de proposer une solution alternative qui soit efficace, moins contraignante et plus respectueuse de l'environnement. De ce point de vue, la transmission d'énergie sans fil (TESF) se présente comme une solution très intéressante. Elle consiste à transmettre de l'énergie d'un point à un autre à travers l'espace libre, et qui une fois captée et convertie en DC, servira à alimenter le ou les dispositifs sans fil. Dans le cadre de cette mémoire, nous nous sommes focalisés sur le transfert d'énergie. Dans un premier temps, l'énergie électrique DC est convertie en énergie micro-onde à l'aide d'une source RF. Ensuite, cette énergie est rayonnée dans l'espace libre par une antenne d'émission. Enfin, l'énergie rayonnée est captée par un circuit Rectenna, convertie en puissance DC et délivrée à une charge résistive.

Dans cette mémoire, nous avons traité trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons traité des énergies en général et de l'énergie solaire en particulier. Dans le deuxième chapitre, les matériaux intelligents et les radiofréquences ont été traités. Dans le troisième chapitre, le système d'exploitation et la récolte de l'énergie solaire via les fréquences radio a été abordée.

# **CHAPTER I**

## **Généralité sur les énergies renouvelables**

**I.1 Introduction**

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie. Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre, de la biomasse humide ou sèche à une échelle de temps compatible avec l'histoire de l'humanité. Ce n'est pas le cas des combustibles fossiles et nucléaires.

**I.2 Définition d'énergie renouvelable**

Les énergies renouvelables (ou EnR) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituées plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine.

Les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres ». Le faible impact environnemental de leur exploitation en fait un élément majeur des stratégies RSE des entreprises en matière de développement durable [1].



Figure I. 1 les énergies renouvelables [35]

### I.2.1 L'énergie éolienne

Ce mode transmet l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique grâce aux turbines Aérogénérateurs. Deux technologies utilisées principalement sont les générateurs synchrones et asynchrones. En fonction de la technologie choisie, leur raccordement au réseau se fait soit Directement, soit via des interfaces d'électronique de puissance. En tenant compte de L'intermittence de ce type d'énergie, les turbines éoliennes sont normalement associées avec un système de stockage d'énergie et/ou avec un moteur diesel [2]

#### I.2.1.1 Principes de fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes : Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une

entraîne qui constitués une force parasite. Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [3]

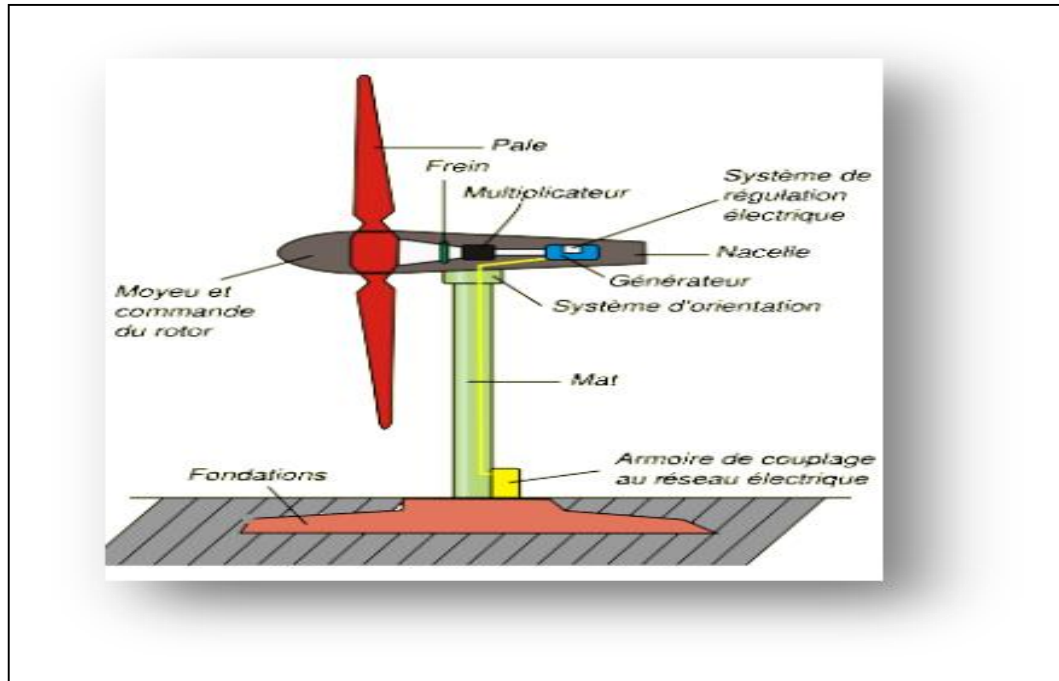


Figure I.2 Éléments constituant une éolienne à axe horizontal.[36]

### I.2.1.2 Types des turbines éoliennes

Il existe deux types d'éoliennes modernes ; celle à axe horizontal dont le rotor ressemble à une hélice d'avion, et éoliennes à axe vertical dont la forme s'apparente à celle d'un batteur à œuf à l'envers. Dans les deux cas, les éoliennes capturent l'énergie du vent et la transforment en énergie électrique.

#### I.2.1.2 .1 Les éoliennes à axe verticale

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation ; le rotor de Savonnais et le rotor de Darrieux. De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. [4].



**Figure I.3** Eolienne à axe vertical.

### **I.2.1.2 .2 Les éoliennes à axe horizontale**

La technologie actuellement la plus utilisée pour capter l'énergie éolienne utilise ce type d'éolienne c'est la meilleur ; parce que' il est efficace grâce à son faible volume (elles sont constituées de plusieurs pales profilées d'une façon manière aérodynamique à la manière des ailes d'avion). [5]



**Figure I.4** Eolienne à axe horizontal

## **I.2.2 L'énergie hydraulique**

### **I.2.2.1 définition**

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (FigureI.5).



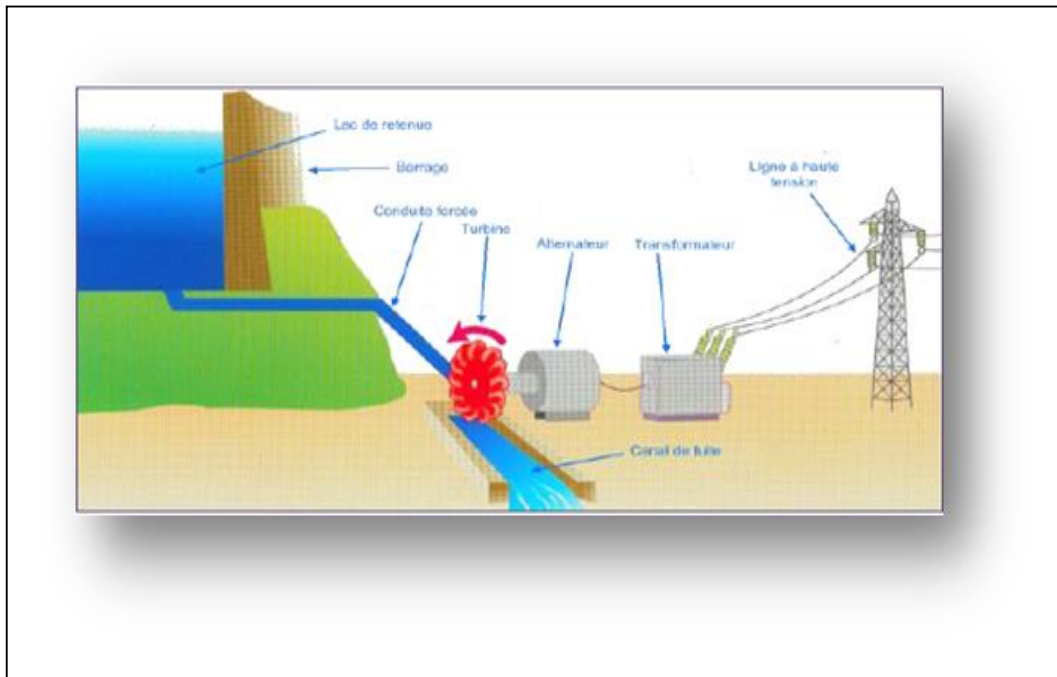


Figure I.5 Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique [6].

### I .2.2.2 Avantage des centrales hydrauliques

- Faible coût du KWh pour le gros hydraulique
- Souplesse d'utilisation
- Possibilité de « stocker » de l'électricité pour le turbinage
- L'hydraulique est une énergie renouvelable elle fournit 13% de la production et contribue également à l'écrêtement des crues

### I .2.2.3 Inconvénients des centrales hydrauliques

- Contrainte géographique
- Aléas climatiques (sécheresse)
- Nécessité de concilier les différents usages de l'eau
- Impacts sur l'environnement à la construction
- L'inondation de certains reliefs lors de la construction de barrages.

### I .2.3 Énergie de la géothermie

La géothermie utilise la chaleur naturelle émanant des nappes aquifères présentes dans le sol pour fournir un système durable de chauffage pour les bâtiments (habitations, commerces, etc.). Si cette énergie géothermique peut être à l'origine de chaleur, elle permet également de produire de l'électricité, moyennant l'utilisation de turbines. Une vingtaine de pays produisent de l'électricité géothermique, essentiellement en Amérique du Nord et en Asie. En Europe, c'est l'Italie qui fait clairement figure de meilleur élève de la classe en la matière. Pour 2013, l'énergie totale (chaleur et électricité) issue de la géothermie au plan mondial représenterait 167 TWh, dont un peu moins de la moitié pour la production d'électricité (76 TWh). [7]

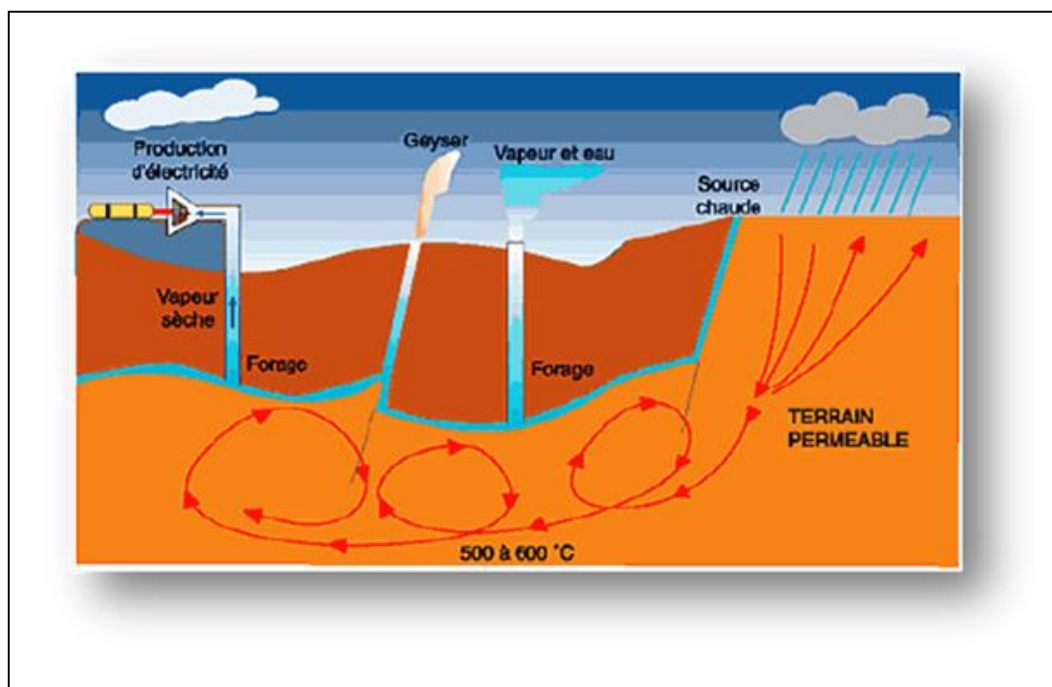


Figure I.6 Les énergies de la géothermie à haute énergie.[37]

#### I .2.3.1 Les avantages d'énergie géothermie

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de biomasse.

I .2.3.2 Les inconvénients d'énergie géothermie

Selon la nature du sol, les couts de forage peuvent être très élevés. Mais la mise en place d'une installation géothermique correspond à un investissement important, le cout d'exploitation est quasiment nul.

I .2.4 L'énergie Biomasse

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, ou bien après de nouvelles transformations chimiques biocarburants. La biomasse est une énergie qui peut être polluante, comme le biocarburant et le bois qui donne, quand on le brûle, des gaz à effet de serre.

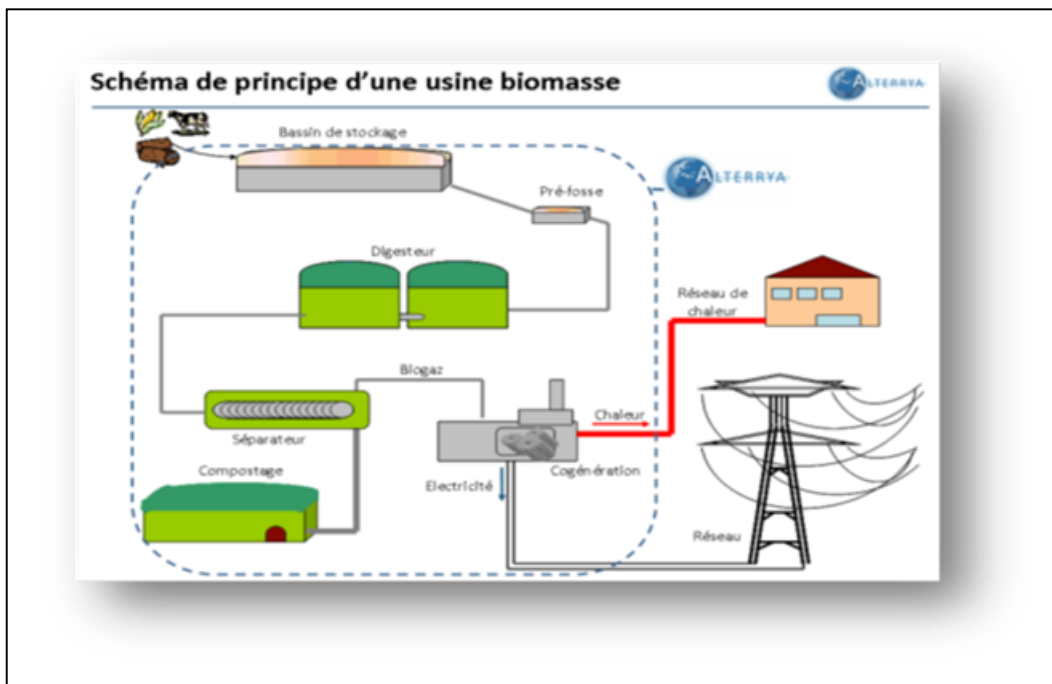


Figure I.7 Le fonctionnement d'une centrale à biomasse.[38]

**I .2.4.1 Les Avantages d'énergie biomasse**

C'est une énergie qui émet peu de gaz à effet de serre et qui peut être stockée. Concernant particulièrement le bois-énergie, il y a une large disponibilité de la ressource et le prix du bois de chauffage ne suit pas le cours du pétrole.

**I .2.4.2 Les Inconvénients d'énergie biomasse**

Elle ne peut avoir qu'un apport limité car le recours intensif à la biomasse entraînerait des impacts négatifs sur l'environnement tels que des phénomènes de déforestations (en cas d'exploitation intensive du bois-énergie), d'érosions des sols, de pollution des sols eaux (en cas de production intensive de biocarburant).

**I .2.5 L'énergie solaire**

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [8].

L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie, elle représente un potentiel considérable. En effet, la terre reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. Avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh /m<sup>2</sup>/jour.

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires.

**I .2.5.1 Rayonnement solaire**

Le soleil tire son énergie de réactions thermonucléaires se produisant dans son noyau.

L'énergie émise par le soleil est sous forme d'ondes électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement va subir des transformations par absorption et par diffusion, on distingue pour cela.

**I .2.5.1.1 Types de rayonnement****❖ Le rayonnement direct**

Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de la modification (sans diffusion par l'atmosphère). Les rayons restent parallèles entre eux.

**❖ Le rayonnement diffus**

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. Ces obstacles ont pour effet de repartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions.

**❖ Le rayonnement réfléchi**

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple : la neige ; cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée.

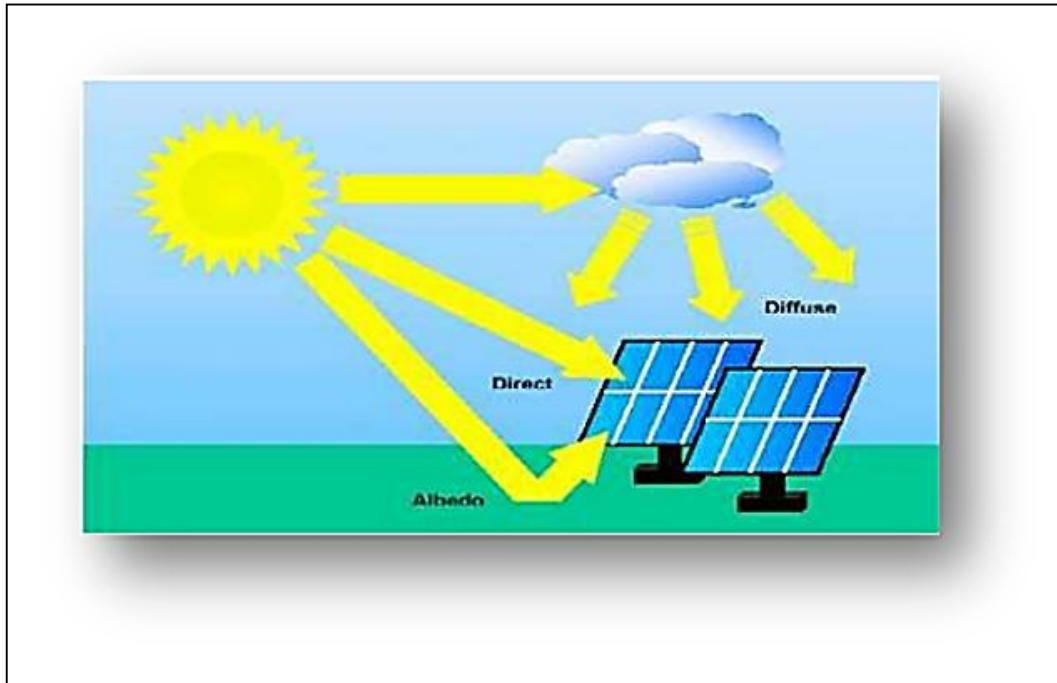


Figure I.8 Les types de rayonnement solaire.

### I .2.5.2 L'énergie solaire thermique

Le solaire thermique permet de récupérer la chaleur du rayonnement par la mise en œuvre de capteurs solaires qui transforment l'énergie solaire en chaleur transmise à un fluide caloporteur (parfois de l'air). Ce fluide restitue sa chaleur dans un ballon de stockage d'eau chaude par l'intermédiaire d'un échangeur. L'eau chaude ainsi produite, stockée dans le ballon tampon, peut être utilisée de jour comme de nuit. [9]

### I .2.5.3 Panneaux photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque est un dispositif permettant de convertir une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Ceci est faisable grâce à de nombreuses cellules photovoltaïques qui constituent le panneau [10].

**I .2.5.3.1 Cellule photovoltaïque**

C'est un composant électronique qui permet de produire l'électricité à partir du rayonnement lumière de soleil, la cellule PV est constituée de semi-conductrices (matériaux isolants + matériau conducteur).

**I .2.5.3.2 Composante de cellule PV**

- La première couche (négative) est fabriquée en silicium ajouté une petite quantité de phosphore (Type N).
- La deuxième couche (positive) est fabriquée en silicium ajouté une quantité de bore (Type P).
- La couche supérieure est une substance transparente (matériau anti-réflexion pour absorption de la plus grande quantité de rayonnement solaire pour générer efficacement l'énergie électrique de manière efficace).

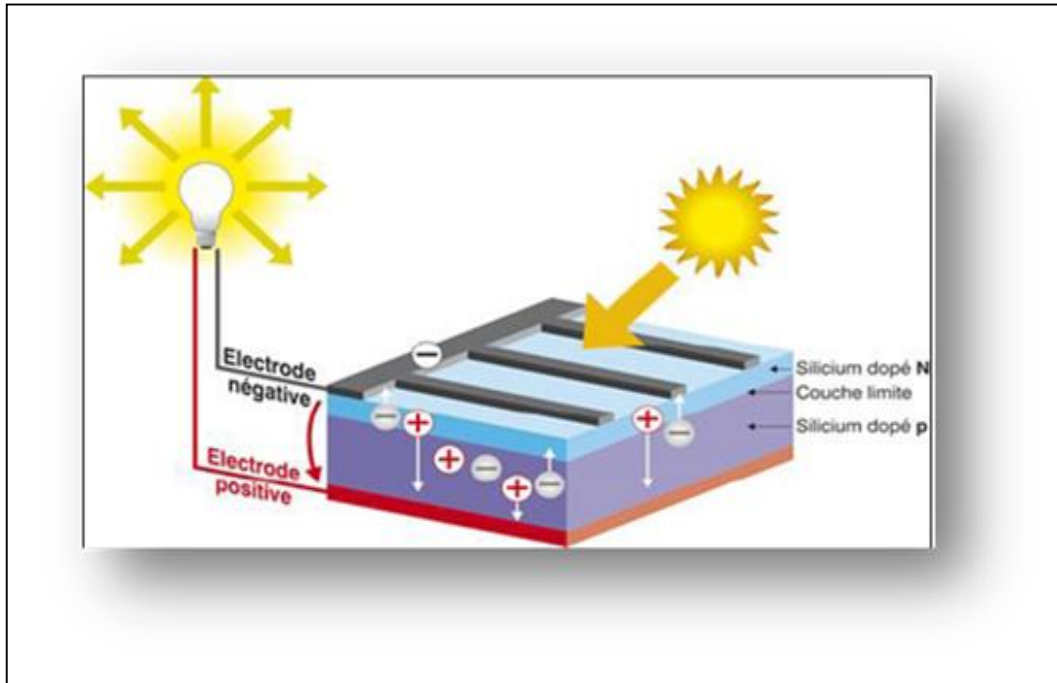


Figure I.9 Composantes de cellule photovoltaïque.[39]

### I .2.5.3.3 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent.

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [11] :

#### 1) Les cellules monocristallines

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24% en laboratoire) Cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe. [11]

#### 2) Les cellules poly cristallines

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8 en la boratoire). [11]

#### 3) Les cellules amorphes



Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. [11]

### **I.3 Conclusion**

Tout au long de ce chapitre on a défini différentes énergies renouvelables, les avantages et inconvénients et nous sommes rendus compte que les énergies renouvelables ont une grande importance. Chaque type d' (EnR) à caractéristiques distinctives et un principe de fonctionnement qui diffère de l'autre; cela a poussé la plupart des pays développés à en dépendre pour produire de l'électricité et répondre à leurs besoins, Selon les capacités disponible

# **CHAPTER II**

## **Les matériaux intelligents**

## II.1 Introduction

Les matériaux intelligents ou aussi appelés adaptatifs sont composés d'entre autre de matériaux piézoélectriques, de matériaux électrostrictifs, de matériaux magnétostrictifs, des Alliages à Mémoire de Forme, il modifie leur propriété physique comme la rigidité ou la viscosité en fonction d'un stimulus extérieur tel que la contrainte mécanique, un champ électrique et magnétique ou un changement de température. Chaque type de matériau à des qualités différentes qui sont mise à profit, au mieux, selon les domaines d'utilisation demandé les matériaux sur lesquels notre effort se sont les matériaux magnétostrictifs qui on la capacité de transformer une énergie mécanique en énergie magnétique et vice-versa, ces matériaux sont notamment beaucoup utilisés comme actionneurs et capteurs. Des études sont menées sur ces différents matériaux afin de les optimiser mais aussi pour minimiser les pertes les en placent de façon appropriée. Pour ces matériaux il faut allier efficacité et poids. Le physicien anglais James Prescott Joule découvrit en 1842 qu'un barreau de fer soumis à un champ magnétique longitudinal s'allongeait suivant ce champ, en même temps qu'il se contractait transversalement, comme sous l'effet d'une traction ou compression mécanique. Il donna à ce phénomène le nom de magnétostriction. Depuis lors, d'autres effets mécaniques du champ magnétique ont été mis en évidence. Soumis à un champ magnétique, des échantillons de certaines substances subissent non seulement des dilatations ou des contractions, mais encore des flexions, des torsions, des modifications de densité, voire des variations de leur module d'Young. À la suite de Joule, on a continué à classer tous ces phénomènes magnéto élastiques sous le vocable de magnétostriction. La magnétostriction se présente, au sens le plus général du terme, comme l'ensemble des relations liant les propriétés mécaniques d'un corps à ses propriétés magnétiques. [12].

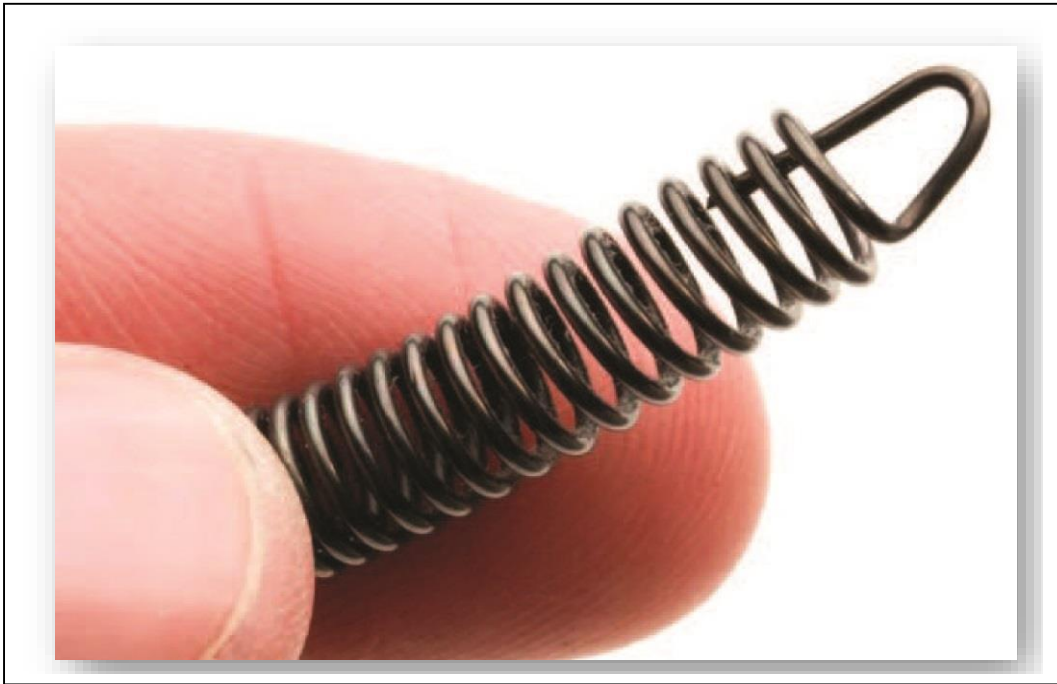
## II.2 Définition des matériaux intelligents

Les matériaux intelligents ou "smart matériaux" sont de plus en plus sujets de recherche dans de nombreux domaines scientifiques. Elles sont innovantes et permettent le développement de technologies dans des domaines très divers tels que l'informatique, la robotique et le médical.

Un matériau intelligent est sensible, adaptatif et évolutif. Il s'oppose au matériau classique, inerte par définition, car ses caractéristiques restent toujours les mêmes quel que soient les sollicitations auxquelles ce matériau est soumis. Il possède des fonctions qui lui permettent de se comporter comme un capteur (détecter des signaux), un actionneur (effectuer une action sur son environnement) ou parfois comme un processeur (traiter, comparer, stocker des informations). Ce matériau est capable de modifier spontanément ses propriétés physiques, notamment sa forme, sa connectivité, sa viscosité ou sa couleur, en réponse à des excitations naturelles ou provoquées. Celles-ci peuvent venir de l'extérieur ou de l'intérieur du matériau : variations de température, de contraintes mécaniques, de champs électriques ou magnétiques. Le matériau va donc adapter sa réponse, signaler une modification apparue dans l'environnement et dans certains cas, provoquer une action de correction.

### **II.2.1 Les Alliages à Mémoire de Forme magnétique**

Un alliage à mémoire de forme (AMF) est un alliage possédant plusieurs propriétés inédites parmi les matériaux métalliques (figure II.11) : la capacité de garder en mémoire une forme initiale et d'y retourner même après une déformation, la possibilité d'alterner entre deux formes préalablement mémorisées lorsque sa température varie autour d'une température critique, et un comportement super élastique permettant des allongements sans déformation permanente supérieurs à ceux des autres métaux. Parmi les principaux alliages à mémoire de forme, on retrouve toute une variété d'alliages de nickel et de titane comme constituants principaux, en proportions presque égales. Bien que « nitinol » ne soit en fait que le nom de l'un de ces « alliages qu'atomiques nickel-titane », cette appellation est devenue couramment utilisée dans la littérature pour désigner l'ensemble de ces alliages, qui ont des propriétés fort semblables. Dans une moindre mesure, le laiton et certains alliages cuivre-aluminium possèdent également des propriétés de mémoire de forme. Ces alliages à base de cuivre ont été mis au point par M. Clément et M. Mutel au sein du centre de recherche métallurgique de Trimétaux. [13].



**Figure II.10** Les Alliages à Mémoire de Forme magnétique. [40]

### II.2.1.1 Famille d'alliage

Il existe plusieurs familles d'AMF. Les plus connues sont les alliages titane-nickel (Ti-Ni) et les alliages cuivreux (Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Be), car ils possèdent de bonnes propriétés thermomécaniques tout en ayant des prix industriellement compétitifs. À l'opposé, les alliages d'or (Au-Cd, Cu-Au-Zn) et d'argent (Ag-Cd) sont coûteux et n'ont donc que des intérêts scientifiques puisqu'ils ne sont pas commercialisables. Finalement, ils existent des alliages de Fer (Fe-Mn-Cr-Ni-Si, Fe-Cr-Ni-Co-Mn-Si) peu coûteux, mais possédantes des propriétés thermomécaniques plutôt limitées. De plus, même avec l'ajout de chrome, ces alliages ne supportent pas bien les milieux corrosifs [14].

### II.2.1.2 Les applications des AMF

Cette section contient quelques domaines d'applications ainsi que quelques exemples bien connus dans le milieu des alliages à mémoire de forme. Il est à noter qu'elle ne constitue pas une revue exhaustive de toutes les applications

#### II.2.1.2.1 Secteur aérospatial

L'industrie aérospatiale doit minimiser le volume et le poids de toutes leurs composantes afin de minimiser les coûts de lancement.

Puisque les AMF offrent un rapport force / densité et énergie / poids excellent, ils sont des outils par excellence. Le premier exemple est le télescope Hubble. Ce télescope, lancé en avril 1990(Figure), possédait des actionneurs en AMF (reprise de forme) pour le déploiement des panneaux solaires nécessaires à l'alimentation électrique des composantes électroniques



**Figure II.11** Télescope Hubble lancé en avril 1990 [15].

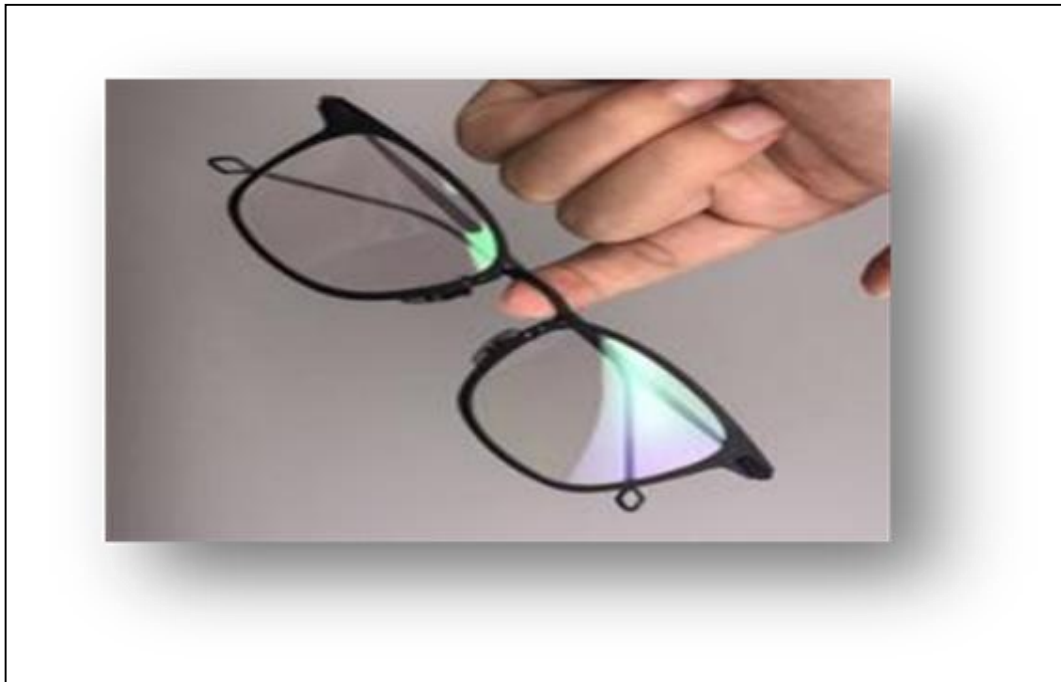
### II.2.1.2.2 Secteur industriel

Ce secteur, tout comme l'industrie aérospatiale, utilise également la reprise de forme des AMF afin de créer des actionneurs les plus compacts possible. Par contre, on utilise aussi les AMF pour leur effet amortissant et leur effet super élastique. En robotique, l'utilisation de micro actionneurs est courante. Par exemple, la figure montre une main artificielle utilisant les AMF.



**Figure II.12** Micro actuateur pour la robotique.[41]

L'optométrie, avec ses lunettes (Figure II.14) à monture super élastique, est probablement l'exemple le plus connu. En effet, la super élasticité permettent de grandes déformations et les lunettes deviennent alors pratiquement incassables.



**Figure II.13** Lunette avec monture super élastique [16].

### II.2.1.2.3 Secteur biomédical

Ce secteur d'activité a des exigences très élevées par rapport aux matériaux utilisés. D'ailleurs, ce secteur est probablement le plus actif de nos jours et il utilise particulièrement l'effet super élastique avec les alliages de nitinol qui sont évidemment biocompatibles. Par exemple, les stents sont des dispositifs qui permettent une chirurgie minimalement invasive afin de contrer les problèmes cardiaques liés à l'obstruction partielle des artères [17].

En effet, ce dispositif, une fois contracté, s'insère dans l'artère. Par la suite, lors du relâchement, l'effet super élastique contraint l'artère à retrouver le diamètre original et permet ainsi le passage du sang (figure II.15).



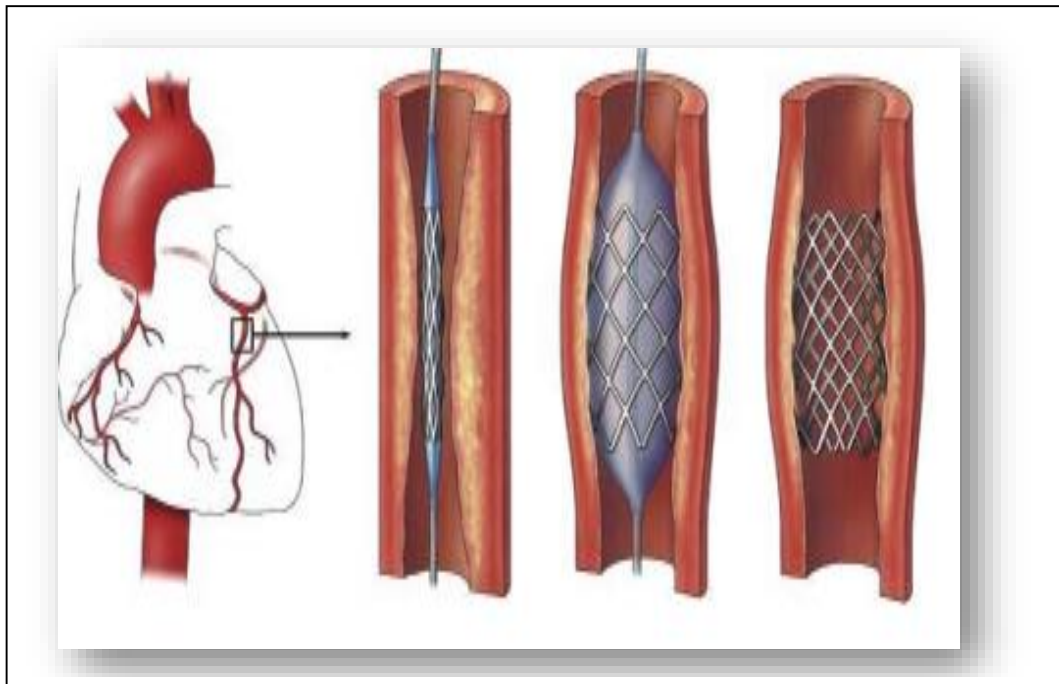


Figure II.14 Sten cardiovasculaire comprimé après relâché [17].

## II.2.2 Les matériaux magnétostrictifs

Les alliages magnétostrictifs sont au champ magnétique ce que les piézoélectriques sont au champ électrique. Sous l'effet d'un champ magnétique, un barreau de fer s'allonge tandis qu'il subit une striction dans le sens transversal. Inversement, l'effet Villari correspond à l'aimantation du barreau sous l'effet d'un allongement. Selon la géométrie considérée, il est aussi possible d'exploiter des déformations en flexion ou en torsion.

Seuls les alliages de Fer et de Terres rares, tel que le terfenol-D, permettent d'obtenir des déformations importantes, de l'ordre de 1000 à 2000 ppm, soit 10 à 50 fois supérieures à celles obtenus avec les métaux. Bien que ces déformations soient légèrement plus perméabilité relativement faible des matériaux (4 dans le cas du Terfenol-D). Ces alliages pourraient être 6 intéressants dans la réalisation de moteurs à effort élevé et faible vitesse importantes que celles obtenues avec les piézoélectriques [18].

II.2.2.1 Les applications

II.2.2.1.1 Capteur magnétostrictif

Les matériaux ferromagnétiques exposent un effet magnétostrictif inverse qui se traduit par la modification de la susceptibilité magnétique en présence de contraintes mécaniques dans le matériau. C'est cet effet inverse que l'on va aussi exploiter dans les capteurs de déplacement.

Le transducteur magnétostrictif comporte un solénoïde à l'intérieur duquel se trouve placé un barreau en matériau ferromagnétique, le tout étant enfermé dans un cylindre assurant la fermeture du circuit magnétique. Une magnétisation statique du matériau est obtenue au moyen d'un aimant permanent solidaire du mouvement à enregistrer. L'électronique associée génère une impulsion qui va se déplacer dans le guide d'onde constitué par le barreau ferromagnétique et être perturbée par le champ induit par l'aimant qui se déplace. L'analyse de l'onde réfléchie en bout du barreau va permettre d'identifier la position de l'aimant.

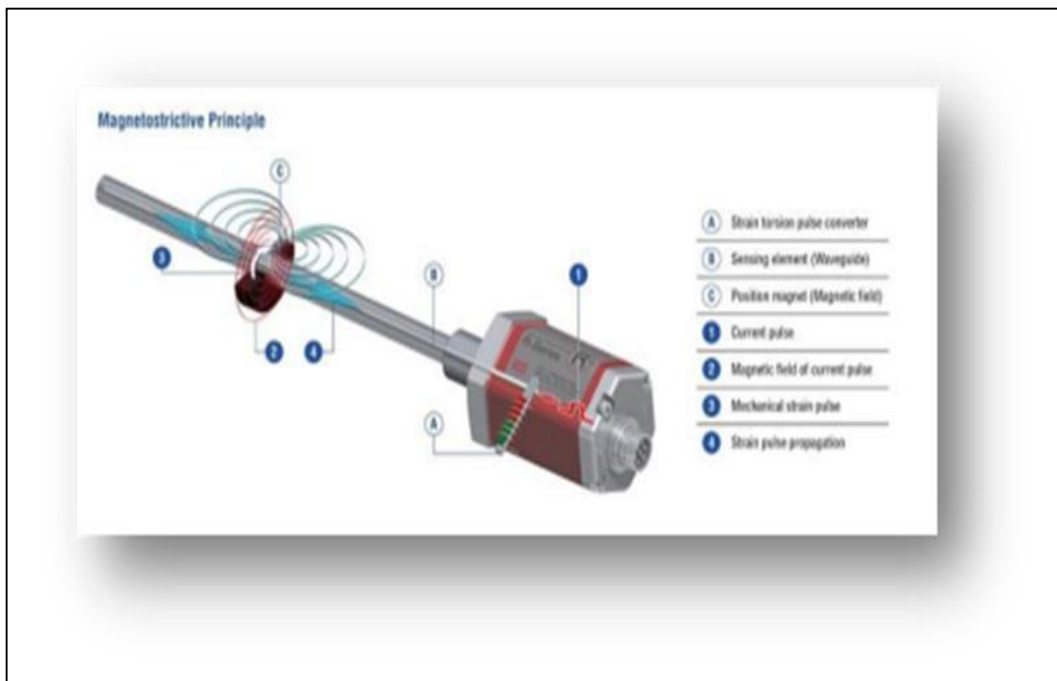


Figure II.15 Un capteur magnétostrictif.[42]

Les matériaux ferromagnétiques employés peuvent être le fer, le nickel, ou des alliages aluminium-fer (alfenol) ou nickel-cobalt, bien que le matériau le plus couramment utilisé soit le Terfenol-D, du fait de ses bonnes performances magnétostrictives. Ce type de capteur permet des courses importantes (parfois jusqu'à 2 m) et supporte des pressions élevées. On l'emploie préférentiellement dans les vérins hydrauliques.

Les capteurs de position magnétostrictifs offrent tous les avantages des principes magnétostrictifs : mesures effectuées sans contact (aucun contact en effet entre le barreau ferromagnétique et l'aimant permanent), donc sans usure mécanique, reproductibilité maximum, durée d'utilisation maximum, mesure absolue.

### **II.2.2.1.2 Les actionneurs**

Un actionneur constitue le composant actif mécaniquement d'une chaîne d'asservissement d'une grandeur contrôlée par le déplacement d'une pièce. Les actionneurs à mouvement longitudinal ou transversal sont le plus souvent à base d'empilements piézoélectriques en PZT. Cependant, les actionneurs magnétostrictifs constitués à partir d'éléments en Terfenol-D présentent pour de basses tensions électriques, sans amplification hydraulique ou mécanique, des grands déplacements (20 à 550  $\mu\text{m}$ ) et des forces importantes (500 à 10 000 N). Un actionneur magnétostrictif à mouvement longitudinal comporte un barreau de Terfenol-D, un enroulement de commande, parfois un aimant permanent polarisant et un ressort de précompression ( $> 5\text{MPa}$ ) de l'élément actif. Cette pré-compression est nécessaire pour que la magnétostriction soit forte et que le barreau reste en compression durant le fonctionnement. En effet, le Terfenol ne supporte que des contraintes maximales de tension 10 à 25 fois plus faibles que celles de compression. L'amplitude du mouvement généré par un tel actionneur dépend de l'intensité du champ magnétique appliqué, de la réaction de la charge et de la précompression. Par exemple, pour un actionneur de puissance comportant un cylindre de Terfenol-D de diamètre 20 mm et de longueur 500 mm le déplacement atteint au maximum 550  $\mu\text{m}$  avec une charge de 2 kN pour un champ de 75 kA/m et une pré-compression de 9,5MPa. Pour une charge de 4 kN et une précontrainte de 25,5 Mpa, le déplacement est de 380  $\mu\text{m}$  avec un champ de même intensité. Il est égal à 120  $\mu\text{m}$  pour une force utile de 7 kN avec un champ et une pré-compression identiques aux valeurs précédentes. Cet actionneur est capable de générer une force utile dynamique de 9 kN

environ à 400 Hz pour une fréquence d'un champ appliqué sinusoïdal égale à 200 Hz, la résistivité du Terfenol-D étant voisine de  $60 \mu\text{W.cm}$ .

### II.2.2.1.3 Émetteurs récepteurs d'ondes élastiques

Un résonateur magnétostrictif peut être utilisé comme transducteur émetteur ou récepteur d'ondes élastiques. C'est dans le domaine des projecteurs ultrasonores basse fréquence (500 Hz par exemple) pour applications sous-marines que le Terfenol-D présente des avantages importants par rapport aux céramiques piézoélectriques PZT [ $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ ]. La puissance crête ultrasonore que peut émettre un transducteur sans détérioration des performances est limitée par d'une part l'énergie volumique élastique de rupture ou de seuil de non-linéarité élastique du matériau, d'autre part l'énergie volumique magnétique maximale que supporte le matériau sans dépolarisation et non-linéarités magnétiques excessives. Cette puissance émise maximale par unité de volume du matériau actif est 10 fois plus élevée pour le Terfenol que pour les céramiques piézoélectriques PZT [19].

## II.2.3 Les matériaux piézoélectriques

Ces matériaux présentent la faculté de se déformer sous l'application d'un champ électrique d'origine extérieure. Réciproquement, ils développent une polarisation électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique :

### II.2.3.1 Le phénomène de la piézoélectricité

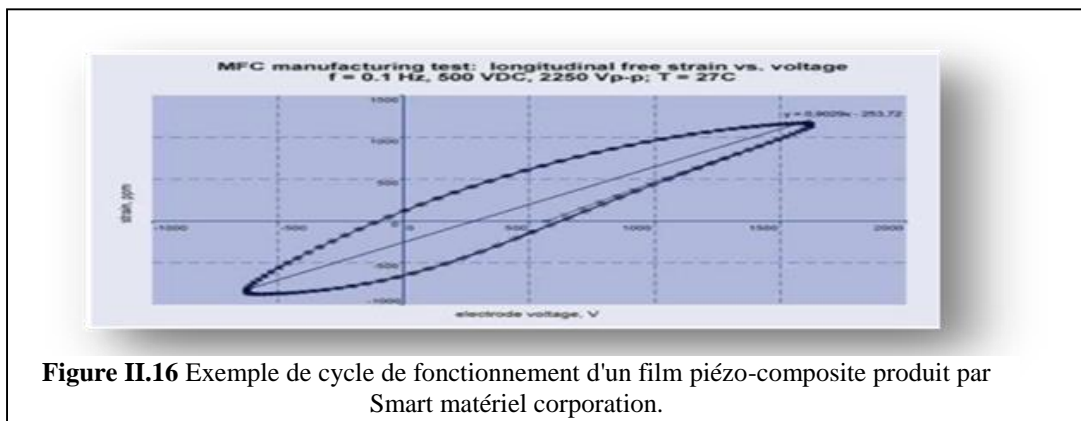
L'effet piézoélectrique repose sur la propriété particulière de certains matériaux qui peuvent se polariser sous l'application d'une contrainte, et qui inversement se déforment lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Dans certains matériaux, comme le quartz, cet effet est naturellement observable. L'application d'une force provoque l'apparition d'un champ électrique (effet piézoélectrique direct), tandis que l'application d'un champ électrique provoque la déformation du matériau (piézoélectrique inverse). Cependant, la réalisation d'actionneurs repose sur l'utilisation de céramiques synthétiques poly cristallines, fréquemment constituées d'un alliage de plomb, de zirconium et de titanate, les céramiques PZT [19], [20], [21]. Les caractéristiques piézoélectriques de ces céramiques résultent de la

polarisation initiale dans un champ électrique à température contrôlée. Les céramiques massives ainsi produites peuvent générer des contraintes de l'ordre de 40 Mpa avec des déformées relatives de 1000 à 2000 ppm.

### II.2.3.2 Les applications

#### II.2.3.2.1 Des structures quasi-statiques

La réalisation d'actionneurs quasi-statiques à base de céramiques multicouches suppose un dispositif d'ampliation externe des déplacements. Il est fait appel le plus souvent à des bras de levier ou à des structures métalliques de précontrainte et d'ampliation, comme les extenseurs développés par la société CEDRAT Technologies [22]. Il est ainsi possible d'exploiter des céramiques produisant des déplacements d'ordre micrométrique et des efforts bloqués de l'ordre du KN pour concevoir des actionneurs produisant des déformations de quelques dixièmes de mm avec des efforts bloqués plus faibles



#### II.2.3.2.2 Des structures résonnantes

Les actionneurs exploitant des céramiques multicouches ou des bi-morphes peuvent également être sollicités à des fréquences correspondant aux modes de résonance de la structure pour obtenir une amplification significative des déformations disponibles. D'autres structures sont quant à elles typiquement résonnantes, comme les transducteurs de type Langevin. Il s'agit d'actionneurs constitués de disques de céramiques piézoélectriques placés

entre deux contre masses métalliques et alimentés pour exciter les contre masses à la résonance mécanique, ce qui permet de produire des vibrations d'amplitude significative [21].

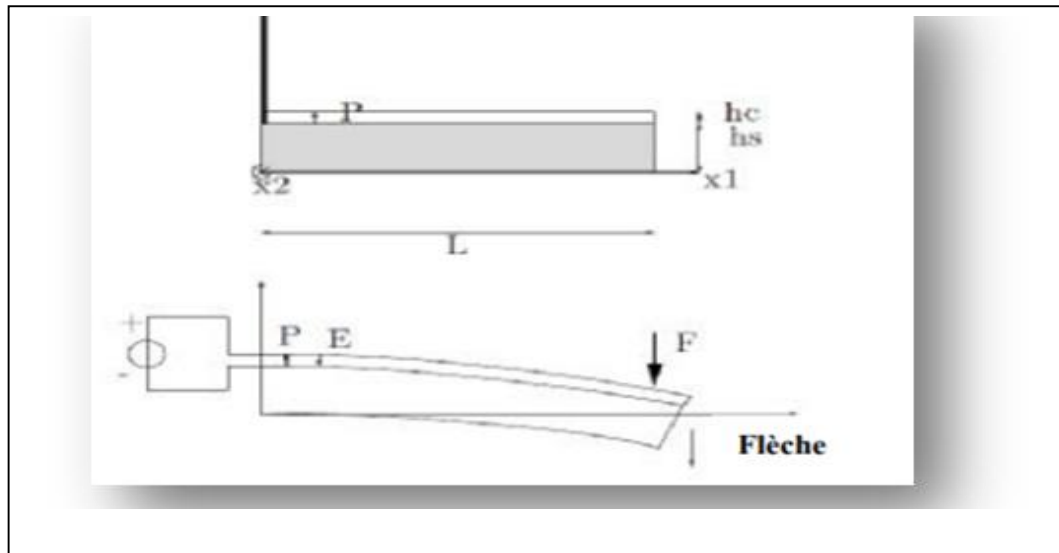


Figure I.17 Schéma de principe de fonctionnement d'un bi-morphe

## II.3 Radio fréquence

### II.3.1 Transmission radio fréquence

Les débuts des transmissions radio sont généralement associés à deux personnages Nikola Tesla et Guglielmo Marconi. On considère qu'un des premiers pas vers les transmissions radio a été effectué lors de l'apparition du système de transmission de l'énergie électrique décrit par Tesla dans le brevet US Patent No.645.576, le 20 mars 1900. Cependant, la paternité de la transmission sans fil a été assez contestée. En effet, au début du siècle, l'invention des communications sans fil est attribuée à G. Marconi, ce qui lui valut le prix Nobel de physique en 1909 avec Karl Ferdinand Braun pour « leur contribution au développement du télégraphe sans fil » [Bren09]. Mais, en 1943, suite à une décision de la cour suprême de justice des États-Unis, le brevet de Tesla a été reconnu comme détenant la priorité dans l'invention de la radio moderne. Illustre l'évolution de la « paternité » des transmissions sans fil à l'aide d'une frise chronologique de la priorité légale des deux brevets.

### II.3.2 Récupérateur d'énergie RF

Un système de récupération d'énergie RF est composé de plusieurs éléments. Comme on le voit sur la figure 2.3, une source de rayonnement, comme par exemple un émetteur RF ou une station de base GSM, est utilisée pour diffuser un signal RF. Ce signal électromagnétique émis est collecté par une antenne de réception et est convertie en une puissance électrique continue utilisable par l'intermédiaire d'un circuit de conversion RF-dc. Ensuite, la puissance électrique continue peut directement alimenter la charge. Celle-ci peut également être placée dans un élément de stockage si par exemple la puissance récupérée est supérieure à la puissance nécessaire pour l'alimentation de la charge. Enfin, si la tension de sortie du récupérateur d'énergie RF n'est pas suffisant ou fluctuante, un convertisseur dc-dc peut être intercalé entre la sortie du récupérateur et la charge. Dans les sections suivantes, chacun de ces blocs est examiné en détail.

### II.3.3 Rectenna

Le terme rectenna est un mot anglais composé de « rectifier + Antenna ». La rectenna est un dispositif permettant la récupération d'énergie électromagnétique. Son principe consiste à collecter cette énergie d'une ou plusieurs sources à travers une antenne réceptrice, la puissance récupérée étant convertie avec un rendement le plus grand possible en puissance continue (DC) à travers un circuit redresseur constitué d'une ou de plusieurs éléments semi-conducteurs actifs non linéaires, ceci afin d'alimenter des dispositifs électroniques à basse consommation. Il convient de noter à ce stade qu'on peut chercher, selon le dispositif à alimenter, à maximiser soit le courant continu, soit la tension continue ou encore la puissance DC elle-même [23].

#### II.3.3.1 Schéma de principe

Tout d'abord, l'antenne de réception capte l'énergie et la transmet au circuit de conversion. Puis le redresseur, constitué d'une ou de plusieurs diodes, convertit cette énergie RF en énergie électrique continue et la transmet à son tour à la charge résistive RL. Toutefois, le redresseur génère en plus de l'énergie DC, des harmoniques d'ordre supérieur qui sont indésirables. La rectenna contient aussi deux filtres HF et DC, situés de part et d'autre du redresseur. Le filtre HF à l'entrée est un filtre passe bas, il remplit deux fonctions. Il filtre les

harmoniques générées par les diodes pour les empêcher d'être rayonnées par l'antenne et il assure une adaptation conjuguée entre l'antenne et le circuit de conversion pour un transfert maximum de puissance entre les deux. Pour ce qui est du filtre de sortie DC, c'est un filtre passe bas qui bloque toutes les composantes RF, y compris la composante fondamentale, et ne laisse passer que la composante DC vers la charge. La charge résistive à l'autre bout de la rectenna modélise généralement l'impédance d'entrée du dispositif à alimenter [24].

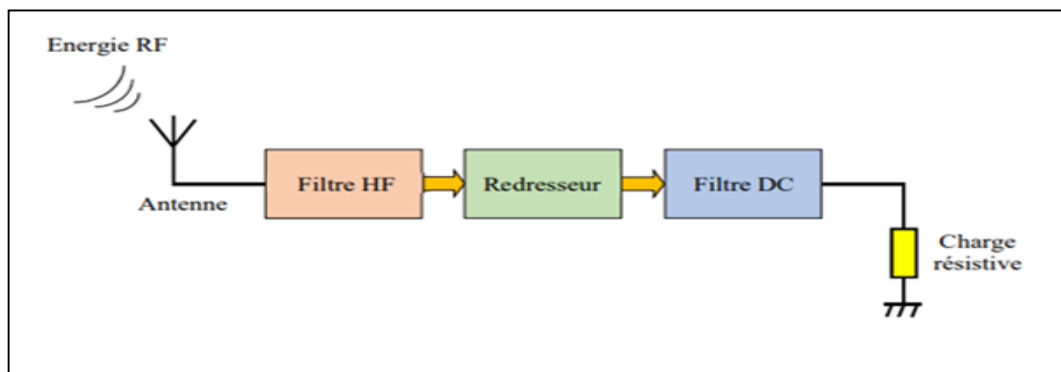


Figure II. 18 structure d'une rectenna.

### II.3.3.1.1 Antenne de réception

Le rôle d'une antenne est de convertir l'énergie électrique d'un signal en énergie électromagnétique, ou inversement de convertir l'énergie électromagnétique en énergie électrique. Une antenne d'émission est un dispositif qui assure la transmission de l'énergie entre un 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 d'une onde se propageant dans l'espace à un appareil récepteur [25]. La polarisation de l'antenne est une caractéristique très importante dans la conception des rectennas et dans le cadre de la récupération d'énergie.

### II.3.3 .1 .2 Filtre HF

Le filtre HF, inséré entre l'antenne et le redresseur, permet d'éliminer les harmoniques d'ordre supérieur générés par la diode Schottky pour éviter leur rayonnement par l'antenne. De plus, le filtre assure l'adaptation entre le circuit de conversion et l'antenne de captation. Pour réduire les dimensions du circuit de conversion et minimiser les pertes, le filtre HF peut



être intégré dans l'antenne réceptrice. Ce type d'antenne est appelé "antennes à rejection d'harmoniques". [26]

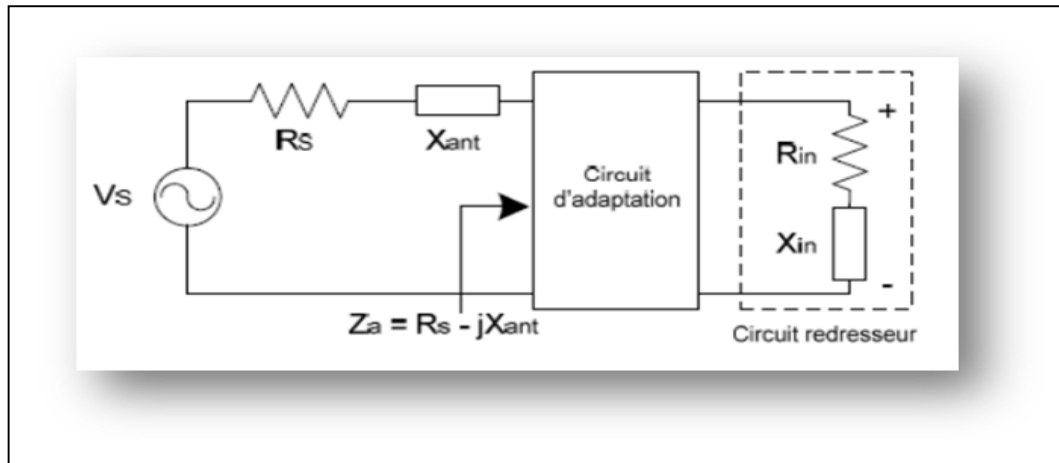


Figure II. 19 Adaptation du circuit redresseur à l'antenne.[26]

### II.3.3 .1.3 Circuit d'adaptation

Le circuit redresseur possède généralement une impédance différente de celle de l'antenne  $Z_{antenne}$  à la fréquence fondamentale et pour une puissance donnée. Ainsi pour que le transfert de la puissance collectée soit maximal vers la diode, il faut une adaptation d'impédance. Cependant, pour pouvoir déterminer expérimentalement les performances de l'antenne de réception, on essaie le plus souvent de l'adapter à  $50\Omega$ , de cette manière la partie réactive de l'impédance de l'antenne est faible. Le problème se ramène alors à l'adaptation d'impédance du circuit de conversion (Rectifier) à  $50\Omega$ . [27]

#### II.3.3 .1.3.1 Adaptation par des éléments localisés

Il s'agit généralement de circuit LC (bobine L et capacité C) en forme de L.

#### II.3.3 .1.3.2 Adaptation par des éléments distribués

##### ❖ Adaptation par une simple ligne de transmission

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

##### ❖ Adaptation par deux lignes successives

La première ligne, avec une longueur  $L_1$  à déterminer, et avec une impédance caractéristique  $Z_{c1}$  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  $L_2$  égale à  $\lambda/4$ . Il s'agit d'un transformateur d'impédance quart d'onde, et par conséquent, son impédance caractéristique

#### ❖ Adaptation par ligne et stub

On utilise une ligne micro ruban de longueur  $L_1$  et un stub de longueur  $L$  stub. A l'entrée de la ligne de longueur  $L_1$ , on a une admittance  $Y_{in}$  dont la partie réelle est égale à  $1/Z$  antenne (on suppose que l'impédance de l'antenne est réelle). D'autre part, le stub en circuit ouvert doit ramener une admittance imaginaire qui annule la partie imaginaire de  $Y_{in}$ . Ici, la valeur de l'impédance caractéristique  $Z_{c1}$  de la ligne ainsi que celle du stub ne sont pas imposées. [27]

### II.3.3 .1.4 Circuit de conversion RF-DC

Dans le domaine des hyperfréquences, les circuits de rectification se basent essentiellement sur des diodes Schottky grâce à leur très faible temps de commutation et leur sensibilité aux faibles niveaux de puissances. À cause de la caractéristique non-linéaire de la diode, des harmoniques supérieurs indésirables apparaissent en plus de la composante continue, ce qui complique la conception et l'optimisation du circuit de conversion. Le rendement de conversion et la tension de sortie sont les paramètres les plus importants à évaluer dans ce type de circuit. Ils dépendent essentiellement de la puissance RF, de la fréquence de travail et de la charge résistive à la sortie de la rectenna. On distingue plusieurs topologies de circuit de rectification selon la nature du circuit d'alimentation.

#### II.3.3.1.4.1 Topologie série

C'est la topologie la plus simple, elle utilise une simple diode en série pour redresser le signal RF (Figure II.22). Il s'agit d'un redressement simple alternance, le filtre passe-bas, 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 rectenna. [28]

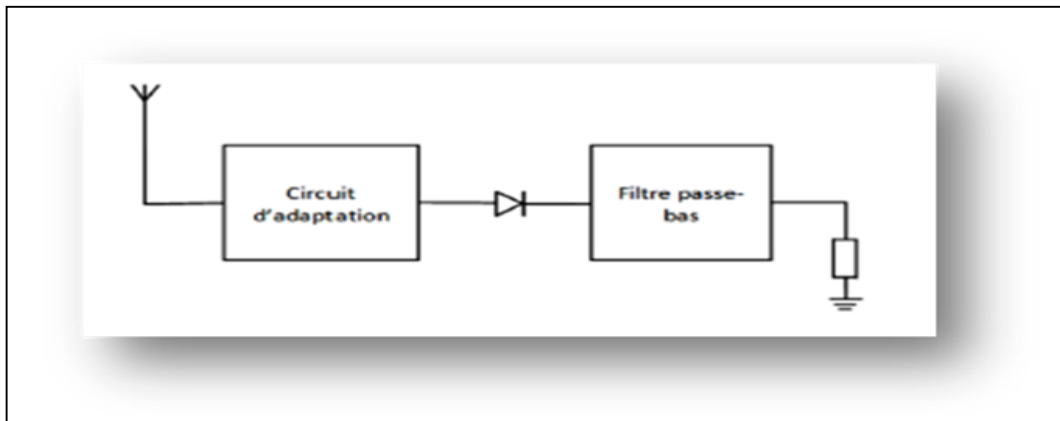


Figure II. 20 Redresseur mono-diode, topologie série.

#### II.3.3.1.4.2 Topologie parallèle

La topologie parallèle est semblable à celle en série et fournit les mêmes performances, elle permet de redresser l’alternance négative

Dans cette configuration, la diode est placée en parallèle entre les deux blocs de filtrage. Cette topologie permet aussi la récupération de faibles niveaux de puissances, pour la même raison que la topologie série, avec des rendements élevés. L’anode ou la cathode de la diode est connectée à la masse. [28]

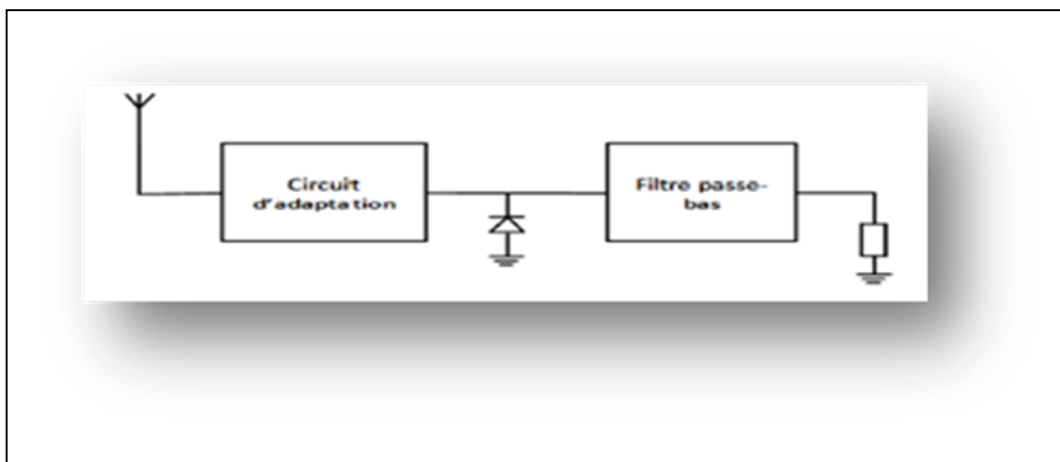


Figure II. 21 Redresseur mono-diode, topologie parallèle.

### II.3.3.1.4.3 Topologie en doubleur de tension

La topologie doubleur de tension est une association de deux topologies série et parallèle afin de produire une plus forte tension DC en sortie de la Rectenna. Ce type de circuits permet, dans le cas de forts signaux, le redressement des deux alternances et par conséquent la tension récupérée est plus élevée que les topologies simples diode (typiquement 2.5 V pour une puissance de 10 dBm à l'entrée du convertisseur RF-DC et une charge de 1 K $\Omega$ ). [28]

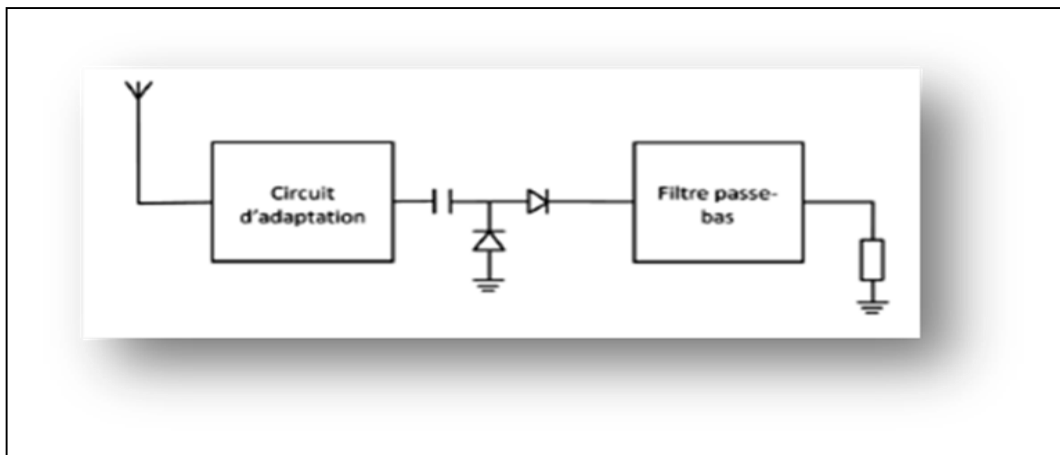


Figure II. 22 Redresseur multi-diode topologie en doubleur de tension.

### II.3.3.1.4.4 Multiplieur de tension

Le multiplieur est réalisé en cascadant deux doubleurs de tensions. La topologie du Multiplieur est donnée par la figure suivante. [28]

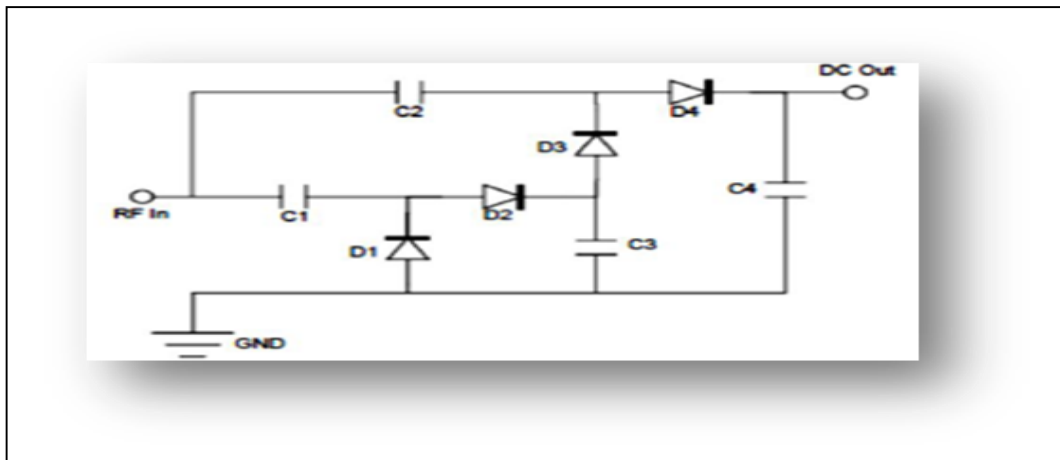


Figure II. 23 Redresseur multi-diodes topologie du multiplieur de tension.

### II.3.3.1.4.5 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.25), 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. [28]

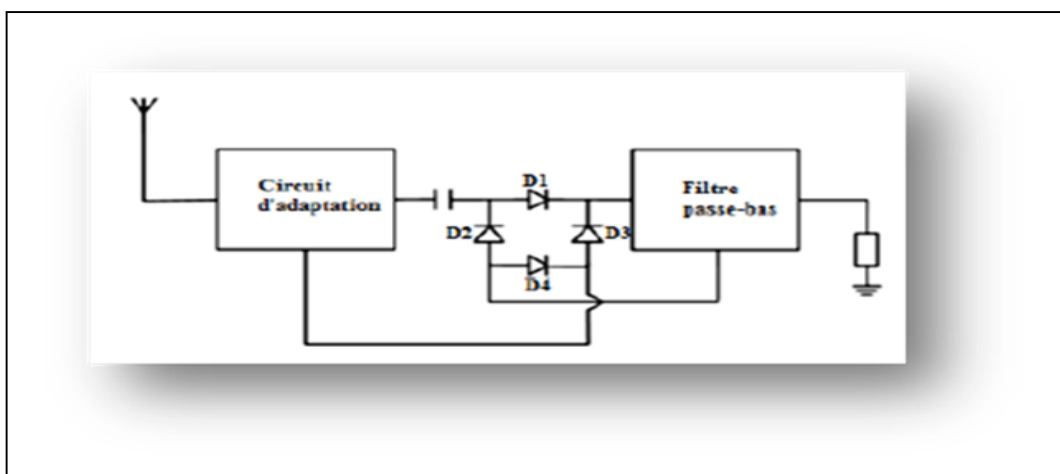
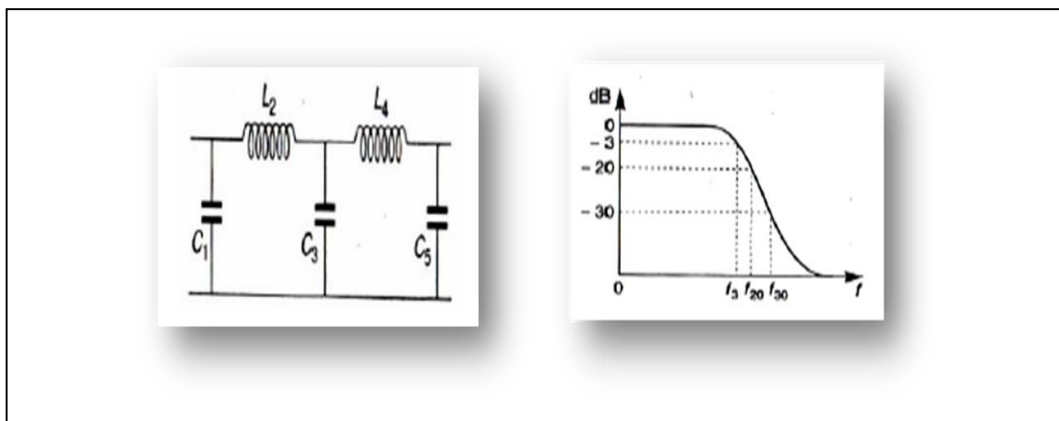


Figure II. 24 Topologie pont de diode.

**II.3.3.1.5 Filtre de sortie DC**

Le filtre de sortie DC est un filtre passe bas qui est composé le plus souvent d'un bloc capacité parallèle. Le rôle de ce filtre est d'isoler la charge DC du côté RF. Il laisse passer la composante continue et filtre toutes les harmoniques d'ordre supérieur, y compris la composante fondamentale. [29]

Un filtre passe-bas d'une manière générale transmet les signaux basses fréquences et rejette les signaux des fréquences supérieures à la fréquence de coupure ( $f_c$ ) du filtre (figure II.26).



**Figure II. 25** Courbe d'un filtre passe-bas (A) Circuit équivalent d'un filtre passe-bas(B)

Le schéma de la (figure II.26) représente le modèle d'un filtre passe-bas. Aux fréquences basses, les inductances séries présentent des impédances faibles tandis que les capacités en parallèle ont des impédances élevées ; ce filtre est donc transparent. Aux fréquences élevées, c'est le contraire : les inductances provoquent donc une réjection partielle des signaux appliqués tandis que les capacités court-circuitent le reste.

**II.3.3.1.6 La charge résistive**

La charge est également assujettie à certaines contraintes :

- Etre variable (trimmer ou potentiomètre) pour permettre d'étudier l'influence de cette dernière, au même titre que celle de la fréquence d'entrée.
- Permettre de parcourir une plage de valeurs de l'ordre de quelques centaines d'Ohms.

- Supporter quelques centaines de mW par souci de sécurité et de prévision : les puissances mises en jeu peuvent être amenées à augmenter, en particulier si l'on constitue un tableau de rectennas.
- Garder un prix raisonnable et un package confortable [30].

#### **II.4 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté généralement les matériaux intelligents nous avons donné une brève définition et les différents types de ces matériaux et leurs applications dans des différents domaines, et présenté la récupération de l'énergie RF et le principe de fonctionnement, ainsi les différentes topologies de rectenna.

# **Chapitre III**

## **Modélisation et simulation d'un système Transmission l'énergie**



### III.1 Introduction

L'utilisation toujours croissante d'appareils sans fil, tels que les téléphones portables, l'informatique sans fil et la télédétection, a entraîné une augmentation de la demande et de la dépendance à l'utilisation de batteries. Les semi-conducteurs et d'autres technologies s'efforçant continuellement d'obtenir des puissances de fonctionnement plus faibles, les batteries pourraient être remplacées par des sources alternatives, telles que les générateurs d'énergie à courant continu (DC) utilisant des techniques de récupération d'énergie.

La récupération d'énergie par radiofréquence (RF), également appelée récupération d'énergie RF, a été proposée et étudiée dans les années 1950 à l'aide de sources de micro-ondes à haute puissance, comme une preuve de concept plutôt qu'une source d'énergie pratique, en raison des technologies disponibles. à l'époque. Cependant, avec les progrès modernes dans les appareils à faible puissance, la situation a changé, la technique étant une alternative viable aux batteries dans certaines applications. En particulier, pour les appareils sans fil situés dans des environnements sensibles ou difficiles d'accès où l'équipement fonctionnant sur batterie n'aurait peut-être pas été possible auparavant [31]

Dans ce chapitre, nous avons produit d'énergie à travers le panneau solaire et l'avons envoyé pour être capté à travers l'antenne pour être converti et devenir une énergie utile et exploitable par (circuit électronique, microprocesseur...).

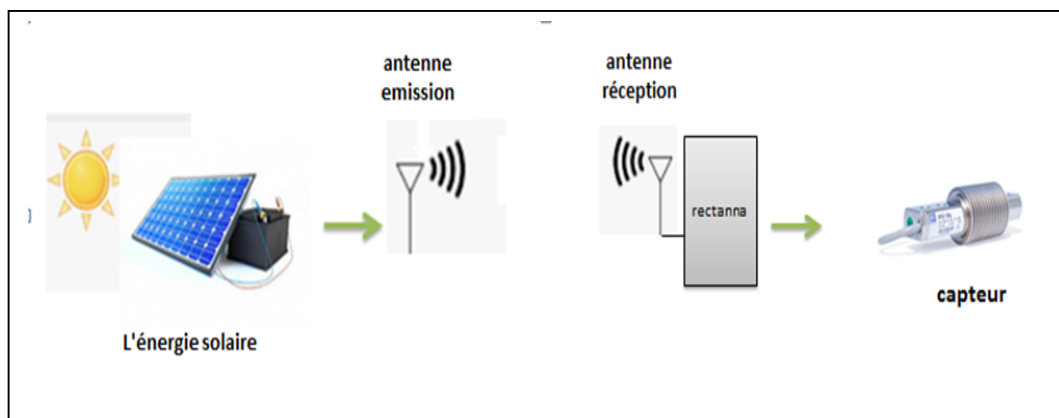


Figure III. 26 Transmission l'énergie solaire par radio fréquence.

### III.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance Shunt ( $R_{sh}$ ). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique  $I=f(V)$  :

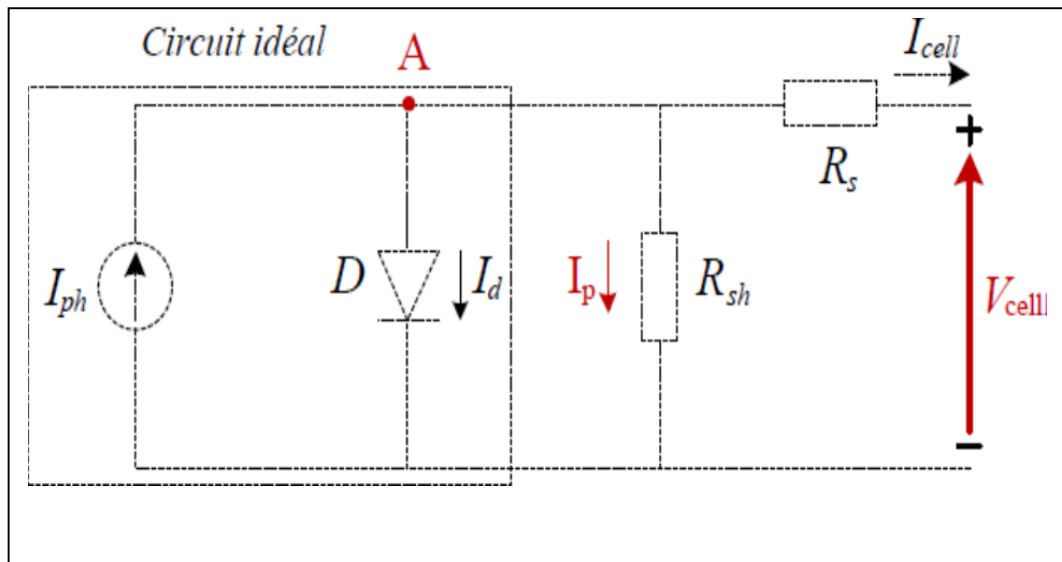


Figure III. 27 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, Une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt)

Pour les pertes

-L'étude physique d'une photopile nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \quad (1)$$

Avec :

$I_{cell}$  : Courant délivré par la photopile.

$I_{ph}$  : Photo courant.

$I_d$  : Courant de la diode.

$I_{Rsh}$  : Courant shunt

### III.2.1 Le photo-courant

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est

Légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

Avec :

$$I_{ph} = [I_{cc} + k_i(T - T_{ref})] * \frac{G}{G_{ref}} \quad (2)$$

$I_{cc}$  [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

$k_i$  = [A/k] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

T [K] : Température ambiante.

G [W/m<sup>2</sup>] : Irradiation sur la surface de la cellule.

$T_{ref}$  = [K] : Température de référence (298 K)

$G_{ref}$  [W/ m<sup>2</sup>] : Irradiation de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

### III.2.2 Le courant de saturation I<sub>0</sub>

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \exp\left[\frac{qEg}{Ak} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (3)$$

Avec :

$Eg$  [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

### III. 2.3 Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\text{Exp}\left(\frac{qV_{oc}}{KAT}\right) - 1} \quad (4)$$

Où :

$V_{oc}$  [v] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

$q$  [°C] : Charge de l'électron ( $1.602 \cdot 10^{-19}$  °c).

$N_s$  : Nombre de cellules connectées en série.

$A$  : Constante d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 2$ ).

$K$  [J/K] : Constante de Boltzmann ( $1.3805 \cdot 10^{-23}$  J/K).

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une Cellule :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{N_s A K T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (5)$$

### III.2.4 Le courant du panneau

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un

Module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base

Du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_o \left[ \exp\left(\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{N_s A K T}\right) - 1 \right] - N_p \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (6)$$

Où :

$N_s$  : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

$N_p$  : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

### III.3 Résultats de simulation

Les caractéristiques électriques de cellule sont données dans le tableau suivant :

Table 1 : Caractéristique électrique de la cellule.

Eclairement standard	G=1000 W/m <sup>2</sup>
Temperature standard	T=25°C
Courant de court-circuit	I <sub>cc</sub> =0.59 A
Tension a circuit ouvert	V=21.5V

### III.3.1 Caractéristiques I(V) et P(V)

Les résultats obtenus de la simulation (programmation en utilisant le logiciel MATLAB) d'un Caractéristiques courant –tension I(V) et puissance -tension P(V) de la cellule photovoltaïque Dans les conditions standards ( $T=25^{\circ}\text{c}$ ,  $E=1000\text{ W/m}^2$ ) sont représentés dans les figures (III.29) Et (III.30) :

La figure (III.29) représente la caractéristique courant – tension d'une cellule solaire dans les conditions de  $E=1000\text{ W/m}^2$  et  $T=25^{\circ}\text{c}$ . Le courant de court-circuit est égal 0.59A et la Tension de circuit ouvert est 21.5 v.

On observe que la caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement.

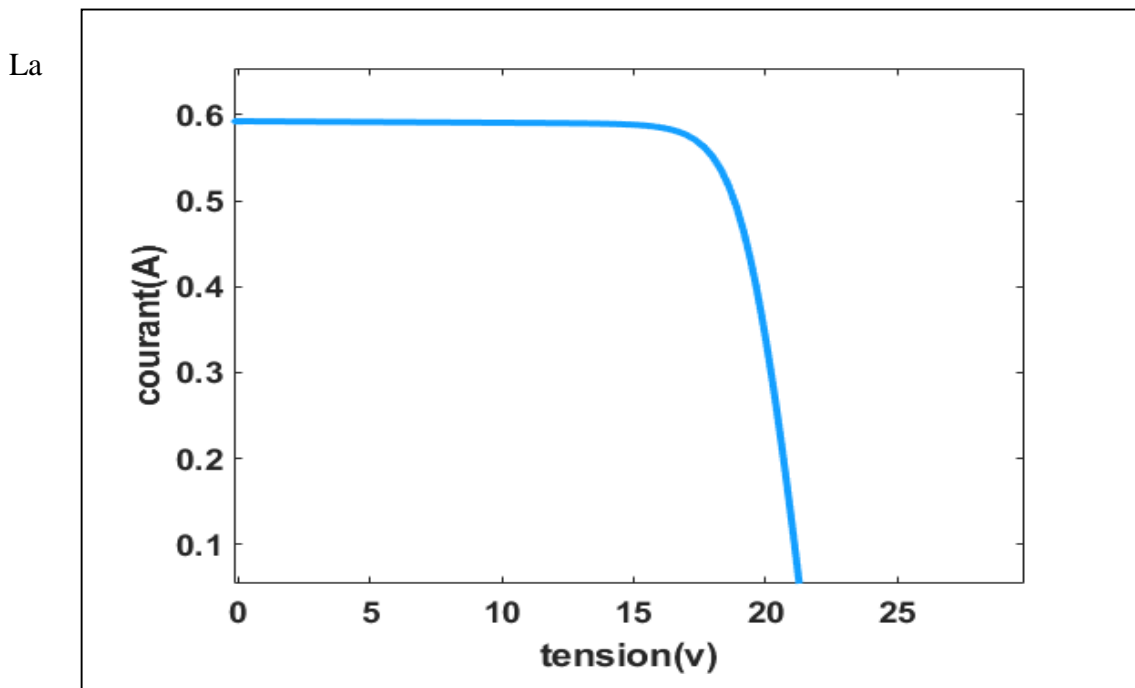


Figure III. 28 Caractéristique courant – tension.

figure (III.30) représente la caractéristique puissance – tension d'une cellule solaire dans les Conditions de  $E=1000\text{ W/m}^2$  et  $T=25^{\circ}\text{c}$ . La puissance maximale est  $P_{\text{max}}=9.8\text{W}$ . On Remarque que, quand la tension augmente la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur

Optimale ( $P_{max}$ ) ensuite elle décroît.

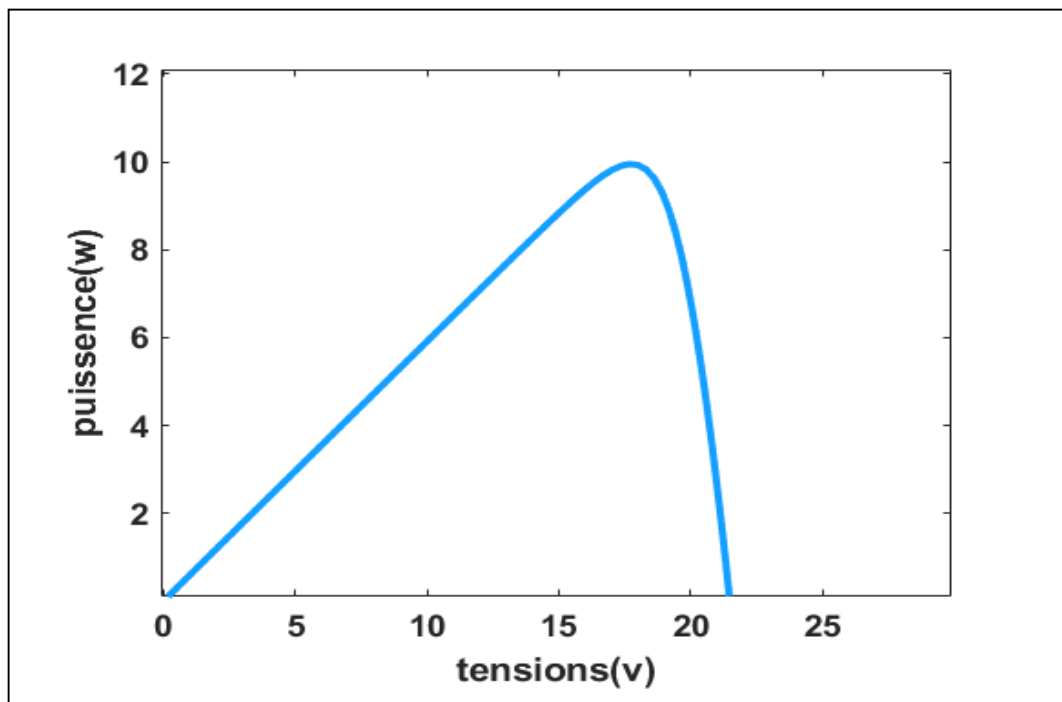


Figure III. 29 Caractéristique puissance – tension.

#### III.4 Modélisation du système de récupération d'énergie RF

Le module de récupération d'énergie se compose généralement d'une antenne et d'un circuit de conversion RF/DC, l'ensemble étant communément appelé "Rectenna" pour la contraction des mots anglais "rectifier" et "antenne" (Figure III.31).

L'énergie électromagnétique rayonnée par l'antenne d'émission est captée par l'antenne de réception puis transmise au circuit de conversion sous forme d'une tension sinusoïdale haute fréquence. La mise en forme du signal électrique issu de l'élément rayonnant implique un effort particulier au niveau du transfert d'énergie. En effet, le fonctionnement en hautes fréquences, jusqu'à quelques Giga Hertz, nécessite la mise en place d'un circuit spécifique d'adaptation d'impédance avec l'antenne. Finalement la puissance disponible en sortie est utilisée directement

Pour alimenter un circuit électronique ou alors accumulée dans un élément de stockage jusqu'à son utilisation.

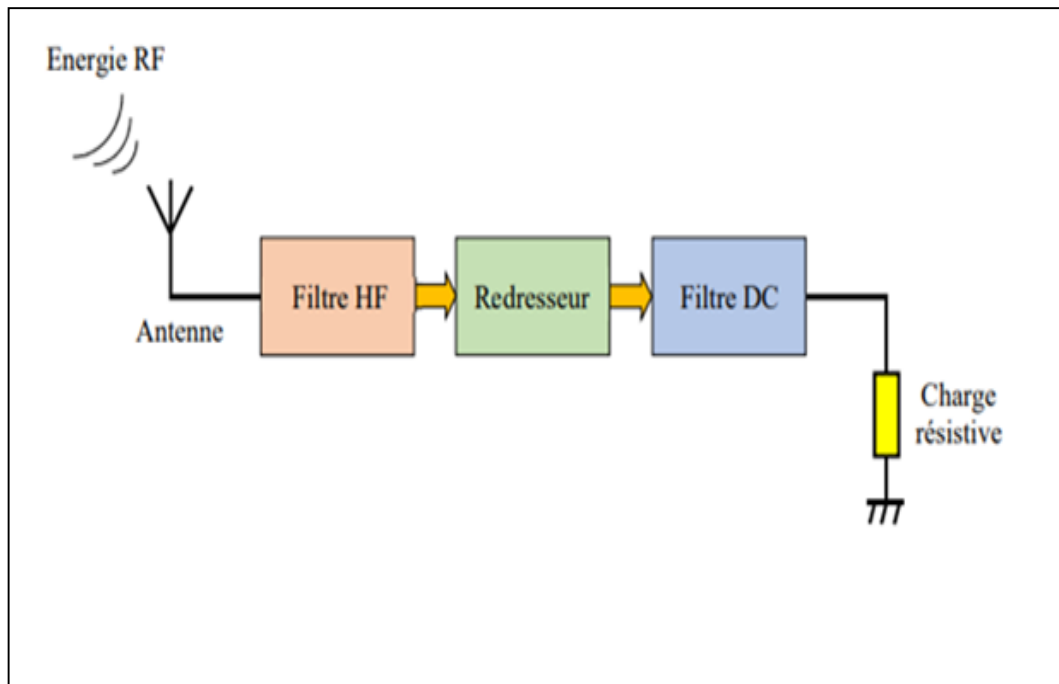


Figure III. 30 Schéma bloc d'une rectenne.

#### III.4.1 Antenne

L'antenne est un élément essentiel de tout système de communication sans fil. De même pour une énergie efficace récolte rectenna, une antenne de réception efficace est une exigence majeure. Cette antenne doit être capable de convertir facilement les ondes AC reçues en tension de sortie DC qui alimentera le reste système de circuit intégré.

L'efficacité de l'antenne est un autre paramètre important qui concerne directement à la fréquence de fonctionnement. L'antenne conçue devrait capter davantage en termes de bande passante pour plus d'efficacité. En principe, on sait que la puissance récoltée à partir des signaux RF est juste suffisante pour alimenter dispositifs microélectroniques petits et limités. Cependant, pour avoir plus de puissance reçue pour les grands circuits, la conception de l'antenne de réception doit suivre un modèle de réseau. Ainsi la puissance reçue augmentera considérablement.

De plus, les éléments correspondants seront augmentés pour les conceptions de tableaux. Par conséquent, dans la plupart des cas, le moyen le plus simple observé dans la littérature consiste à utiliser le micro ruban de base des antennes patch intégrées avec des éléments redresseurs sur la même carte de circuit imprimé [32]. La figure (III.32) montre le modèle

électrique équivalent d'une antenne avec une source de tension alternative avec impédance série. L'amplitude de la source de tension alternative dépend de la puissance et l'impédance réelle. La puissance moyenne reçue dépend de la puissance densité ( $S$ ) et la surface effective de l'antenne.

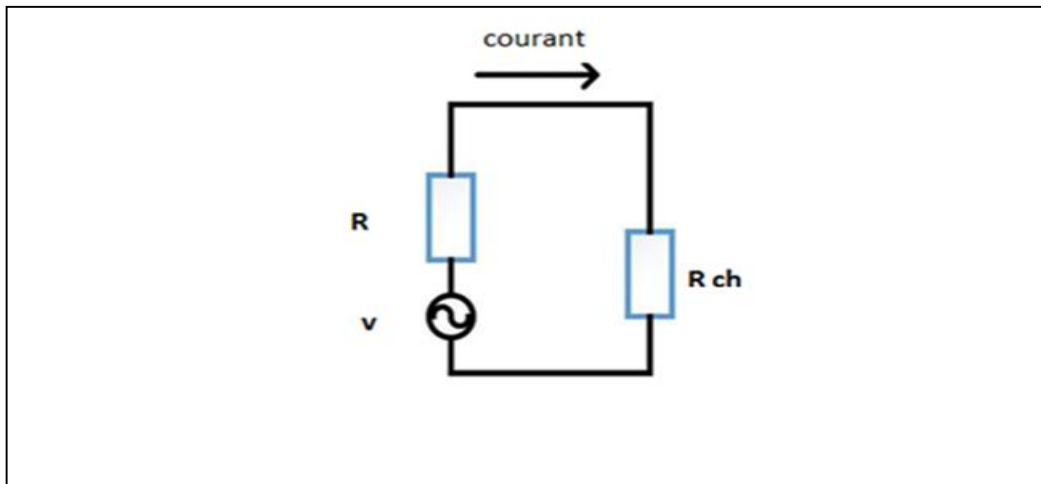


Figure III. 31 Circuit équivalent d'antenne

#### III.4.1.1 Différents types d'antennes

##### ❖ Antennes Filaires

Les antennes filaires utilisent des éléments rayonnant constituées par un fil ou un, réseau de fils métalliques. Elles sont très simples à réaliser et à faible coût

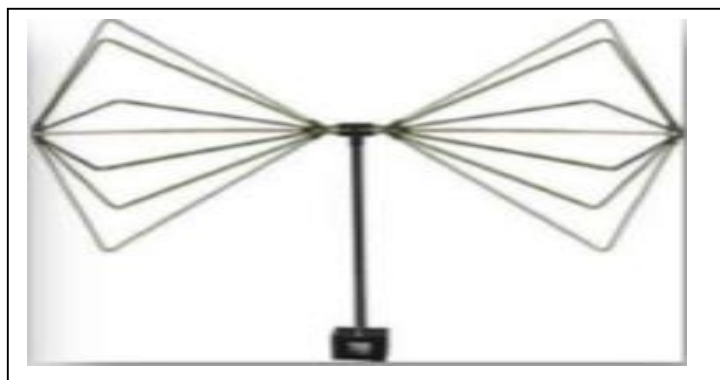
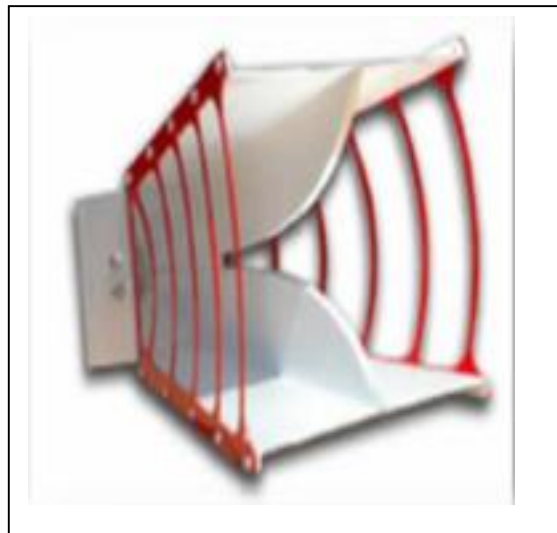


Figure III. 32 antennes filaire



**❖ Antennes volumiques :**

Les antennes volumiques (3D) correspondent à un autre type d'antenne où la structure de l'élément rayonnant est répartie en trois dimensions à l'instar des antennes cornets ou paraboliques. Les dimensions de ces éléments jouent un rôle très important sur leurs caractéristiques (gain, directivité, largeur de bande). Ces dernières années, nous constatons un intérêt de plus en plus marqué pour ce type d'antenne. Plusieurs nouvelles antennes 3D ont été développées telles que l'antenne bouton



**Figure III. 33** Antenne cornet

**III.4.2 Circuit d'adaptation :**

Les circuits d'adaptation jouent un rôle important dans deux éléments ou plus des systèmes qui sont destinés à être intégrés. Pour la récupération d'énergie RF,

La puissance RF maximale est transférée de la source à la charge en utilisant un circuit d'adaptation d'impédance d'entrée. Étant donné que l'impédance d'entrée du redresseur est

différente de la source RF, l'adaptation d'impédance est nécessaire en cas de transfert de puissance maximale.

### III.4.3 Circuit redresseur

Le circuit redresseur est un circuit qui redresse la tension alternative en tension continue. En d'autres termes, le redresseur est un appareil électrique composé d'une ou plusieurs diodes qui convertit le courant alternatif (AC) en courant continu (DC) comme le montre la figure (III.35). Une diode est comme une valve unidirectionnelle qui permet à un courant électrique de circuler dans une seule direction. Ce processus est appelé rectification [33].

Le redressement produit un type de courant continu qui englobe des tensions et des courants actifs, qui sont ensuite ajustés en un type de courant continu à tension constante, bien que cela varie en fonction de l'utilisation finale du courant. Le courant est autorisé à circuler sans interruption dans une direction, et aucun courant n'est autorisé à circuler dans la direction opposée [34].

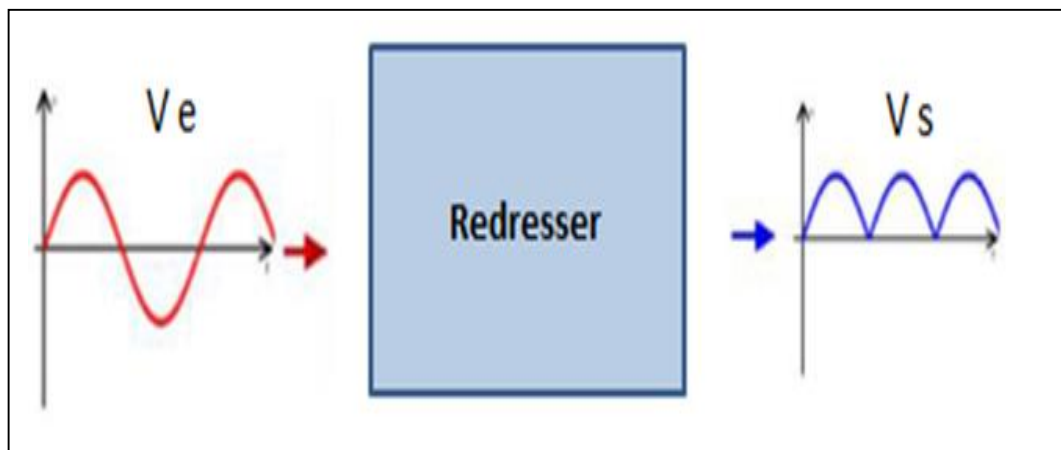


Figure III. 34 redresseur.[43]

### III.5 Résultats de simulation

Dans le modèle, nous nous sommes appuyés sur l'énergie de trois cellules photovoltaïques, où nous avons complété un modèle pour simuler la transmission d'énergie obtenue via des fréquences radio sur une distance d'environ 1,5 mètre, comme indiqué sur la figure correspondante :

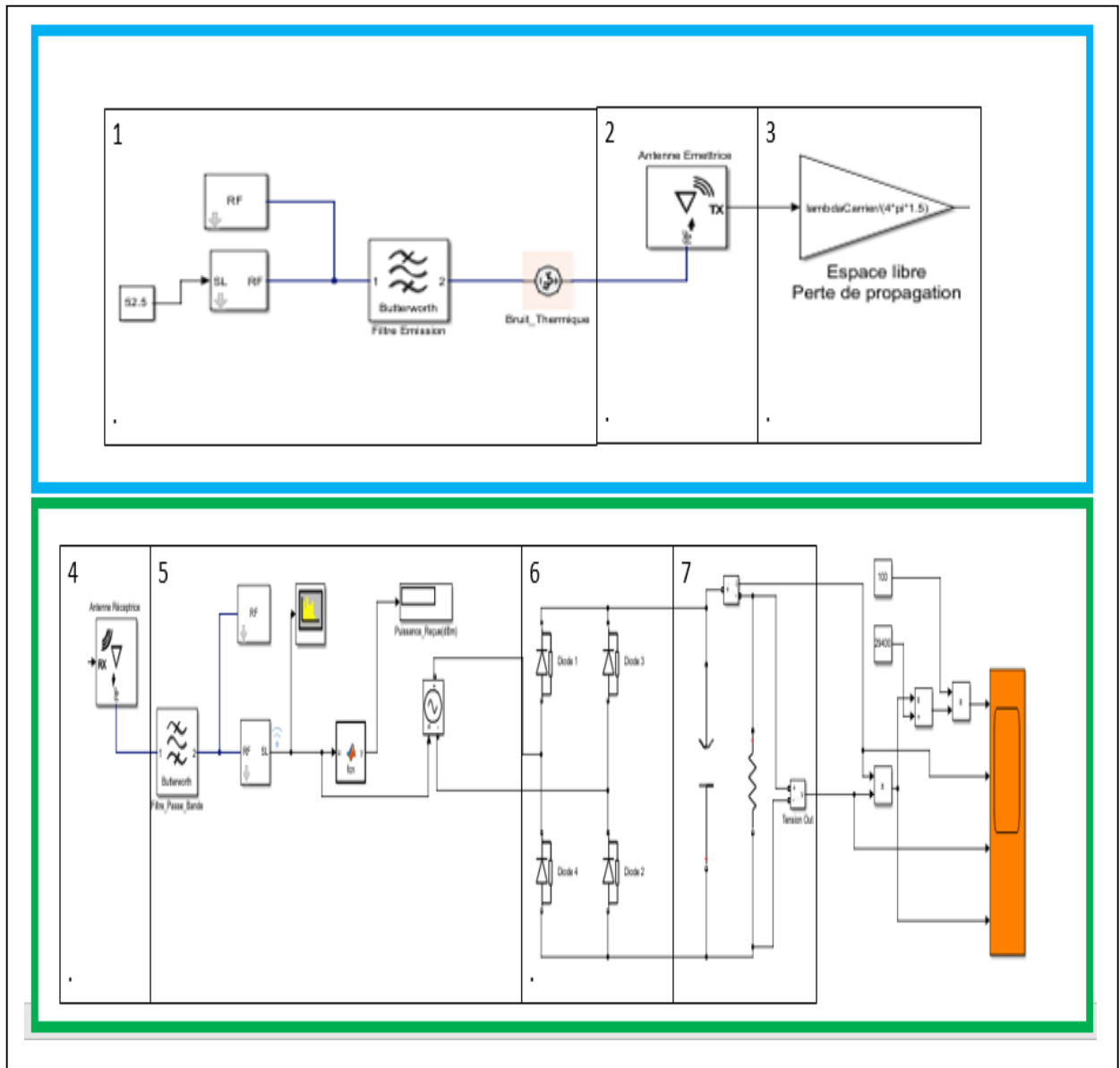


Figure III. 35 Transmission l'énergie par radio fréquence.

1 : Convertir le signal à envoyer en un signal RF et le filtrer en ondes de taille égale.

2,3,4 : Envoi et réception d'un signal RF propagé dans l'espace libre

5 : Filtrage et conversion du signal reçu de l'antenne

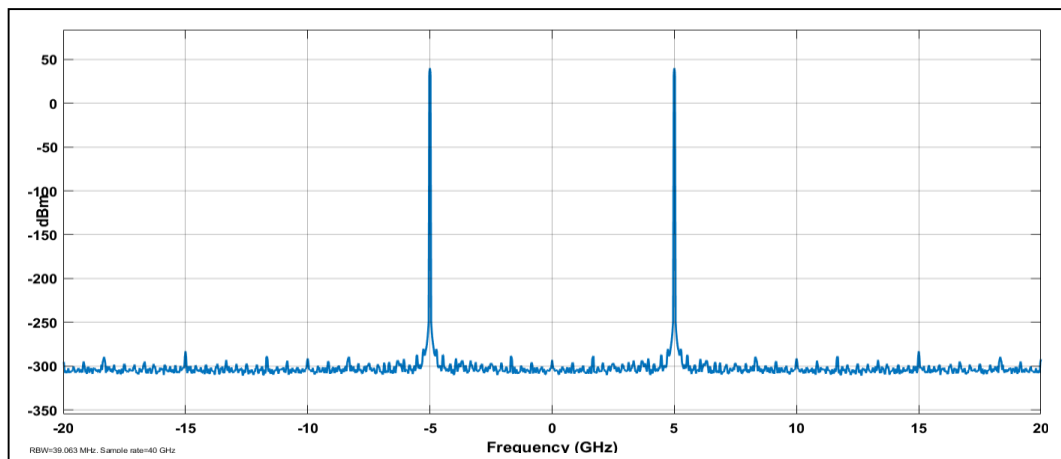
6 : redresse la tension alternative en tension continue.

7 : laisse passer la composante continue et filtre toutes les harmoniques d'ordre supérieur et charge résistive .

Dans cette étape, nous allons présenter caractéristique de la simulation :

**Table III.2** Caractéristique de la simulation.

La fréquence	5 (GH)
La puissance	29.4 (w)
La distance	1.5(m)
Tension	V=52.5(V)



**Figure III. 36** Puissance reçue mesurée en fonction de la fréquence

Nous avons appliqué des simulations, les résultats de cette simulation montrant le courant et la tension corrigés et l'énergie fournie.

Lors de simulations pour observer l'effet de R sur la tension, le courant et la puissance, nous avons donné différentes valeurs de R de 2 à 15, nous avons obtenu les résultats suivants :

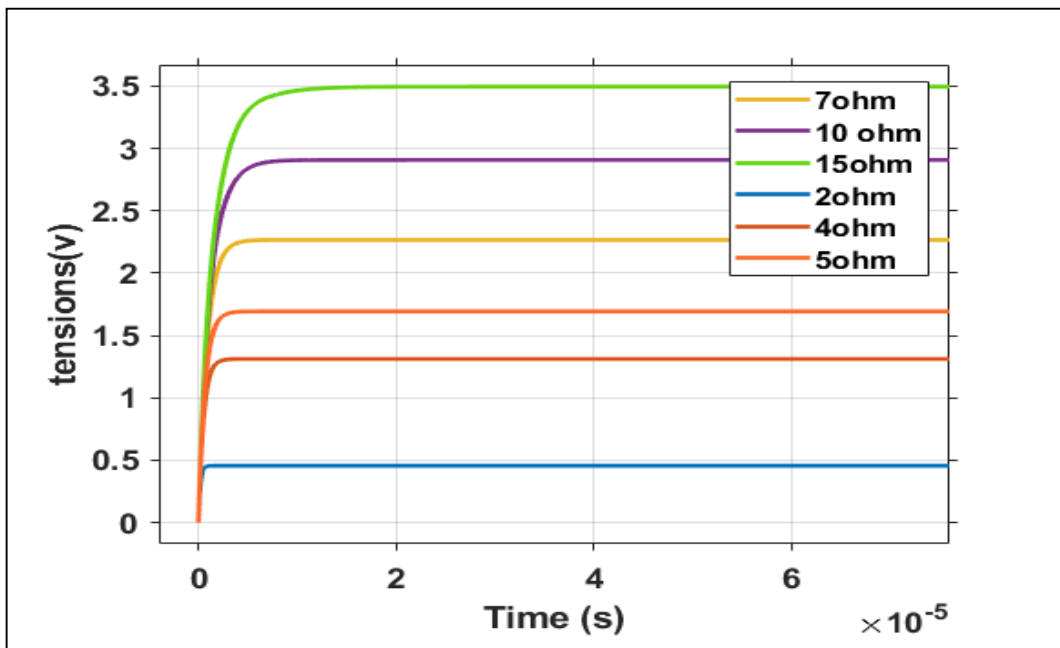


Figure III. 37 montre les tracés la tensions pour différentes valeurs de R.

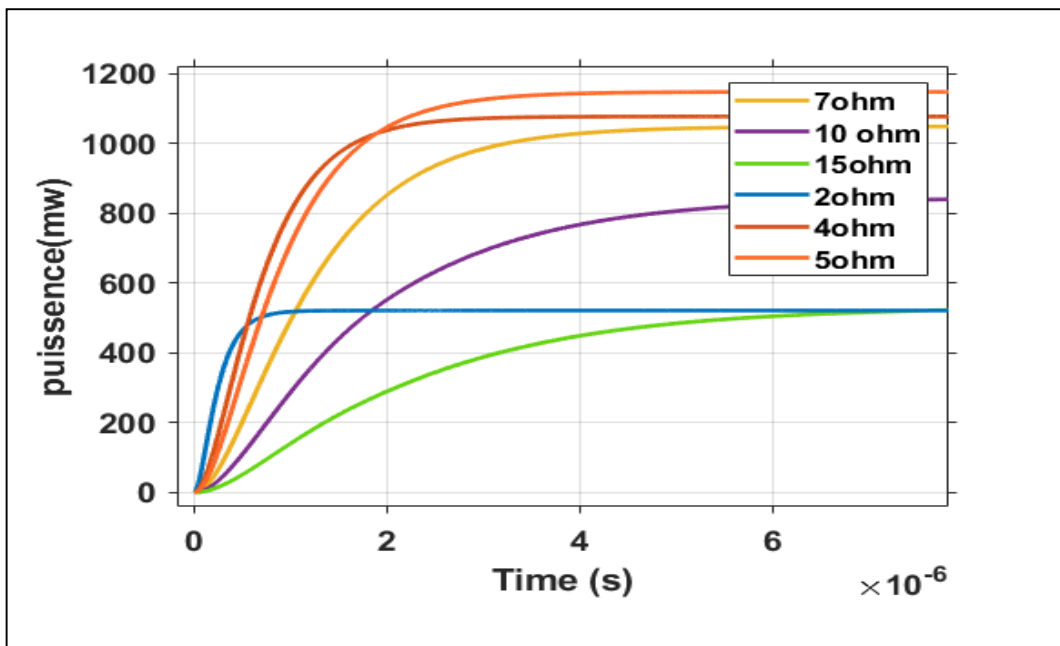


Figure III. 38 montre les tracés la puissance pour différentes valeurs de R.

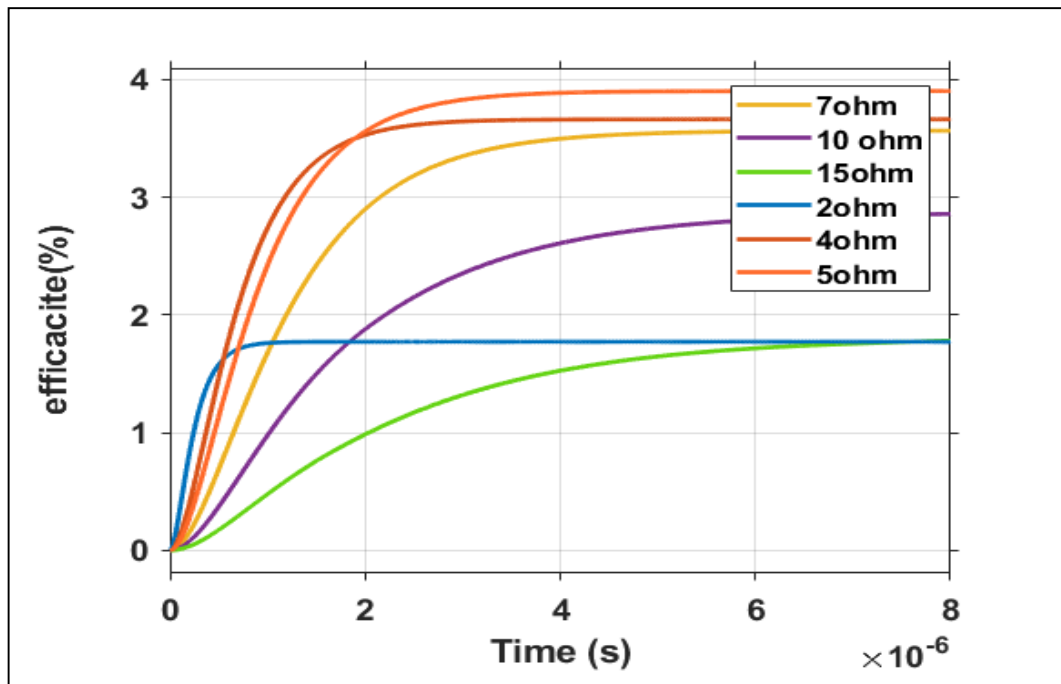


Figure III. 39 montre les tracés les efficacité pour différentes valeurs de R.

**III.5.1 la puissance, la tension et les efficacités en fonction de la charge :**

Montre la représentation tabulaire des résultats de simulation obtenu à partir de l'état d'équilibre des réponses transitoires de Figure, tandis que ses diagrammes diffusés XY sont présentés ci-dessous :

Table III.3 résume des résultats de la simulation

RL	Tension sortie (V)	Puissance RF moyenne entrée (W)	Puissance moyenne sortie (MW)	Efficacité (%)
2Ω	0.45	29.4	521	1.77
4Ω	1.31		1077	3.88
5 Ω	1.69		1147	3.98
7Ω	2.28		1048	3.58
10Ω	2.90		845	2.77
12.5Ω	3.24		672	2.28
15Ω	3.50		542	1.84

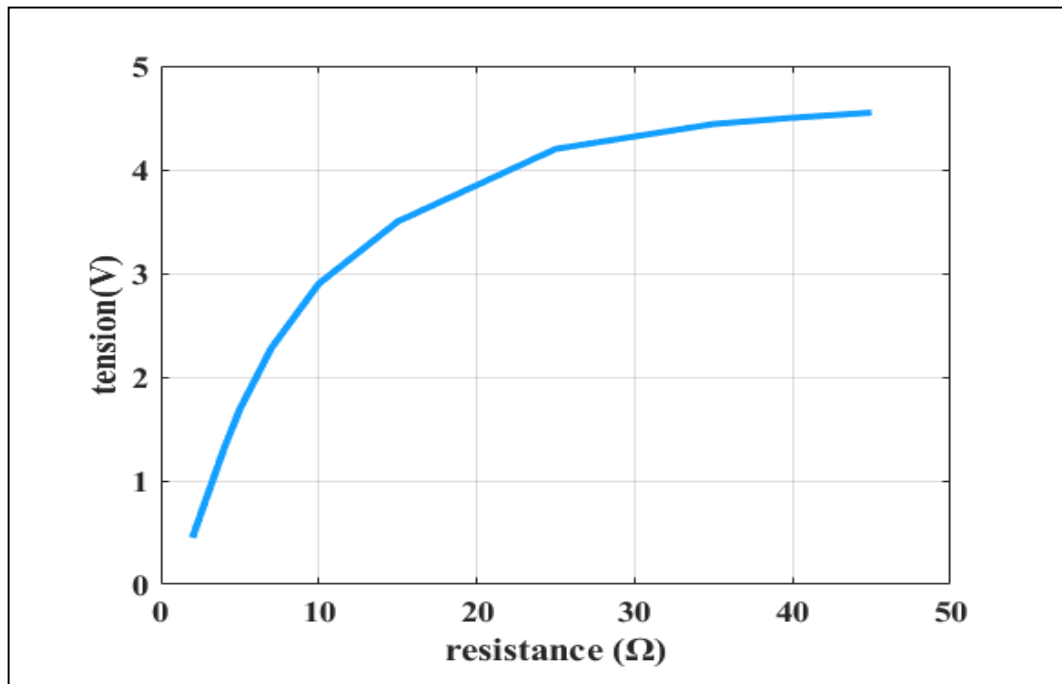
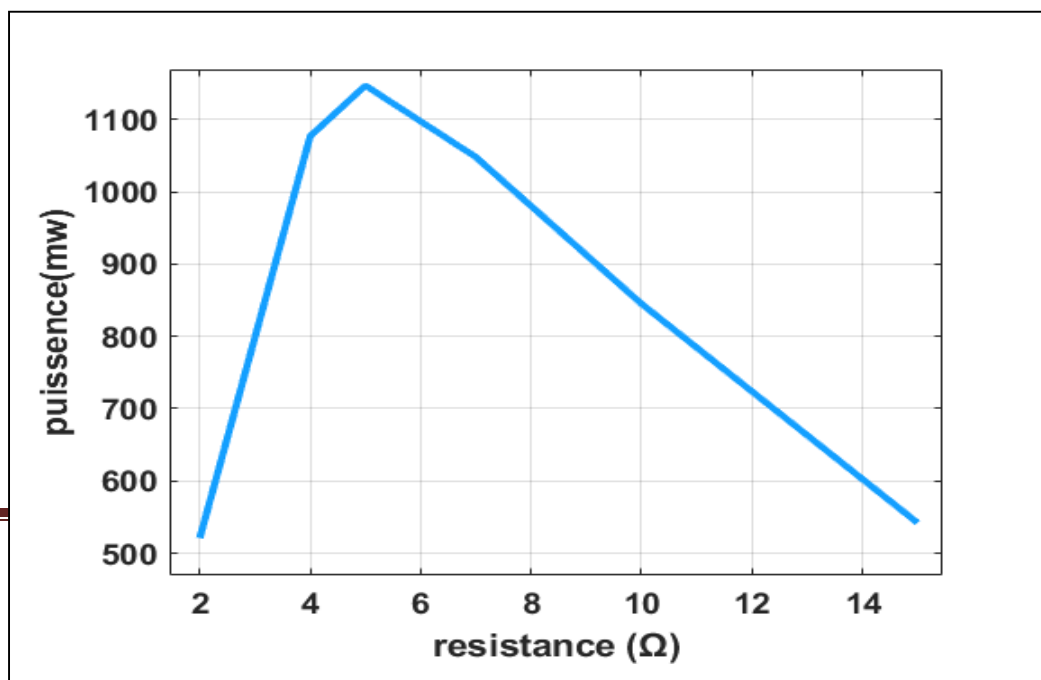
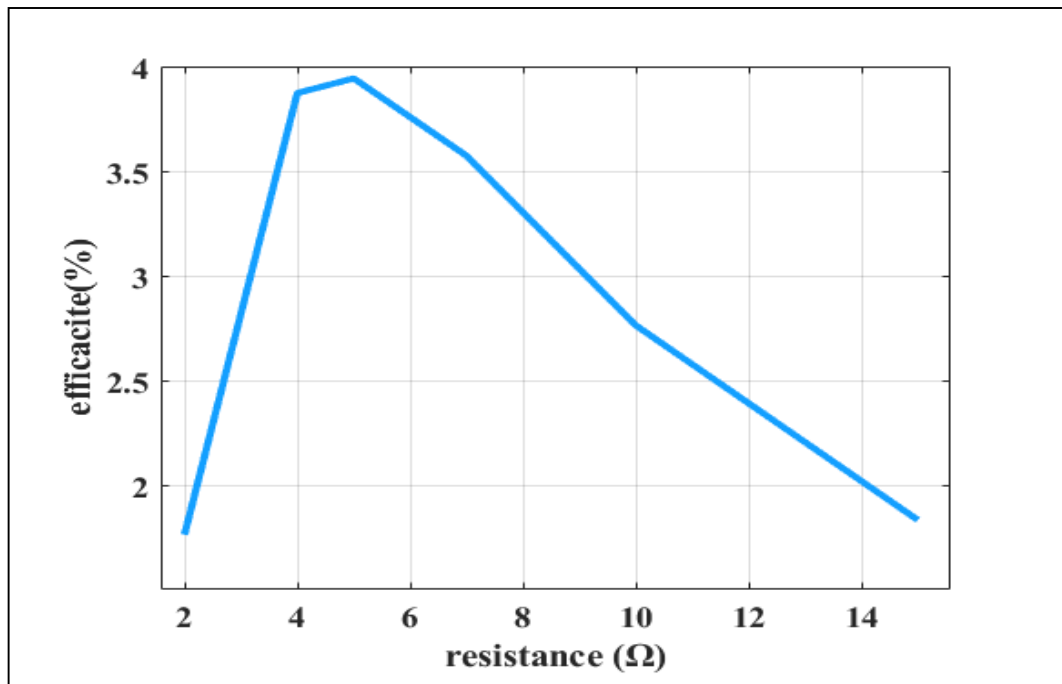


Figure III. 40 Tension de sortie DC par rapport à la résistance de charge.

### Commentaire

La figure (III.40) correspondante représente le diagramme de tension de sortie DC en termes de différentes valeurs de la résistance de charge, où les résultats de la simulation ont montré que la tension de sortie augmente avec l'augmentation de la résistance R



**Figure III. 41** Puissance de charge moyenne par rapport à la résistance de charge.**Figure III. 42** Efficacité de conversion de puissance par rapport à la résistance de charge.

### Commentaire

La figure (III.42). (III.41) représente le schéma de simulation de puissance et l'efficacité, où les graphiques montrent les valeurs de puissance et d'efficacité changeant en modifiant les valeurs de la résistance de charge  $R$ . Les valeurs de crête apparaissent lorsque ( $R = 5$ ) où le maximum transfert de puissance de la source de radiofréquence à la charge. L'efficacité maximale du système de récupération d'énergie actuel est d'environ 3.9 V, mais elle peut être inférieure à cette valeur dans des scénarios pratiques où des pertes d'énergie se produisent en raison d'inductances, de condensateurs et de diodes.



**III.6 Conclusion**

Dans notre travail, nous avons passé en revue l'un des ouvrages modernes les plus importants dans le domaine de la transmission d'énergie. Ce chapitre nous a permis de parler plus en détail du système

Au début de ce chapitre, nous avons présenté les différentes structures de transfert d'énergie, puis créé la modélisation et la simulation qui nous ont permis de voir les résultats expérimentaux.

Où nous comptons dans le système sur l'extraction de l'énergie des panneaux solaires et sa conversion en un signal électromagnétique à envoyer via l'antenne émettrice pour être récolté via l'antenne réceptrice et converti en énergie capable d'alimenter des capteurs à faible énergie.

**CONCLUSION**

**GENERALE**

---

## CONCLUSION GENERALE

Nous sommes fixés comme objectif dans ce travail de transmettre de l'énergie sans fil vers des endroits difficiles difficilement approvisionnés en énergie électrique, notre idée était donc de récupérer l'énergie d'une source renouvelable représentée par l'énergie solaire et de la transférer via des radiofréquences vers ces endroits.

Dans un premier temps, nous avons évoqué les différentes énergies renouvelables car elles sont l'alternative appropriée pour atteindre cet objectif, puisqu'une étude a été présentée à leur sujet, mentionnant notamment les inconvénients et avantages de chacune d'entre elles, telles que (l'énergie nucléaire, l'énergie éolienne.... Et autres) en mettant l'accent sur l'énergie solaire.

Comme pour le deuxième chapitre de cette mémoire, les différents types de matériaux intelligents ont été étudiés, avec leurs applications et différents domaines d'utilisation mentionnés. Faisons le prochain système de récupération d'énergie via les ondes radiofréquences En commençant par la description et l'explication de (rectanna) et les éléments de base de la collecte d'énergie La convertir en énergie électrique utilisable

Dans le troisième chapitre de cette mémoire, un modèle et des simulations du système proposé ont été créés, ainsi que les résultats et les différentes courbes qui ont permis d'étudier et de tester un système complet d'extraction et de transmission d'énergie.

Enfin, cette mémoire a permis d'exploiter les différentes sources d'énergies renouvelables et de les acheminer dans des endroits reculés et difficiles grâce aux radio fréquences.

---

# Bibliographie

- [1] <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>
- [2] Belaouni Hamid, «simulation des systèmes hybrides de production d'énergie renouvelable », mémoire de master, de l'université de Dr.taher Moulay, Saida, algérie
- [3] Bounaceur Amin, “étude et conception d'un système hybride de production d'énergie”, memoire de master, université kasdi.merbah, ouragla, algérie
- [4] MELLOUL, A: Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne. Mémoire de magister, Université de Sétif, 2011
- [5]. Poitiers, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, thèse de doctorat soutenue à l'université de Nantes, France, 2003, page 14, 15.
- [6] Hydro power, Alternative Energy News, 2010, [réf de janvier 2013], disponible sur:<http://www.alternative-energy-news.info/technology/hydro/>
- [7] Renewables 2014. Global Status Report, op. cit., p. 15..
- [8] Fellah Boumediene, «Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah» Thèse de Magister, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, Décembre 2012.
- [9] ZERROUKI.Z et BEREKSI REGUIG.R, 2017, « Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome », mémoire de Master, UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN, P1.
- [10] [Kadri.I, 2018, « Etude, conception et Réalisation d'un suiveur de soleil », mémoire de Master 2, Université de Abou-Bekr Belkaid Tlemcen,
- [11] Bensaci.W ,2012 « modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de Master 2, université Kasdi-Merbah– Ouargla
- [12].Mémoire Magistère : par Samir Chetouh, mai 2010:Caracterisation mécanique des matériaux intelligents de type magnétostrictifs et leur application
- [13] [.https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Alliage\\_à\\_mémoire\\_de\\_forme](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Alliage_à_mémoire_de_forme)

- 
- [14] Abdelkader BENABOU, thèse Doctorat : « contribution à la caractérisation et à la modélisation des matériaux magnétiques en vue d'une implantation un code de calcul de champ », Université de LILLE I, Décembre 2002.
- [15] . <http://www.science-explorer.de/astronomie/astro.htm>. (25 avril 2008).
- [16] F. Clae y ssen, R. L. Letty, N. Lhermet, F. Barillot, H. Fabbro et T. Maillard, « Actionneurs piézoélectriques pour du positionnement précis et rapide, dans 2 e colloque sur les matériaux électro actif et leurs applications en génie électrique (MAGELEC) », pp. 157-162, Toulouse, 2001
- [17]. [http://www.mhvi.org/owners\\_manual/proced\\_angio\\_b.asp](http://www.mhvi.org/owners_manual/proced_angio_b.asp). (25 avril 2009).
- [18] Samir Chetouh .Mémoire Magistère :Caracterisation mécanique des matériaux intelligents de type magnétostrictifs et les application , mai 2010
- [19] B. Clephas, Adaptronics and smart structures, Hartmut Janocha editor, Springer-Verlag, chap. 6.2: piezoelectric actuator, 1999.
- [20] B. Nogarède, Machines tournantes, principe et constitution, Techniques de l'ingénieur, vol. D3411, 2001.
- [21] J. Salenson, « Motorisations piézoélectriques à fonctionnement quasi-résonant ou quasistatique : analyse des contraintes d'alimentation et expérimentation de structures innovantes, Thèse de doctorat », INP Toulouse, 2000
- [22] Simon M., Kaplow R. et Freiman D., «A vena cava filter using thermal shape memory alloy», Experimental aspects, Radiology, 125, 87-94, 1977.
- [23] Ines Kharrat. Modélisation et réalisation d'un système de récupération d'énergie imprimé : caractérisation hyperfréquence des matériaux papiers utilisés. Optique photonique. Université Grenoble Alpes, 2014. Français. .page 33
- [24] «Electronic and mechanical improvement of the receiving terminal of a free-space microwave power transmission system », Raytheon Company, Wayland, MA, Tech. Rep. PT-4964, NASA Rep. CR-135 194, Aug. 1977.
- [25] : Paul F. Combes, "Micro-ondes tome II circuits passifs, propagation, antennes," Dunod, Paris, 2-10-002753-0, 1997
- [26] ziedsaddi. conception d'un dispositif de récupération d'énergie mixte vibratoire-électromagnétique pour l'alimentation des dispositifs à faible consommation. électronique. université paris-est, 2016. français. <nnt : 2016pesc1065>. <tel-01543388>
- [27] Walid Haboubi. Développements de circuits Rectenna bi-polarisation, bi-bande pour la récupération et conversion d'énergie électromagnétique à faible niveau. Electronique. Université Paris-Est, 2014. Français.
- [28] A. Okba, "Conception et réalisation de Rectennas utilisées pour la récupération d'énergie électromagnétique pour l'alimentation de réseaux de capteurs sans fils," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Décembre 2017.
-

- 
- [29] H. Takhedmit, "Modélisation et conception de circuits de réception complexes pour la transmission d'énergie sans fil à 2.45 GHz," Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, 2010.
- [30] : Baptiste HORNECKER. « TRANSMISSION D'ENERGIE SANS FIL EN VUE D'APPLICATIONS SPATIALES ». école polytechnique federale de Lausanne Juillet 2011
- [31] Brown, W. Mims, J. Heenan, N. "An experimental microwave-powered helicopter" Raytheon Company, Burlington, MA, USA; 1965 IEEE International Record, vol. 13, part 5, pp.225-235
- [32] Elsheakh, Dalia. "Microwave Antennas for Energy Harvesting Applications." Microwave Systems and Applications, InTech, 2017
- [33] M. H. Rashid, POWER ELECTRONICS HANDBOOK, 3rd edition, Prentice Hall, 2011.
- [34] <http://www.techopedia.com/definition/681/rectifier>
- [35]. <https://l.facebook.com/l.php?u=https%3A%2F%2Fwww.batirama.com%2Famp%2Farticle%2F5856-les-energies-renouvelables-vont-plomber-le-budget-d-edf-en-2013>.
- [36] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Schema\\_eolienne.svg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Schema_eolienne.svg)
- [37] [https://sites.google.com/site/energielageothermie/bilan?fbclid=IwAR0I8sGg\\_82TMW43jW3nlyw2nNf5fW5AgKWE9KjmUOiOp9-BjVVvsQGI8N0](https://sites.google.com/site/energielageothermie/bilan?fbclid=IwAR0I8sGg_82TMW43jW3nlyw2nNf5fW5AgKWE9KjmUOiOp9-BjVVvsQGI8N0)
- [38] <https://www.pinterest.com/pin/180495897546274159/?fbclid=IwAR3RzdIezSDb5yAg09-kvbdIUyzdZM-jmw83TNpZi2tLRCkHSYf0V67pxo>
- [39] [https://bcltenergie.com/\\_home/2017/05/26/fonctionnement-dun-panneau](https://bcltenergie.com/_home/2017/05/26/fonctionnement-dun-panneau)
- [40] <https://metalblog.ctif.com/2022/06/20/alliages-memoiredeforme/>.
- [41] <https://www.cours-et-exercices.com/2012/10/les-materiaux-intelligents.html>
- [42] [https://www.devicemed.fr/dossiers/composants-oem/electriques\\_electroniques/un-capteur-de-position-sans-contact-au-service-du-traiteme](https://www.devicemed.fr/dossiers/composants-oem/electriques_electroniques/un-capteur-de-position-sans-contact-au-service-du-traiteme)
- [43] <https://www.efxkits.us/types-of-rectifiers-with-workings>.
-







