



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A.MIRA-BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique.

**Mémoire de fin d'étude**

En vue de l'obtention de diplôme de master en

ELECTROMECANIQUE

**Thème**

Electrification d'une charge par un système à Energie renouvelable

**Réalisé par :**

*BEKKA lamia*

*YAKOUBEN ghilas*

**Encadré par :**

Dr. BELHOUL talit

Dr. SERIR chafiaa

**Année Universitaire : 2023/2024**

## Remerciements

*Le grand merci s'adresse au bon dieu le tout-puissant, de nous avoir donné la force et la patience, et qui nous a guidé et éclairé notre chemin pour la réalisation de notre mémoire.*

*Au terme de l'élaboration de ce modeste travail, nous tenons à exprimer toute notre gratitude et nos vifs remerciements à :*

*Mme la promotrice Mme BELHOUL TALIT et Mme serir chafiaa , pour avoir voulu accepter d'encadrer ce travail, pour la confiance qu'elle nous a témoignée, sa disponibilité permanente et sa patience. Ainsi, nous mesurons pleinement ses conseils qu'elle n'a cessé de nous prodiguer.*

*Nous tenons à exprimer nos reconnaissances les plus sincères à tous ceux qui ont contribué*

*À l'élaboration de ce travail, en nous soutenant chacun à sa façon.*

*Nous remercions autant les amis (es) et les camards*

*« Grand merci à tous ».*

# **Dédicaces**

*Merci 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*

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, A :*

*Ma chère mère KOKO et mon chère père BOUZID ; que Allah les garde et les protèges*

*A ma grande mère que dieu la garde et protège*

*A mon frère MOUMOUH et sa femme MOUNIA*

*A mes deux chères sœurs LYDIA et MASSILIA*

*A la mémoire de ma chère OUARDA que dieu l'accueille dans son vaste paradis*

*Ainsi a toute ma famille : Cousins, cousines, oncles et tantes*

*Et mon binôme Lamia je la remercie infiniment.*

*A mes amis : NASSIM, MELISSA, YANIS, BAYA, MANI, MELISA*

*A tout la promo électromécanique 2023 /2024*



***GHILAS YAKOUBEN***



***Listes des Figures***

**CHAPITRE I**

<b>Figure I.1 :</b> Les énergies renouvelables.....	3
<b>Figure I.2 :</b> énergie biomasse.....	4
<b>Figure I.3 :</b> Moulins à l'eau.....	4
<b>Figure I.4 :</b> énergie éolienne.....	5
<b>Figure I.5 :</b> Une centrale géothermique.....	5
<b>Figure I.6 :</b> énergie solaire.....	6
<b>Figure I.7 :</b> L'énergie piézoélectrique.....	6
<b>Figure I.8 :</b> l'effet photovoltaïque.....	7
<b>Figure I.9 :</b> Système photovoltaïque.....	9
<b>Figure I.10 :</b> comportement d'une pastille piézo-électrique.....	10
<b>Figure I.11 :</b> Effet inverse de la piézo-électricité.....	11
<b>Figure I.12 :</b> Diagramme des Classes cristallines.....	11
<b>Figure I.13 :</b> Matériaux piézoélectriques naturels.....	12
<b>Figure I.14 :</b> Matériaux des céramiques piézoélectriques.....	13
<b>Figure I.15 :</b> Polymères électro-actifs.....	14
<b>Figure I.16 :</b> composite à matrice céramique.....	14
<b>Figure I.17 :</b> schéma de l'effet piézoélectrique à l'échelle microscopique.....	15
<b>Figure I.18 :</b> Numérotation des directions en notation tensorielle condensée.....	16
<b>Figure I.19 :</b> Effet piézoélectrique.....	19

**Chapitre II**

<b>Figure II.1 :</b> Modèle de la cellule photovoltaïque a une diode.....	20
<b>Figure II.2 :</b> Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	24
<b>Figure II.3 :</b> Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O.....	25
<b>Figure II.4 :</b> Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.....	26
<b>Figure II.5 :</b> Structure d'un contrôleur MPPT flou.....	27

<b>Figure II.6 :</b> Fonction d'appartenance du contrôleur flou (entrées, sortie) .....	27
<b>Figure II.7 :</b> schéma globale de la simulation PV.....	29
<b>Figure II.8 :</b> schéma bloc du piézo QP20W connecté à un condensateur de stockage .....	33
<b>Figure II.9 :</b> schéma bloc de la partie mécanique.....	33
<b>Figure II.10 :</b> Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boos.....	34
<b>Figure II .11 :</b> Modèle R-C de la batterie .....	35

### **Chapitre III**

<b>Figure III.1 :</b> Caractéristique P(V) d'un module pour PV (G=1000(W / m <sup>2</sup> ), et T=25°C)...	37
<b>Figure III.2 :</b> Caractéristique I(V) d'un module PV pour (G=1000(W / m <sup>2</sup> ), et T=25°C)....	37
<b>Figure III.3 :</b> Caractéristique P(V) d'un module PV.....	38
<b>Figure III.4 :</b> Caractéristique I(V) d'un module PV.....	38
<b>Figure III.5 :</b> Caractéristique P(V) d'un module PV.....	39
<b>Figure III.6 :</b> Caractéristique I(V) d'un module PV.....	39
<b>Figure III.7 :</b> algorithme de la gestion.....	40
<b>Figure III.8 :</b> schéma de simulation.....	41
<b>Figure III.9 :</b> profil d'ensoleillement.....	42
<b>Figure III.10 :</b> profil de charge.....	42
<b>Figure III.11 :</b> Puissance photovoltaïque, batteries et de la charge.....	42
<b>Figure III.12 :</b> L'état de charge de la batterie.....	43
<b>Figure III.13 :</b> Tension de la batterie.....	43

## Liste des tableaux

### Chapitre I

**Tableau I.1 :** Définition des termes et dimension des matrices utilisées en équations.....17

### Chapitre II

**Tableau II. 1 :** Paramètres électriques de panneaux SIEMENS.....23

**Tableau II.2 :** Table des règles de décision à cinq classes.....28

## Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale ..... 1

## Chapitre I : état de l'Art sur les Energie renouvelable

I.INTRODUCTION ..... 3

I.1 définition Les énergies renouvelables ..... 3

I.1.1 L'énergie de la biomasse ..... 4

I.1.2 L'énergie hydraulique ..... 4

I.1.3 L'énergie éolienne ..... 5

I.1.4 L'énergie géothermique ..... 5

I.1.5 L'énergie solaire ..... 6

I.1.6 L'énergie piézoélectrique ..... 6

I-2 La conversion photovoltaïque ..... 7

I-2-1 L'effet photovoltaïque ..... 7

I-2-2 Rayonnement solaire ..... 8

I-2-3 Semi-conducteur ..... 8

I-3 Système photovoltaïque ..... 8

I-4 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque ..... 9

1-4-1 Avantages ..... 9

1-4-2 Inconvénients ..... 9

I.5. Généralités sur les propriétés piézoélectriques ..... 10

I.5.1. La chronologie des matériaux piézoélectriques ..... 10

I.6.1. Définition de la piézoélectricité ..... 10

A) Effet direct de la piézo-électricité ..... 10

B) Effet inverse de la piézo-électricité ..... 10

I.6.2. La symétrie cristalline ..... 11

I.6.3. Les différents matériaux piézoélectriques ..... 12

I.6.4. Le principe de l'effet piézoélectrique ..... 15

I.6.5. Les équations constitutives de la piézoélectricité .....	15
I.7. Les modes de vibrations .....	16
I.8 Avantages et inconvénients d'énergie piézoélectrique .....	17
I.8.1 Les avantage.....	17
I.8.2. Les inconvénients .....	18
I.9.Les domaines d'applications de la piézoélectricité .....	18
Conclusion .....	19

## **Chapitre II : modélisation et optimisation**

II.1. INTRODUCTION .....	20
II.2 Modélisation du système photovoltaïque .....	20
II.2.1 Modèles et caractéristiques de module photovoltaïque.....	20
II.2.1.1 Modèles mathématique a une diode de model PV .....	20
. II.2.1.2 caractéristiques de module photovoltaïque.....	21
II.2.2 : les déférentes équations de la cellule PV .....	22
II.3 Maximum Power Point tracking (MPPT) .....	23
II.3.1 Principe de fonctionnement .....	23
II.3.2 Méthodes Poursuite du Point de Puissance Maximale.....	24
II.3.2.1 Méthode de perturbation et d'observation (P&O) .....	24
II.3.2.2 Méthode à base de Logique floue (FLC).....	26
II.3.3. Application de la commande par la logique floue .....	26
II.4 Simulation d'un panneau photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK .....	29
II.5. Modélisation de système piézoélectrique.....	29
II.5.1 Equations principales .....	29
II.5.2 Les équations de la piézoélectricité.....	30
II.5.3 Explication des coefficients de piézoélectricité .....	31
II.5.3.1 La constante piézoélectrique de charge $d_{mn}$ .....	31
II.5.3.2 La constante piézoélectrique de tension $g_{mn}$ .....	31
II.5.3.3 Coefficient de couplage électromécanique $k$ .....	32
II.6 Simulation d'énergie piézoélectrique sous MATLAB/SIMULINK .....	32
II.7 Hacheur « survoltEUR-dévolteur » Buck-Boost .....	33

II.8 dispositifs de stockage.....34

Conclusion .....36

## **Chapitre III : la gestion d'Energie et résultat de simulation**

Introduction.....37

III.1. Résultats de la simulation du système photovoltaïque .....37

III.1.2. Influence de la température .....38

III.1.3. Influence de l'irradiation.....38

III.2. La gestion d'énergie photovoltaïque.....40

III.2.1. Simulation du système de gestion.....41

III.2.1.1. Résultats des simulations.....42

III.3. Interprétation des résultats .....43

Conclusion .....44

Conclusion générale .....45

Bibliographie

# **Introduction générale**

# Introduction générale

L'intérêt pour les énergies renouvelables a émergé après la crise pétrolière de 1973. Cet événement a été un tournant majeur dans la façon dont le monde perçoit l'énergie et ses origines. Au XXI<sup>e</sup> siècle, la transition énergétique est devenue cruciale pour les sociétés contemporaines devant les défis environnementaux comme le changement climatique, la pollution atmosphérique et l'épuisement des ressources fossiles, il est essentiel de recherche des sources d'énergie alternatives, durables et moins polluantes. Les énergies renouvelables apparaissent comme une solution prometteuse pour répondre à ces enjeux globaux, ils jouent un rôle essentiel dans un contexte mondial qui se caractérise par la prise de conscience des conséquences environnementales et la nécessité de varier les sources d'énergie.

Les énergies photovoltaïque et piézoélectrique se démarquent parmi ces alternatives par leur capacité à offrir des solutions durables et novatrices, ils proposent des solutions non seulement durables, en diminuant la dépendance aux énergies fossiles, mais aussi innovantes, en ouvrant de nouvelles perspectives pour la production et l'utilisation de l'énergie. Il est crucial de les incorporer de plus en plus dans notre infrastructure énergétique globale afin d'atteindre des objectifs de durabilité et de diminution des émissions de carbone.

L'énergie solaire photovoltaïque, qui tire profit de la lumière du soleil pour produire de l'électricité, est devenue l'une des technologies renouvelables les plus appréciées et les plus abordables. Grâce à des progrès technologiques importants et à une diminution continue des dépenses, les panneaux solaires photovoltaïques se sont imposés comme une alternative économique pour générer de l'énergie propre. La croissance de leur intégration dans les infrastructures urbaines et rurales démontre leur capacité à changer le paysage énergétique mondial.

En même temps, l'énergie piézoélectrique, même si elle est moins connue, présente des opportunités prometteuses, en particulier dans le domaine des appareils intelligents et des technologies portables. En exploitant les capacités de certains matériaux à produire un courant électrique sous l'action de la pression mécanique, cette forme d'énergie pourrait apporter une contribution aux solutions renouvelables existantes en proposant des applications spécifiques dans divers domaines, allant de la récupération d'énergie à partir des vibrations environnementales à l'alimentation des capteurs sans fil.

Le travail présenté dans notre mémoire consiste en l'étude de l'électrification d'une charge par un système à énergie renouvelables. Ce travail est réparti en trois chapitres essentiels.

## **Introduction générale**

---

Dans la première partie de premier chapitre on a présenté les différentes sources des énergies renouvelables et dans la deuxième partie est consacré à une généralité sur la piézoélectrique.

Dans le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et optimisation d'un panneau photovoltaïque et de piézoélectrique des tests de simulation sont présenté sur l'enivrement MATLAB-SIMULINK.

Dans le troisième et dernier chapitre on a présenté la gestion d'énergie photovoltaïque et nous avons commenté nos résultats obtenus d'après la simulation.

Enfin nous terminons par une conclusion générale et des perspectives.

# **CHAPITRE I :**

## **État de l'art sur l'énergie renouvelable**

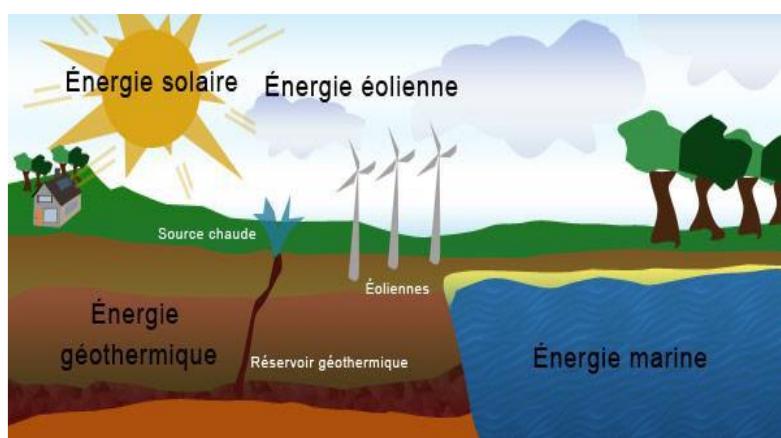
## I. INTRODUCTION

L'énergie piézoélectrique et l'énergie solaire sont deux formes d'énergie renouvelable qui tirent parti de différentes sources pour la production d'électricité. L'énergie piézoélectrique exploite les propriétés électriques des matériaux piézoélectriques, qui génèrent une charge électrique en réponse à une contrainte mécanique. Cette forme d'énergie est souvent utilisée dans des applications telles que les capteurs de pression, les actionneurs et les dispositifs de génération d'énergie à petite échelle, comme les dalles piézoélectriques dans les trottoirs. D'autre part, l'énergie solaire exploite l'énergie du rayonnement solaire pour produire de l'électricité à l'aide de panneaux solaires. Ces panneaux convertissent la lumière du soleil en électricité à travers un processus photovoltaïque. L'énergie solaire est largement utilisée dans les applications résidentielles, commerciales et industrielles, offrant une source d'énergie propre et renouvelable. Ces deux formes d'énergie contribuent à la transition vers un avenir énergétique plus durable et respectueux de l'environnement.

### I.1 Énergie renouvelable

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain [1], est alimentées par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées... Ces sources permettent la production d'électricité, de la chaleur, du froid, de gaz, de carburant et de combustible [2].

L'utilisation de l'énergie renouvelable présente de nombreux avantages. Elle contribue à la réduction de l'effet de serre en limitant les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. De plus, elle favorise une gestion durable des ressources locales et stimule la création d'emplois [3].



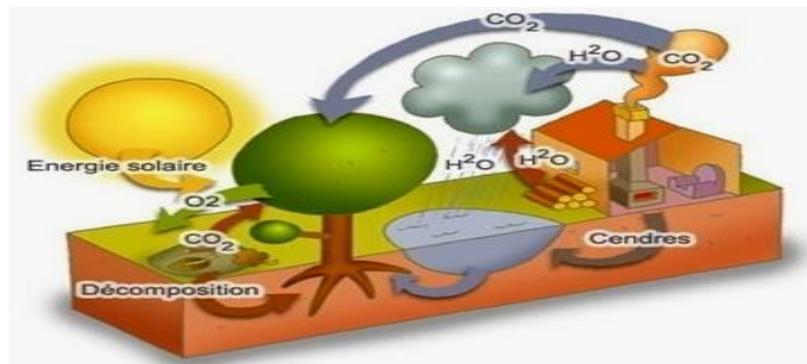
**Figure. I.1 :** Différents types des énergies renouvelables [4]

## I.1.1 Énergie de la biomasse

En énergie, la biomasse désigne tout ce que la terre et les milieux aquatiques génèrent en réponse au rayonnement solaire, que ce soit des arbres, des plantes ou des algues. Les plantes sont riches en énergie, et pendant des millénaires, elles ont été la seule source d'énergie utilisée par l'homme. Les aliments de l'homme lui-même et du bétail étaient les seuls moteurs, tandis que le bois, le seul combustible connu, était utilisé avec un rendement énergétique désastreux jusqu'à la découverte des combustibles fossiles [5].

La biomasse comprend trois familles principales :

- ❖ Le biogaz ou la méthanisation.
- ❖ Les bois énergie ou biomasse solide.
- ❖ Les granules de bois sont le combustible au rendement le plus élevé.



**Figure. I.2 :Énergie de la biomasse [4]**

## I.1.2 Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie utilisant la force naturelle de l'eau pour faire tourner des turbines et produire de l'électricité. Elle provient de l'électricité renouvelable produite par les barrages hydroélectriques. Elle s'inscrit dans un processus naturel de récupération des eaux de pluie et de l'énergie gravitaire qui en découle respectivement.

Les cours d'eau sont également utilisés dans l'énergie hydraulique pour convertir la force motrice de l'eau en électricité. Une turbine est alors entraînée par la vitesse de l'eau, ce qui entraîne un générateur électrique [6].

Il existe plusieurs types de cette énergie :

- ❖ L'énergie des vagues
- ❖ L'énergie marémotrice
- ❖ L'énergie hydrolienne



**Figure. I.3 :Énergie hydraulique**

### I.1.3 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, est généralement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée.

De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mats et des pales de grandes dimensions [7].



**Figure. I.4 :Énergie éolienne [4]**

### I.1.4 Énergie géothermique

La géothermie tire son origine du grec <Ge> et <thermos>, qui signifient respectivement : terre et chaleur. La géothermie peut être définie comme la méthode utilisée pour extraire les calories présentes dans le sous-sol ou les roches, afin de les rendre disponibles en surface pour des utilisations de chauffage ou de génération d'énergie. Pour certaines situations spécifiques, la géothermie peut impliquer l'incorporation de chaleur dans le sous-sol pour refroidir les installations de surface. La chaleur interne de la terre provient de différentes sources de chaleur : la radioactivité, la chaleur initiale, la chaleur de différentiation et les mouvements de différentiation [8].

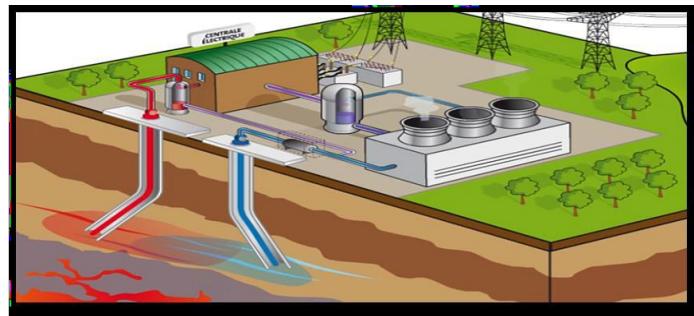


Figure. I.5 :Centrale géothermique [9]

## I.1.5 Énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du soleil sur terre, est à l'origine toutes les formes de production énergétique utilisées sur terre. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps utilise), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou biomasse.

Il existe deux types principales d'exploitation de l'énergie solaire sont : le solaire photovoltaïque et le solaire thermique [10].

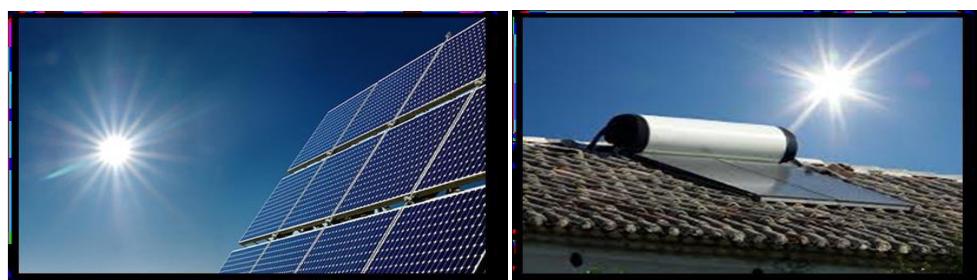
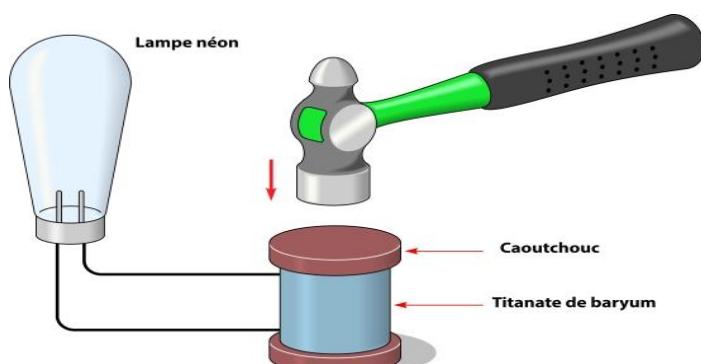


Figure. I.6 :Énergie solaire [11]

## I.1.6 Énergie piézoélectrique

Le terme piézoélectricité désigne la capacité de certains matériaux à se polariser électriquement, c'est-à-dire à générer un champ ou un potentiel électrique, lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet piézoélectrique direct.



**Figure. I.7 :Énergie piézoélectrique**

Il existe également un effet piézoélectrique inverse, où l'application d'une tension électrique à un matériau piézoélectrique provoque une modification de ses dimensions [29].

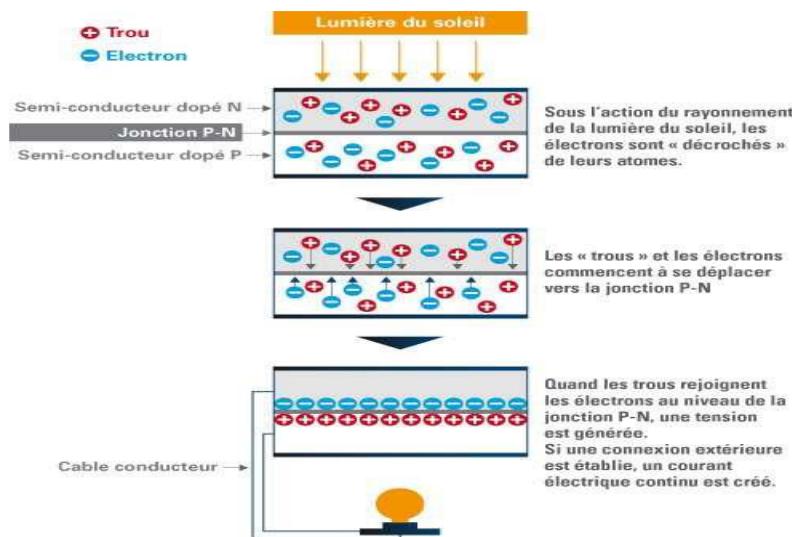
## I.2 Conversion photovoltaïque

### I.2.1 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque consiste à convertir l'énergie émise par le soleil, qui se manifeste sous forme de photons en énergie électrique, en utilisant un composant semi-conducteur connu sous le nom de cellule solaire. Cela se déroule en trois étapes :

- ❖ Absorption des photons de la lumière solaire.
- ❖ Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique.
- ❖ Collecte les particules dans un circuit électrique externe.

Deux couches de silicium sont utilisées pour fabriquer une cellule photovoltaïque, l'une dopée P et l'autre dopée N, formant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Quand les semi-conducteurs absorbent les photons, ils transfèrent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de manière à ce que les électrons (charges N) et les trous (charges P) engendrent une différence de potentiel entre les deux couches. Les électrons (couche N) captent l'énergie des photons lumineux, ce qui leur permet de passer la barrière de potentiel et de générer un courant électrique continu. Afin de recueillir ce courant, on dépose des électrodes par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur. Le haut de l'électrode est une grille qui permet le passage des électrons [12].



**Figure. I.8 :Effet photovoltaïque[12].**

### I.2.2 Rayonnement solaire

Le soleil émet des photons dont la longueur d'onde varie de l'ultraviolet ( $0.2\mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain ( $2.5\mu\text{m}$ ). La notion AM pour Air Mass est utilisée pour décrire le spectre solaire en fonction de l'énergie émise. Afin de prendre en compte la distance parcourue par les rayons nécessite l'introduction d'une notion de masse d'air (AM), qui correspond à la longueur relative du trajet du rayonnement solaire direct à travers l'atmosphère terrestre. Un multiple du trajet parcouru en un point au niveau de la mer, avec le soleil à l'aplomb, est utilisé pour exprimer la masse d'air.

Au niveau du sol, le rayonnement global absorbé par une surface plane avec une quelconque inclinaison est composé de:(Rayonnement direct, Rayonnement diffus, Rayonnement réfléchi et le Rayonnement global) [13].

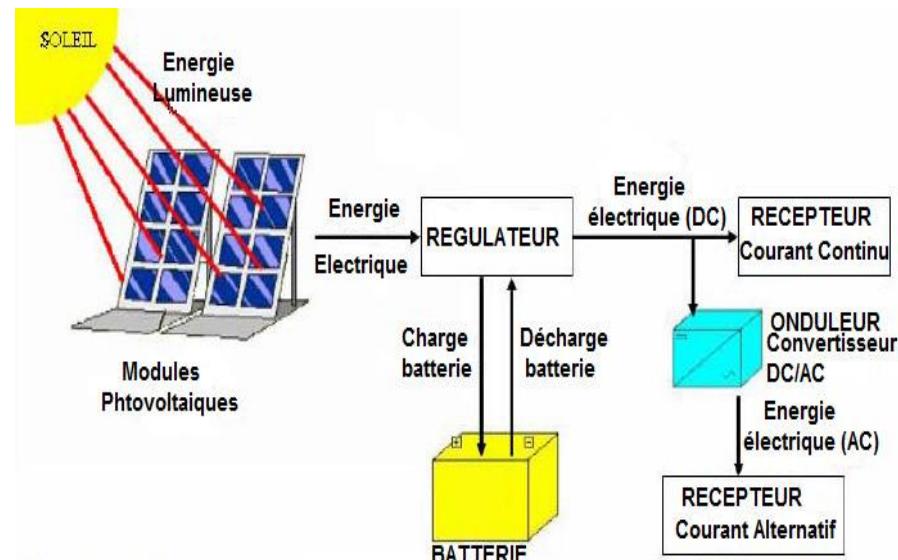
### I.2.3 Semi-conducteur

Un semi-conducteur est un conducteur (supérieur aux isolants mais inférieur aux métaux) augmenté en ajoutant des impuretés dans sa structure. Le semi-conducteur le plus courant est à base de silicium Si, SiO<sub>2</sub>, l'élément chimique le plus communément associé à l'oxygène dans la silice et donc très abondant dans la nature. Le silicium pur est un semi-conducteur intrinsèque.

Propriétés des semi-conducteurs peuvent être contrôlées par des impuretés dopantes. Des semi-conducteurs avec plus de capacités d'avoir plus d'électrons que de trous sont appelés type N, et les semi-conducteurs en présentent plus. Plus de trous que d'électrons, sont appelés type P[14].

## I.3 Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque (PV) est un ensemble d'éléments (constituants) de production d'électricité, en utilisant une source solaire. Ces constituants sont essentiellement le champ PV, le conditionnement de puissance, le système de stockage (dans un certain cas), et la charge. On distingue deux types de systèmes PV : - Systèmes PV autonomes - Système à injection au réseau [15].



**Figure I .9 :Système photovoltaïque [15]**

## I.4 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### 1.4.1 Avantages

- ❖ Premièrement, une grande fiabilité. La construction n'est pas équipée de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement adaptée aux zones isolées. C'est pourquoi il est utilisé sur les navires spatiaux.
- ❖ La nature modulaire des panneaux solaires photovoltaïques facilite leur montage et leur adaptabilité à différents besoins énergétiques. Il est possible de dimensionner les systèmes pour des puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- ❖ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé
- ❖ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [16].

### 1.4.2 Inconvénients

- ❖ La production du module photovoltaïque est une activité de haute technologie qui nécessite des investissements élevés.
- ❖ Tributaire des conditions météorologiques
- ❖ Le coût du générateur augmente lorsque l'énergie électrique est stockée sous forme chimique (batterie).

- ❖ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [16].

## I.5. Généralités sur les propriétés piézoélectriques :

### I.5.1. Chronologie des matériaux piézoélectriques :

Elle fut découverte en 1880 par les frères **Pierre et Jacques Curie**, qui prédirent l'existence de la piézoélectricité dans les cristaux de quartz. L'année suivante, **Gabriel Lippmann** prédit l'effet inverse, qui fut ensuite vérifié par les frères **Curie**. Les travaux théoriques sur la piézoélectricité culminèrent en 1918 avec la publication du "**Lehrbuch der Kristallphysik**" (Manuel de physique des cristaux) par **Waldemar Voigt**, physicien allemand, qui y présente les vingt classes cristallines piézoélectriques.

La piézoélectricité a été utilisée pour créer des instruments de laboratoire, comme la balance à quartz piézoélectrique, utilisée dès 1900 pour mesurer la radioactivité des sels d'uranium, de radium et de polonium [17].

## I.6. Piézoélectricité :

### I.6.1. Définition de la piézoélectricité

Le mot « pièzo », du Grec « piézein » signifie « appuyer » ou « presser ».

#### A) Effet direct de la piézo-électricité

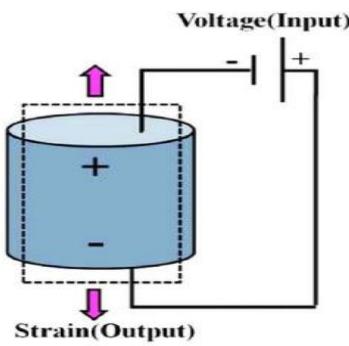
Est la propriété de certains corps de se polariser électriquement lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique.



Figure I.10 :Comportement d'une pastille piézo-électrique

#### B) Effet inverse de la piézo-électricité

Inversement le cristal se déforme lorsqu'on lui applique une polarisation électrique (champ électrique externe).

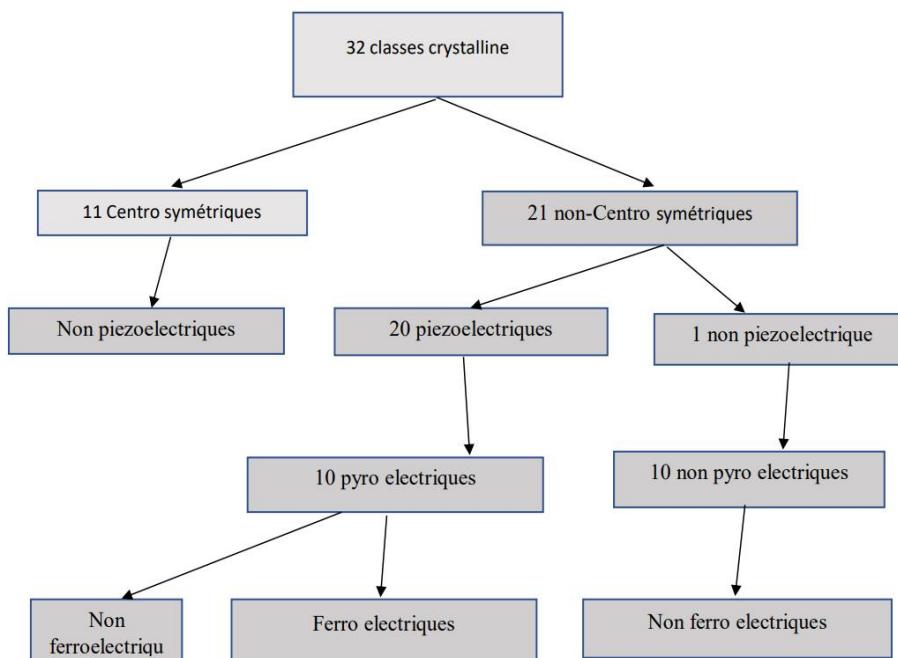


**Figure I.11 :** Effet inverse de la piézo-électricité.

## I.6.2. Symétrie cristalline

Lorsque l'on soumet un cristal à une contrainte mécanique, celui-ci va se déformer [18]. Si la structure cristalline n'est pas Centro symétrique, les barycentres des ions positifs et négatifs vont se dissocier et former un dipôle. Parmi les 32 structures cristallines possibles 21 sont non Centro symétriques. Parmi ces 21 structures non Centro symétriques, 20 sont piézoélectriques [19].

Les barycentres des ions positifs et négatifs peuvent également être séparés même lorsque le cristal est au repos, c'est-à-dire lorsqu'aucune contrainte mécanique n'est appliquée sur le matériau. Les matériaux pyroélectriques présentent une polarisation électrique, même en l'absence de champ électrique extérieur. Parmi les 20 classes de structures piézoélectriques, 10 sont pyroélectriques [18]. Et tout ça se représente tout au long dans le schéma suivant :



**Figure I.12 :** Diagramme des Classes cristallines

Avec :

**Centro symétriques** : Les cristaux ne peuvent présenter aucune polarisation.

**La pyroélectricité** : (du grec pyro, feu) c'est la propriété d'un matériau dans lequel un changement de température entraîne une variation de polarisation électrique.

### I.6.3. Les différents matériaux piézoélectriques :

Les matériaux piézoélectriques sont des matériaux diélectriques parce qu'ils permettent d'être polarisées électriquement en réponse à un champ électrique externe, avec une capacité supplémentaire de générer une charge électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique.

Les matériaux piézoélectriques sont classés en deux groupes : naturels et synthétiques.

#### A. Les matériaux piézoélectriques naturels :

- **Les cristaux** : comme la tourmaline, la topaze, le sucre de canne et le quartz, sont souvent utilisés comme matériaux piézoélectriques en raison de leur stabilité et de leur fiabilité. Le quartz est particulièrement populaire dans les oscillateurs et les horloges à cause de sa précision dans la génération de fréquences[20].



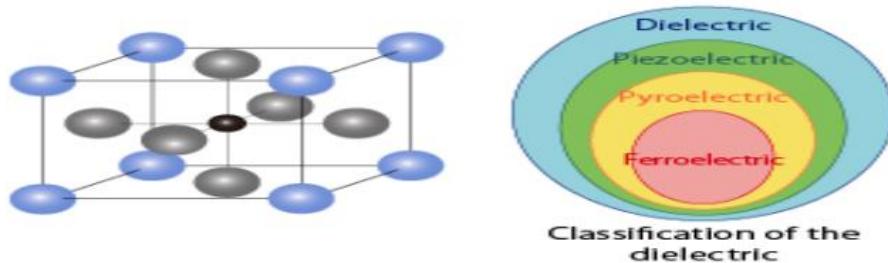
Figure I.13 : Matériaux piézoélectriques naturels

#### B. Matériaux piézoélectriques synthétiques

Les matériaux piézoélectriques artificiels sont des matériaux spécialement conçus pour exhiber les propriétés piézoélectriques qui sont fabriqués avec une structure cristalline ou une organisation moléculaire spécifique pour favoriser l'effet piézoélectrique. Ces matériaux sont largement utilisés dans une variété d'applications telles que les capteurs de pression, les actionneurs, les dispositifs de génération d'énergie, les dispositifs médicaux et bien plus encore en raison de leurs propriétés uniques et de leur capacité à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique et vice versa.

## 1. Céramiques piézoélectriques

Les céramiques piézoélectriques sont des matériaux poly cristallins fabriqués en mélangeant divers oxydes tels que la zircone, l'oxyde de plomb, l'oxyde de titane, etc., puis en les soumettant à un processus de frittage à haute température et de réaction en phase solide. Par la suite, ces céramiques subissent un traitement de polarisation à haute tension continue pour développer leur effet piézoélectrique. Ce terme englobe les céramiques ferroélectriques et désigne un type de matériau céramique fonctionnel capable de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique et vice versa.



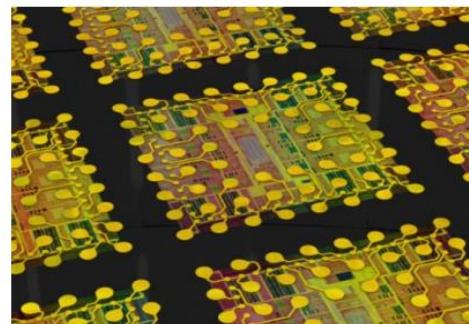
**Figure I.14 :** Matériaux des céramiques piézoélectriques

Les céramiques piézoélectriques appartiennent à la catégorie des matériaux céramiques électroniques caractérisés par leurs propriétés piézoélectriques. Ce qui les distingue principalement des cristaux de quartz piézoélectriques classiques, qui ne contiennent pas de composants ferroélectriques, c'est que les phases cristallines constituant leurs principaux composants sont toutes des grains ferroélectriques[21].

## 2. Polymères piézoélectriques

Les polymères piézoélectriques, également connus sous le nom de "muscles artificiels", sont des composés organiques légers et flexibles qui réagissent à une stimulation électrique en changeant de dimension et de forme. Il existe deux principaux types de polymères :

- Les polymères à base de fibres telles que le caoutchouc, la laine, les cheveux, le bois et la soie.
- Le polyvinylidène fluorure (PVDF), dont la formule est  $(-\text{CH}_2\text{-CF}_2-) n$ , présente une piézoélectricité plusieurs fois supérieure à celle du quartz[22].



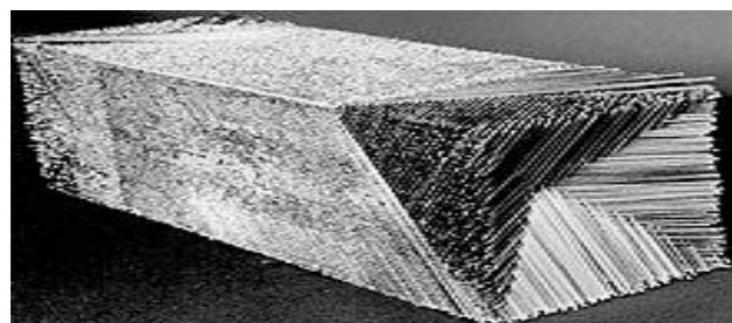
**Figure I.15 :** Polymères électro-actifs

Les plus utilisée sont les PVDF car ils possèdent les caractéristiques suivantes [23] :

- Leur grande flexibilité leur permet de subir d'importantes déformations, les rendant adaptables à des surfaces non planes.
- Ils présentent des facteurs de couplage électromécanique faibles (entre 0,2 et 0,3).
- Malgré une tension de claquage élevée, ils peuvent être facilement découpés en formes complexes.
- Leur résistance mécanique élevée permet la fabrication de films minces

### ✚ Céramiques composites

Les composites à matrice céramique (CMC) sont des matériaux composites appartenant à la famille des céramiques techniques. Ils se distinguent par l'incorporation de fibres céramiques dans une matrice également céramique. Ces fibres et matrices peuvent être composées de divers matériaux céramiques, y compris le carbone.



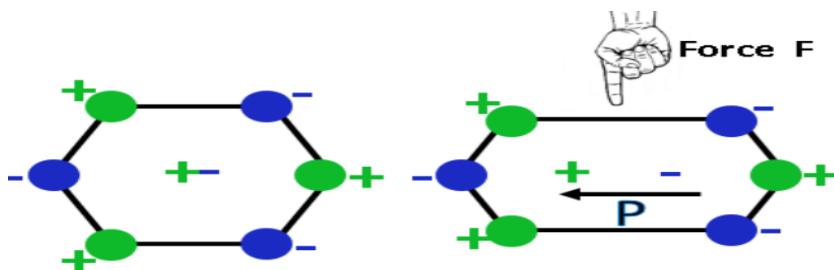
**Figure I.16 :** composite à matrice céramique [22]

Dans les avancées et applications des céramiques composites, les fibres de carbone (C) et de carbure de silicium (Sic) sont les plus couramment utilisées, tandis que parfois, on fait également appel à des fibres d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou d'oxyde d'aluminium. De plus, des cristaux mixtes d'alumine et de silice ( $\text{SiO}_2$ ), appelés mellite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), peuvent être employés.

En ce qui concerne la matrice dans les applications techniques, les matériaux utilisés sont principalement l'alumine, le mellite, le carbone et le carbure de silicium[22].

### I.6.4. Principe de l'effet piézoélectrique

Le principe de l'effet piézoélectrique repose sur la capacité des matériaux piézoélectriques à générer une différence de potentiel en réponse à une pression (effet piézoélectrique positif) et à produire une contrainte mécanique en réponse à une tension (effet piézoélectrique inverse). Lorsque soumis à des vibrations à haute fréquence, ces matériaux génèrent un courant à haute fréquence. Ainsi, en appliquant des signaux électriques à haute fréquence sur des céramiques piézoélectriques, des vibrations acoustiques à haute fréquence, ou ultrasons, sont produites [24].



**Figure I.17 :** Schéma de l'effet piézoélectrique à l'échelle microscopique

Cet effet de couplage mécanique-électrique permet la création de structures intelligentes dotées de fonctions telles que l'autodiagnostic, l'auto-adaptassions et l'autoréparation. Ces avancées devraient jouer un rôle crucial dans la conception future des aéronefs et d'autres applications technologiques [24].

### I.6.5. Équations constitutives de la piézoélectricité

La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement est le phénomène piézo-électrique. Les huit équations d'état suivantes établissent un lien entre les variables électriques (induction électrique  $D$  ( $\text{Cm}^2$ ) ou champ électrique  $E$  ( $\text{V.m}^{-1}$ ) et les variables mécaniques (déformation  $S$  ou contrainte  $T$  ( $\text{N.m}^{-1}$ )). Elles mettent en évidence le processus de fusion de l'énergie élastique et de l'énergie électrique d'un matériau piézo-électrique.

Trois catégories de coefficient sont présentées :

- Des coefficients électriques purement.
- Des coefficients mécaniques purement.

- Des coefficients mixtes qui reflètent la combinaison des grandeurs électriques et mécaniques.

Il est fréquent d'exprimer ces équations de la manière suivant [25] :

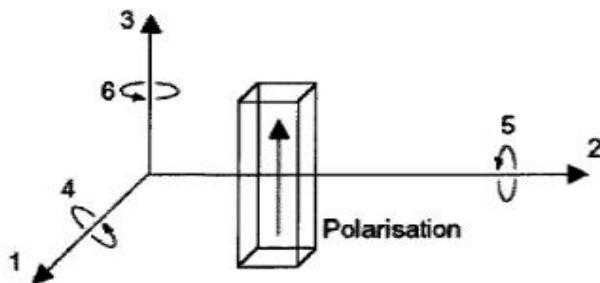
$$D_m = d_{mi}T_i + \varepsilon_{mk}^T E_k \quad S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi}^t E_m$$

$$E_m = -g_{mi}T_i + \beta_{mk}^T D_k \quad S_i = s_{ij}^D T_j + g_{mi}^t D_m$$

$$D_m = e_m S_i + \varepsilon_{mk}^S E_k \quad T_i = c_{ij}^E S_j - e_{mi}^t E_m$$

$$E_m = -h_{mi}S_i + \beta_{mk}^S D_k \quad T_i = c_{ij}^D S_j - h_{mi}^t D_m$$

Les indices i, j, m et k respectent la notation tensorielle.



**Figure (I.18) :** Numérotation des directions en notation tensorielle condensée

## I.7. Modes de vibrations

On distingue trois modes de vibration fondamentaux d'un élément piézo-électrique. La nature de ces modes, autrement dit la distribution géométrique de la déformation, dépend des dimensions de l'échantillon considéré mais aussi de la direction de la polarisation P et du champ électrique appliqué E. Il est ainsi possible de privilégier un mode de vibration donné par un choix adéquat de ces grandeurs. Présente ces modes fondamentaux et les conditions d'excitation nécessaires à leur obtention.

Tableau I.1 : Définition des termes et dimension des matrices utilisées en équations [26]

Type	Termes	Signification	Unités	Dimensions
Electrique	D E $\epsilon$ $\beta$	Déplacement électrique ou induction Champ électrique Permittivité électrique Imperméabilité diélectrique	$C/m^2$ $V/m$ $F/m$ $m/F$	3*1 3*1 3*3 3*3
Mécaniques	S T S C	Déformation relative Contrainte Susceptibilité Raideur ou constante élastique	$N/m^2$ $m^2/N$ $N/m^2$	6*1 6*1 6*1 6*1
Piézo-électrique	D E G H	Constant reliant la contrainte T et induction D à E constant Constante reliant la déformation S et l'induction D à E constant Constante reliant la contrainte T et le champ E à D constant Constante reliant la déformation S et le champ E à D constant	$C \cdot N^{-1}$ OU $V \cdot m^{-1}$ $C \cdot m^{-2}$ Ou $CV^{-1}$ $V \cdot m \cdot N^{-1}$ Ou $m \cdot C^{-2}$ $V \cdot m^{-1}$ Ou $N \cdot C^{-1}$	3*6 3*6 3*6 3*6

## I.8 Avantages et inconvénients d'énergie piézoélectrique :

### I.8.1 Avantage :

- Il s'agit d'une énergie renouvelable qui tire parti des mouvements naturels et offre une source d'alimentation infinie, ne nécessitant pas l'exploitation intensive des ressources terrestres.
- C'est une forme d'énergie propre qui ne génère pas de pollution. À l'exception des déchets produits lors de la fabrication des générateurs, tels que les transducteurs en céramique, elle ne laisse aucun résidu.

- Les générateurs piézoélectriques ne génèrent pas de chaleur, ce qui réduit les risques associés à cette énergie, contrairement à certaines autres sources d'énergie telles que l'énergie nucléaire[20].

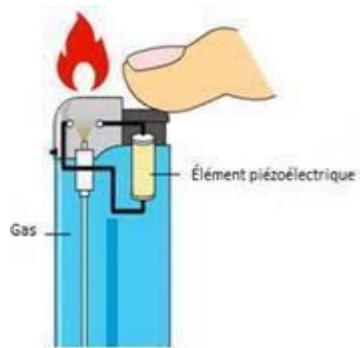
### I.8.2.Inconvénients :

- L'installation de modules de récupération d'énergie piézoélectrique peut être très coûteuse, nécessitant parfois des centaines voire des milliers d'euros. Un exemple est celui des dalles piézoélectriques pour piétons telles que les Pavegen.
- Cette forme d'énergie n'est pas très puissante, car l'intensité produite par les générateurs piézoélectriques est généralement très faible. Les rendements sont donc un inconvénient majeur de cette technologie, en plus de son coût élevé[20].

### I.9 Domaines d'applications de la piézoélectricité

L'effet piézo-électrique trouve un très grand nombre d'applications dans la vie quotidienne et dans l'industrie, voici quelques-unes[20] :

- Les briquets utilisent un cristal piézoélectrique pour produire une tension électrique lorsque la force est exercée, déclenchant ainsi une décharge d'étincelles.
- Les capteurs de pression piézoélectriques sont largement utilisés dans l'industrie automobile pour mesurer la pression des pneus, ainsi que dans l'aéronautique pour mesurer la pression dans les tuyères et d'autres applications de mesure de niveau.
- En acoustique, la piézoélectricité est utilisée pour transformer les ondes sonores en signal électrique, utilisée dans les microphones et les haut-parleurs.
- Les moteurs et actionneurs piézoélectriques exploitent l'effet inverse, convertissant la tension appliquée en mouvement. On les trouve dans les autofocus des appareils photo, les mécanismes de vitres électriques des voitures, et d'autres applications similaires.



**Figure I.19 :** Effet piézoélectrique

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons explore deux sources d'énergie renouvelable : Dans la première partie de ce chapitre nous avons donné une présentation des différentes sources d'énergies renouvelables qui existent, tel que l'énergie hydraulique, solaire, éolienne, biomasse, géothermique et piézoélectrique et une généralité sur photovoltaïque. Dans la seconde partie nous avons étalé la définition et les différentes structures des systèmes piézoélectriques.

## **Chapitre II :**

# **Modélisation et optimisation**

## II.1. Introduction

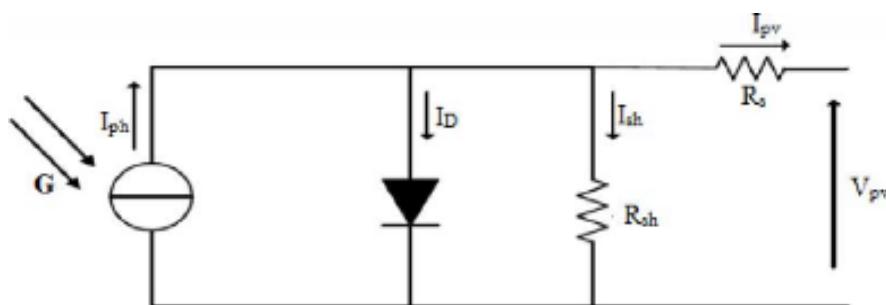
La modélisation et l'optimisation des systèmes photovoltaïques et piézoélectriques est un domaine crucial pour l'innovation dans les technologies d'énergie renouvelable et de récupération d'énergie. Les systèmes photovoltaïques convertent l'énergie solaire en électricité, et leur performance est prédictive et optimisée sous diverses conditions. Les systèmes piézoélectriques exploitent la capacité de certains matériaux à générer une charge électrique en réponse à une contrainte mécanique, et leur conception est optimisée pour des applications spécifiques. On utilise l'outil matlab-simulink pour faire la modélisation et la simulation.

## II.2 Modélisation du système photovoltaïque

### II.2.1 Modèles et caractéristiques de module photovoltaïque

#### II.2.1.1 Modèles mathématique a une diode de model PV

Le module photovoltaïque se distingue par son schéma électrique similaire (Figure II.1) qui comprend une source de courant qui assure la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt  $R_{sh}$  qui est due à l'état de la longueur de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série  $R_s$  qui représente les différentes résistances de contact et de connexion, et une diode parallèle qui assure la jonction PN [26].



**Figure II.1 :**Modèle de la cellule photovoltaïque a une diode [26]

Avec :

$R_{sh}$  : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

$R_s$ : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcourt (résistance de contact).

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

### II.2.1.2 caractéristiques de module photovoltaïque [26]

- . Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants[26] :
  - **Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )** : C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle ( $V'_{pv}=0$ ) à 25 °C et 1000(W / m<sup>2</sup>),
  - **Tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ )** : Représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photo-courant  $I_{ph}$  ( $I_d = I_{ph}$ ) quand ( $I'_{pv}=0$ ). Elle reflète la tension de la cellule en absence de lumière, elle est exprimée mathématiquement par :

$$V_{oc} = V_t \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (\text{II. 1})$$

Ou :

$$V_t = \frac{mkT_C}{e} \quad (\text{II. 2})$$

Donc :

$$V_{oc} = \frac{mkT_C}{e} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (\text{II. 3})$$

Ou :

$V_t$ : La tension thermique.

$T_C$ : La température absolue.

$m$ : Facteur idéal de la jonction.

$e$ : Charge de l'électron  $1.6 \times 10^{-19} C$ .

- **Point de puissance maximale ( $P_{mpp}$ )** : est le point M ( $V_{mpp}, I_{mpp}$ ) de la figure (II.2) où la puissance dissipée dans la charge est maximale

$$P_{mpp} = V_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

$V_{mpp}$  : Tension optimale.

$I_{mpp}$  : Courant optimal.

- **Rendement maximum** : est le rapport entre la puissance maximale et la puissance à l'entrée de la cellule solaire.

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{in}} = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{A_{pv} \cdot G} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$G$  : l'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface en watt /mètre carré( $W / m^2$ ),

$A_{pv}$  : Surface effective des cellules.

### II.2.2 : les différentes équations de la cellule PV :

❖ Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff [26]:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$I_{PV}$ : Courant du panneau photovoltaïque.

$I_{ph}$ : Photo courant.

$I_d$ : Courant de diode.

$I_{sh}$ : Courantshunt.

❖ Le courant produit par la photopile est donné par :

$$I_{ph} = P_1 \cdot G [1 + P_2 (G - G_{ref}) + P_3 (T_j - T_{jref})] \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$T_{jref}$  : est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) ( $= 25C ^\circ + 273$ ),

$P_1, P_2, P_3$ : Paramètres constants

❖ Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_{PV} + I_{PV}R_s)}{A \cdot n_s \cdot k \cdot T_j} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.8})$$

La température du module peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

$$T_j = N + G \left( \frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$G, T_j$  : l'éclairement et la température de jonction dans les conditions de fonctionnement.

$N_{oct}$ : Température nominale de fonctionnement du module, donnée par le constructeur.

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

$n_s$  : Nombre de cellule en série dans un module.

K : Constante de Boltzmann  $1.38 \times 10^{-23} J/K$ .

$I_0$ : Le courant de saturation il est fortement dépendant de la température ; il est donné par :

$$I_0 = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left[\frac{-E_g}{k \cdot T_j}\right] \quad (\text{II.10})$$

$E_g$  : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 ev.

Le tableau suivant montre les données d'un module photovoltaïque, de type SIEMENS SM110-24.

**Tableau II. 1 : Paramètres électriques de panneaux SIEMENS[26]**

Paramètres	Valeur
Puissance max du panneau $P_{mpp}$	110 W
Courant au point de puissance max $I_{mpp}$	3.15A
Tension au point de puissance max $V_{mpp}$	35V
Courant de court-circuit $I_{sc}$	3.45A
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	43.5V
Coefficient d'incrémentation du courant $I_{sc}(\alpha_{sc})$	1.4mA/ °C
Coefficient d'incrémentation de la tension $V_{oc}$	-152 mV/°C

### II.3 Maximum Power Point tracking (MPPT)

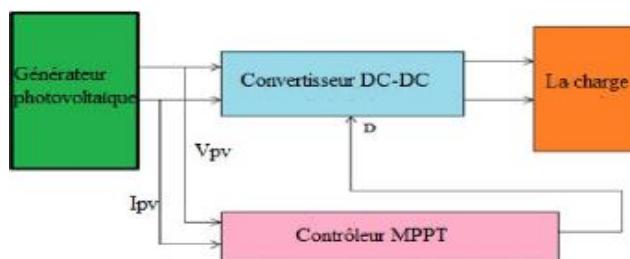
L'amélioration de l'efficacité et de la fiabilité des systèmes photovoltaïques GPV est essentielle pour optimiser l'utilisation de différentes ressources des énergies renouvelables. Il est crucial de suivre le point de puissance maximale (MPPT) afin d'améliorer les performances des systèmes d'énergie photovoltaïque. Les panneaux solaires GPV ont la capacité de générer une puissance maximale à un point de fonctionnement spécifique nommé Maximum Power Point (MPP) [27].

#### II.3.1 Principe de fonctionnement

Le module photovoltaïque peut fonctionner à son point de puissance maximale grâce au suiveur de point de puissance maximum (MPPT). Le fonctionnement des commandes de

(MPPT) consiste à chercher le point de puissance maximale (PPM) tout en garantissant une adaptation optimale entre le générateur et sa charge afin de transférer la puissance maximale. En général, il est équipé d'un convertisseur qui contrôle la puissance récupérée du panneau solaire. Deux variables de contrôle sont habituellement utilisées pour contrôler le point de puissance maximale (MPP). Chaque mesure de tension ou de puissance est renouvelée dans une boucle afin de déterminer si le module solaire atteint son point de puissance maximale [28].

La Figure (II.2) représente la chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une Commande MPPT.



**Figure II.2 :** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque [28]

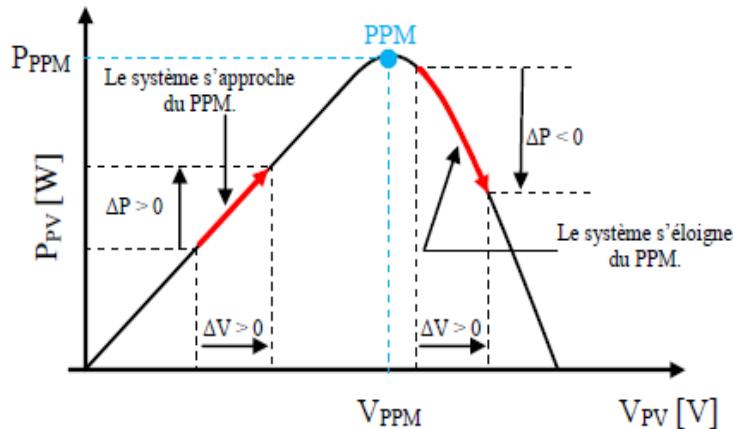
- ❖ Les panneaux photovoltaïques (GPV) : permettent la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique
- ❖ Le convertisseur DC/DC : fournit une tension continue réglable à partir d'une tension continue d'alimentation.

### II.3.2 Méthodes Poursuite du Point de Puissance Maximale

#### II.3.2.1 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

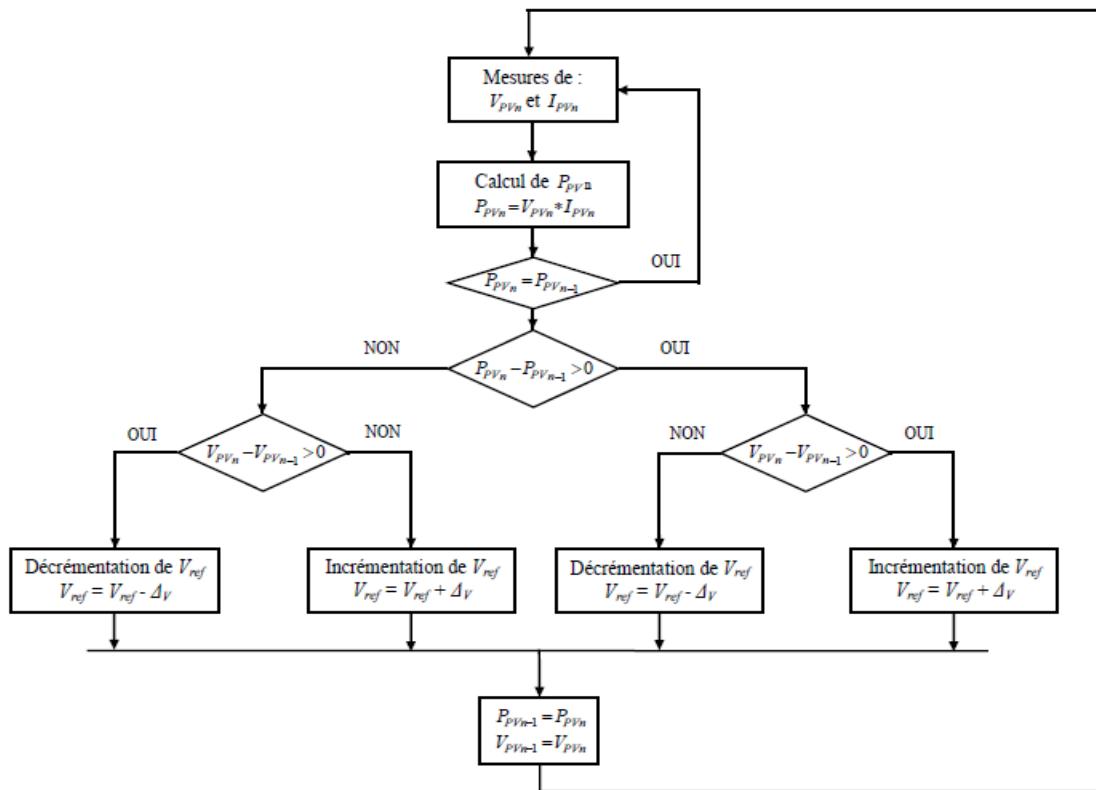
C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Les commandes MPPT de type P&O ont pour principe de perturber la tension  $V_{pv}$  avec une amplitude limitée autour de sa valeur

initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en découle.



**Figure II.3 :** Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O [27]

De cette manière, comme le montre la figure (II.4) pour diverses zones de fonctionnement, il est possible de conclure que si une augmentation positive de la tension  $V_{pv}$  entraîne une augmentation de la puissance  $P_{pv}$ , cela indique que le point de fonctionnement se situe à gauche du MPP. En cas de la puissance diminue au contraire, ce qui signifie que le système a dépassé le MPP. On peut faire un raisonnement similaire lorsque la tension diminue. En analysant les différentes variations de tension sur la caractéristique  $P_{pv}$  ( $V_{pv}$ ), il devient ainsi aisément de déterminer le point de fonctionnement par rapport au MPP et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance en utilisant un ordre de commande [31]. Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure (II.5).



**Figure II.4 :** Organigramme de la méthode Perturbation et Observation [26]

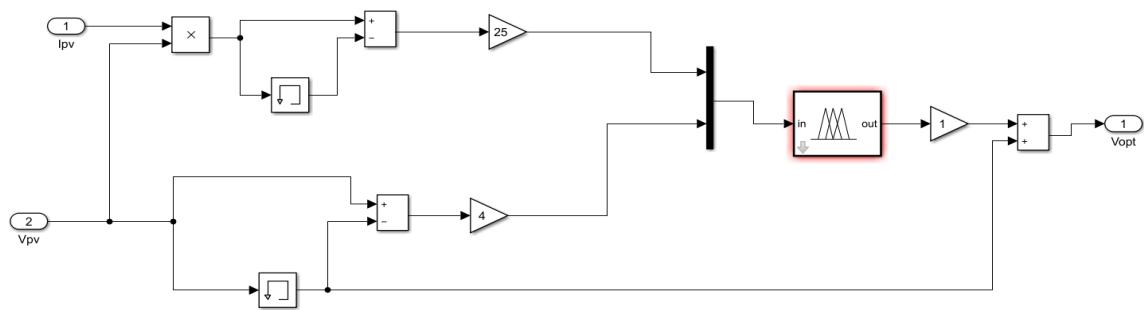
Les avantages de cette méthode peuvent être résumés de la manière suivante : Il n'est pas nécessaire de connaître les caractéristiques du générateur photovoltaïque, c'est une méthode relativement simple. Cependant, en régime continu, le point de fonctionnement tourne autour du MPP, ce qui entraîne une diminution de l'énergie [26].

### II.3.2.2 Méthode à base de Logique floue (FLC)

La commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande présente l'intérêt d'être une commande solide et relativement facile à concevoir, et elle ne requiert pas une connaissance précise du modèle à contrôler. Il y a trois étapes pour mettre en place un contrôleur flou : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification [27].

### II.3.3 Application de la commande par la logique floue

Dans cette étude, la commande MPPT est exposée en utilisant une logique floue afin de réduire les oscillations de la méthode perturbation et observation (P&O) qui entraînent des pertes de puissance significatives, tout en améliorant la réponse de la commande.



**Figure II.5 :** Structure d'un contrôleur MPPT flou

### a) Fuzzification

Grâce à l'opération de fuzzification, les grandeurs physiques à l'entrée du régulateur flou sont transformées en variables linguistiques qui peuvent être traitées par le mécanisme de négation. L'objectif est de déterminer les niveaux d'appartenance des variables d'entrée.

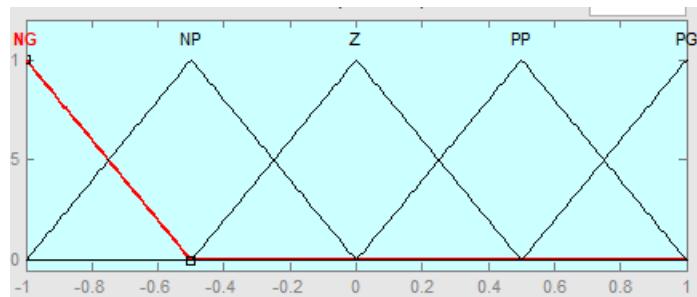
Aux sous-ensembles qui leur sont associés. La structure du contrôleur par logique floue utilisé dans le système photovoltaïque est illustrée dans la figure (II.6). La variation de la tension et de la puissance du générateur photovoltaïque ( $\Delta P_{PV}, \Delta V_{PV}$ ) sont enregistrées comme entrées telle que :

$$\Delta P_{PV} = P_{PV}[K] - P_{PV}[K - 1] \quad (\text{II.11})$$

$$\Delta V_{PV} = V_{PV}[K] - V_{PV}[K - 1] \quad (\text{II.12})$$

L'incrément optimal à ajouter à la tension de fonctionnement pour extraire le point de puissance maximal est déterminé par le contrôleur flou pour la sortie. Cette sortie est utilisée pour calculer le rapport cyclique du convertisseur DC/DC[28].

La figure suivante représente la fonction d'appartenance de ces cinq sous-ensembles flous :



**Figure II.6 :** Fonction d'appartenance du contrôleur flou (entrées, sortie)

En utilisant les bases des sous-ensembles flou on peut exprimer les variables d'entrées et de sortie en termes de variable linguistiques, ces dernières sont écrites en étiquettes comme suit :

**PG** : (positif grand) ; **PP**: (positif petit) ; **ZE**: (Zéro) ; **NP**: (négatif petit) ; **NG**: (négatif grand)

❖ **Règles et interférences floues :**

Le tableau II.2 montre la table de règles du contrôleur flou. Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d'entrée par des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain, en traduisant simplement des remarques de bon sens. On a choisi la méthode Mamdani comme une méthode d'inférence floue avec (opération MAX-MIN). Elle consiste à utiliser l'opérateur MIN pour le ET et l'opérateur MAX pour le OU[28].

**Tableau II.2 :** Table des règles de décision à cinq classes

$\Delta P_{pv}$	NG	NP	Z	PP	PG
NG	PG	PP	Z	NP	NG
NP	PG	PP	Z	NP	NG
Z	NG	NP	Z	PP	PG
PP	NG	NP	Z	PP	PG
PG	NG	NP	Z	PP	PG

La lecture de la table de vérité, ou étape d'établissement des règles d'inférence qui relient la sortie avec l'entrée. Comme nous l'avons indiqué, il y'a cinq ensembles flous, ce qui implique vingt-cinq combinaison possible de ces entrées, d'où vingt-cinq règles qui sont du genre :

If ( $\Delta P_{pv} 1$  is NG) and ( $\Delta V_{pv} 2$  is NG) then ( $\Delta P_{pv-ref} 1$  is PG)

**b) Defuzzification**

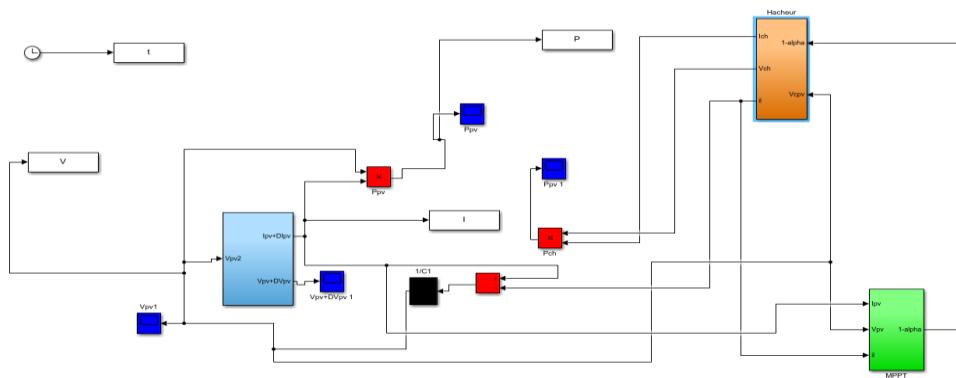
Les sorties floues des règles précédentes sont combinées en utilisant la fonction max pour former un seul ensemble flou. Cet ensemble est défuzzifié pour générer une seule valeur de commande. La méthode la plus souvent utilisée est la méthode centroïde qu'on va utiliser

dans notre travail qui donne le centre de gravité de la surface de la fonction membre globale[28].

$$\Delta V_{PV,ref} = \frac{\sum_j^n = 1 \mu(V_{PV}(k)) - V_{PV}(k)}{\sum_j^n = 1 \mu(V_{PV}(k))} \quad (\text{II. 14})$$

### II.4 Simulation d'un panneau photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK

Le schéma de simulation du panneau photovoltaïque Implante dans l'environnement Simulink/ Matlab est représenté sur la figure ci-dessus :



**Figure II.7 :schéma global de la simulation**

### II.5. Modélisation de système piézoélectrique

#### II.5.1 Equations principales

Le piézoélectrique est une interaction entre l'énergie élastique et l'énergie électrique (interaction entre deux variables électriques et mécaniques) et inversement. La contrainte mécanique relative de déformation, soit  $S$  et  $T$ , ou l'induction électrique et le champ électrique, soit  $D$  et  $E$ .

Les expressions de  $S$  et  $T$  sont données par [29] :

$$S = S^E \cdot T + d^t \cdot E \quad (\text{II. 15})$$

$$D = d \cdot T + \epsilon^t \cdot E \quad (\text{II. 16})$$

Avec :

$S^E$ : La constante d'élasticité du matériau ( $m^2/N$ ).

$d$  : Le coefficient piézoélectrique constant (C/N) .

$\epsilon^t$ : La permittivité électrique ( $F/m$ ).

Le champ électrique dans la couche piézoélectrique est déterminé par la solution de l'équation de Poisson [29] :

$$\vec{\nabla} \cdot \mathbf{D} = \rho s \quad (\text{II. 17})$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 (-\vec{\nabla} \cdot \mathbf{V}) \quad (\text{II. 18})$$

$$\vec{\mathbf{E}} = -\vec{\nabla} \cdot \mathbf{V} \quad (\text{II. 19})$$

Avec :

$\rho s$  : Densité de changement de surface.

$\mathbf{V}$  : Potentiel électrique.

$\epsilon$  : Permittivité du vide.

### II.5.2 Équations de la piézoélectricité

Le phénomène piézoélectrique se manifeste par la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. Les huit équations d'état présentées dans chapitre 1.

Elles illustrent le phénomène de couplage entre l'énergie élastique et l'énergie électrique du matériau piézoélectrique. Trois types de coefficients interviennent [29].

-La constante d'élasticité du matériau

-Le coefficient piézoélectrique

-La permittivité électrique, ( $\text{F/m}$ )

-Le champ électrique dans la couche piézoélectrique

Dans un solide élastique soumis à une contrainte  $T$ , la déformation  $S$  vaut :

$$S = sT \quad (\text{II. 18})$$

Avec :

$S$  : est la souplesse (inverse du module de Young), exprimée en ( $\text{m}^2/\text{N}$ ).

Par ailleurs, dans un diélectrique exposé à un champ électrique, l'équation est la suivante :

$$D = eE \quad (\text{II. 18})$$

La valeur de  $\epsilon$  de la constante diélectrique du milieu est exprimée en [F/m]. Dans un environnement piézoélectrique, les phénomènes mécaniques et électriques se compensent mutuellement. Les équations correspondant à l'effet piézoélectrique direct et inverse illustrent cela[29].

$$\frac{dt}{dT} = 0 \quad (\text{II. 19})$$

$$\frac{dS}{dE} = 0 \quad (\text{II. 20})$$

Cette interaction peut être approximation née, avec une bonne approximation, par des relations linéaires entre les quatre variables D, E, S et T, dont seules deux sont indépendantes. Les variables indépendantes, une mécanique et une électrique, sont sélectionnées de manière arbitraire. Par conséquent, en utilisant les variables intensives (T et E) comme variables indépendantes, on peut représenter les propriétés piézoélectriques du matériau, à température constante, par les équations suivantes [29] :

$$S = S^E \cdot T + d^t \cdot E \quad (\text{II. 21})$$

$$D = d \cdot T + \epsilon^t \cdot E \quad (\text{II. 22})$$

### **II.5.3 Explication des coefficients de piézoélectricité [29]**

#### **II.5.3.1 La constante piézoélectrique de charge $d_{mn}$**

Elle indique la charge produite par une force d'unité ou la déformation produite par un potentiel donné.

- **Effet direct (à champ constant) :**

$$d_{mn} = \frac{\text{densité de charge sur l' électrode normale à l'axe } m}{\text{contrainte suivant l'axe } n} \text{ (C/N)} \quad (\text{II. 23})$$

- **Effet inverse (à effort constant) :**

$$d_{mn} = \frac{\text{densité de charge sur l' électrode normale à l'axe } m}{\text{champ électrique suivant l'axe } n} \text{ (N/V)} \quad (\text{II. 24})$$

#### **II.5.3.2 La constante piézoélectrique de tension $g_{mn}$**

- **Effet direct (à induction constante) :**

$$g_{mn} = \frac{\text{champ électrique suivant l'axe } m}{\text{contrainte suivant l'axe } n} \quad (\text{v. m/N}) \quad (\text{II. 25})$$

- **Effet inverse (à effort constant) :**

$$g_{mn} = \frac{\text{déformation relative suivant l'axe } n}{\text{contrainte suivant l'axe } m \text{ densité de charge sur l'électrode normale l'axe } m} \quad (\text{II. 26})$$

### II.5.3.3 Coefficient de couplage électromécanique k

Le coefficient de couplage électromécanique de tout matériau piézoélectrique est un coefficient qui exprime sa capacité à convertir une grandeur électrique en une grandeur mécanique et inversement. Ce critère prend en considération à la fois les caractéristiques élastiques et diélectriques. Et la capacité piézoélectrique du matériau. Selon les normes standards I.R.E, le coefficient de couplage électromécanique est défini de la façon suivante :

$$k = \frac{u_m}{\sqrt{U_e U_d}} \quad (\text{II. 27})$$

Avec :

$u_m$  : est l'énergie mutuelle d'interaction élasto-diélectrique,

$U_e$  : L'énergie élastique

$U_d$  : l'énergie diélectrique.

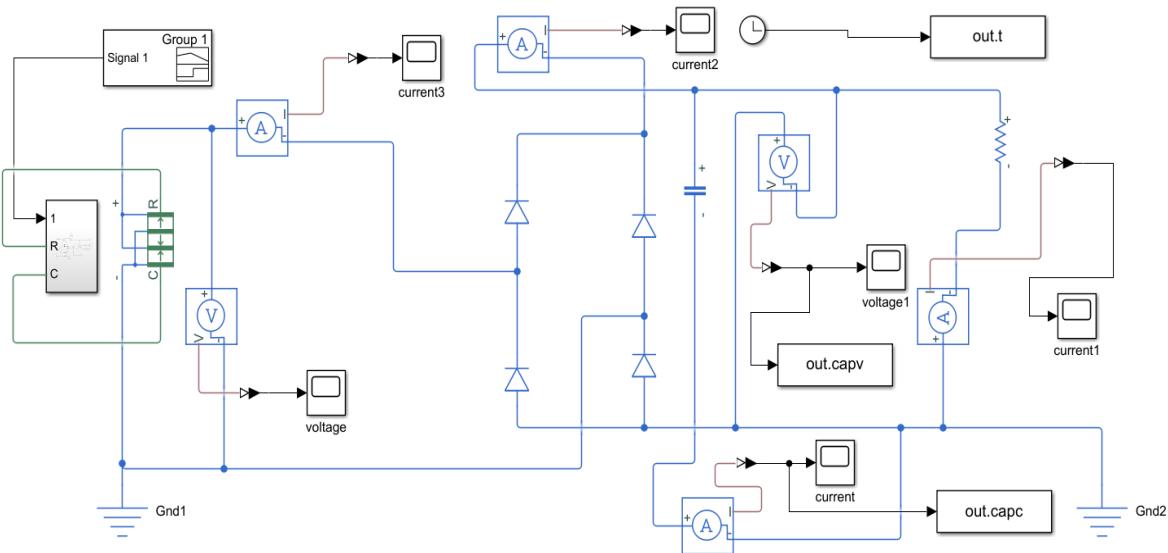
Ce coefficient de couplage dit "statique" découle de l'étude thermodynamique du système considéré comme linéaire en négligeant les effets thermiques et magnétiques.

## II.6 Simulation d'énergie piézoélectrique sous MATLAB/SIMULINK

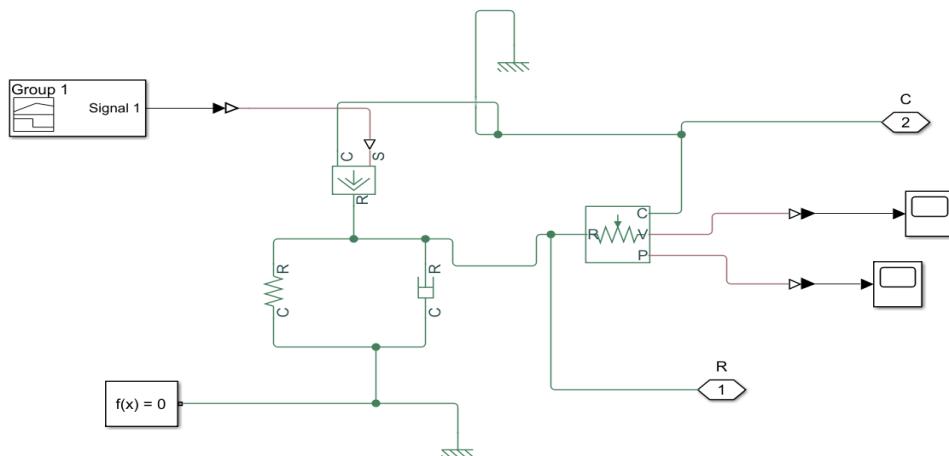
Au cours de la simulation effectuée, on utilise un film piézoélectrique QP20W comme capteur de base pour collecter l'énergie vibratoire. Le système de collecte d'énergie vibratoire est composé de deux parties distinctes, la partie mécanique et la partie électrique.

La partie mécanique sert à simuler l'entrée du capteur, il est composé de Signal Builder, qui sert à créer un signal rectangulaire d'une durée de 0,2 seconde et d'une amplitude de 1 Newton ; Simulink-PS transforme le signal d'entrée Simulink sans unité en un signal physique. La source de force idéale est une source de force qui produit une force proportionnelle au signal d'entrée physique. Le MechanicalTranslational Référence est un point de référence pour la traduction mécanique. Le détecteur de mouvement de translation idéal transforme une variable transversale mesurée entre deux nœuds de translation mécanique en un signal de commande qui est proportionnel à la vitesse et à la position avec un amortisseur et ressort mécanique.

La Figure (II.14) et la Figure (II.15) représente le schéma bloc sous Matlab Simulink.



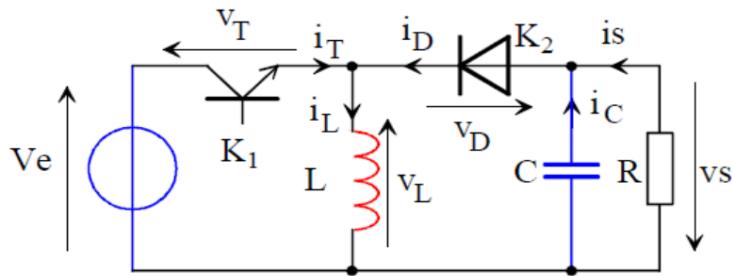
**Figure II.8 :** schéma bloc dupiézo QP20W connecté à un condensateur de stockage



**Figure II.9 :** schéma bloc de la partie mécanique

### II.7 Hacheur « survoltEUR-dévolteUR » Buck-Boost

Le convertisseur « Buck-Boost » est aussi connu sous le nom de « abaisseur élévateur » de la tension. Il est caractérisé par son aptitude à fournir une tension plus faible, ou plus élevée que celle appliquée en son entrée. Ceci dépend de la valeur du rapport cyclique[30].



**Figure II.10 :** Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost [30]

- **Principe de fonctionnement**

Au début du cycle de fonctionnement, de 0 à  $\beta.T$ , l'interrupteur commandé est désactivé (passant). L'ouverture de la diode permet au générateur d'entrée de stocker l'énergie fournie par l'inductance.

Lors de la seconde partie du cycle, de  $\beta.T$  à  $T$  ; l'interrupteur commandé est ouvert et la diode devient passante. L'énergie de l'inductance est restituée à la charge[30].

- **Modèle mathématique d'un convertisseur Buck boost :**

En applique la loi de Kirchhoff dans le circuit pour obtenir les équations suivantes [30] :

**De  $t = 0$  à  $t = \beta T$**

$$\begin{cases} V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_e \\ i_s = -C \frac{dV_s}{dt} \\ i_c = C \frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_s}{R} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

**De  $t = \beta T$  à  $t = T$**

$$\begin{cases} V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_s \\ i_s = -i_L - C \frac{dV_s}{dt} \\ i_c = C \frac{dV_s}{dt} = -i_s - \frac{V_s}{R} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

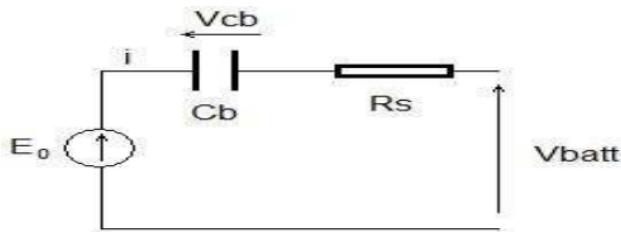
## II.8 dispositifs de stockage

Différents modèles de batteries au plomb existent et leur mise en place n'est pas simple en raison de la prise en compte de divers paramètres. En fonction des utilisations et des

contraintes auxquelles elles sont exposées, les batteries réagissent de manière différente, ce qui entraîne une absence de référence.

Il n'existe aucun modèle unique qui soit précis dans toutes les situations. Nous avons opté pour deux modèles : le modèle appelé « CIEMAT » (Research Center for Energy, Environnement and Technology, Espagne) qui est relativement complet, bien qu'il présente quelques imperfections telles que le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge. En revanche, le modèle R-C est utilisé lors des simulations avec des pas de temps très courts (environ 10-6s) afin de prendre en compte la fréquence[31].

- **Modèle électrique simple de la batterie**



**Figure II .11 :** Modèle R-C de la batterie [31]

Nous avons donc :

$$V_{\text{batt}} = E_0 - R_s \cdot i - V_{\text{Cbatt}} \quad (\text{II. 28})$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$\text{EDC} = 1 - \frac{Q_d}{C_{\text{batt}}} \quad (\text{II. 29})$$

Avec :

$C_{\text{batt}}$  : Capacité (Ah) nominale de la batterie.

$Q_d$ : Quantité de charge manquante par rapport à  $C_{\text{batt}}$  .

La valeur du courant est obtenue à partir de la puissance  $P_{\text{batt}}$  et de la tension  $U_{\text{batt}}$  (équation II.30) :

$$I_{\text{batt}} = \frac{P_{\text{batt}}}{U_{\text{batt}}} \quad (\text{II. 30})$$

### II.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu modèles électriques d'une cellule photovoltaïque et nous avons choisi le modèle à une diode, qui est le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, ensuite nous avons développé les caractéristiques des cellules PV et pour améliorer le rendement d'un système PV, il est nécessaire d'intégrer une commande MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Dans la seconde partie nous avons présenté, la modélisation de piézoélectrique et nous avons terminé avec la modélisation d'hacheur Buck Boost et le dispositif de stockage avec utilisation de l'enivrement MATLAB-SIMULINK pour réaliser la simulation du tous les composant de système.

# **CHAPITRE III :**

## **La gestion d'énergie et résultats de simulation**

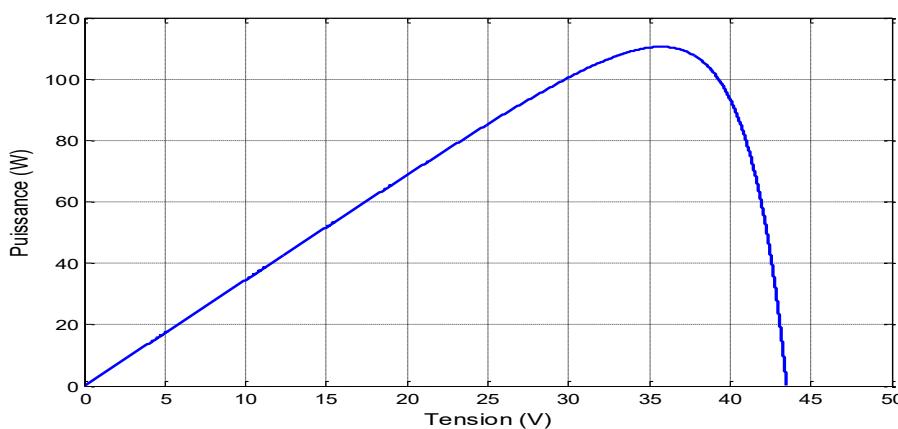


## Introduction

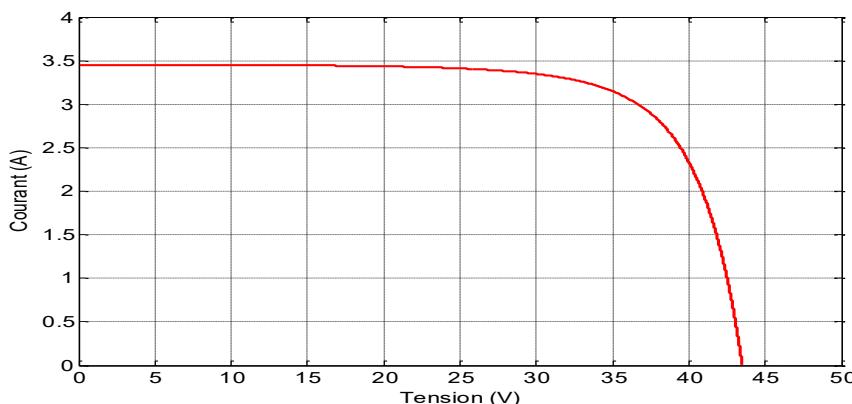
Ce chapitre expose en détail la Gestion d'énergie du système photovoltaïque et les résultats des simulations réalisées sur les systèmes de production d'énergie photovoltaïque et en utilisant MATLAB Simulink. Ces simulations ont pour but de mesurer les performances de chaque système de manière individuelle. Grâce à ces analyses, il est possible de repérer les conditions de fonctionnement optimales, les éventuels défis et les possibilités d'amélioration pour chaque technologie.

### III.1. Résultats dela simulation du système photovoltaïque :

Après avoir réalisé les schémas bloc de système photovoltaïque de type siemens 110-24 dans les conditions standard  $G=1000$  et  $T=25^{\circ}\text{C}$  sur l'enivrement matlab-simulink on obtient les résultats suivants :



**Figure III.1 :** Caractéristique  $P(V)$  d'un module pour PV ( $G=1000(\text{W} / \text{m}^2)$ , et  $T=25^{\circ}\text{c}$ )

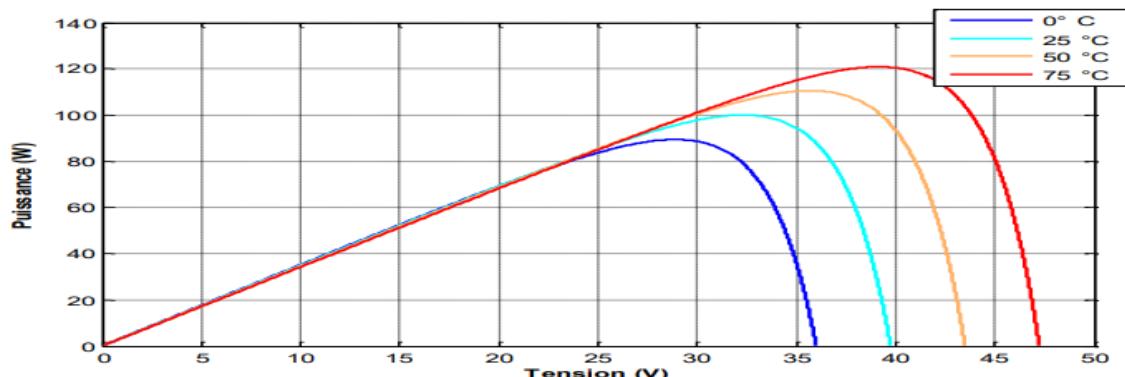


**Figure III.2 :** Caractéristique  $I(V)$  d'un module PV pour ( $G=1000(\text{W} / \text{m}^2)$ , et  $T=25^{\circ}\text{c}$ )

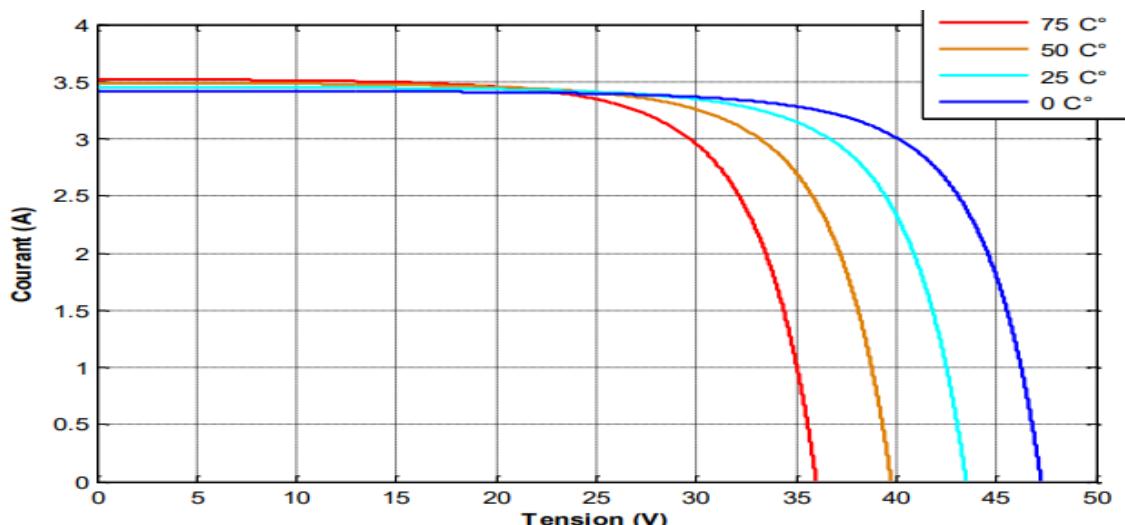
Comme nous le voyons, les résultats de simulation montrent bien que la caractéristique  $I(V)$  du panneau SIEMENS SM 110-24.est non linéaire. Et montre bien qu'un module PV ne peut être assimilé à aucun générateur classique, un panneau PV est considéré comme une source de puissance.

### III.1.2. Influence de la température

Les résultats des caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  du panneau à  $G=1000(W / m^2)$ , obtenus pour différentes valeurs de température sont présentés dans la figure suivant :



**Figure III.3 :** Caractéristique  $P(V)$  d'un module PV

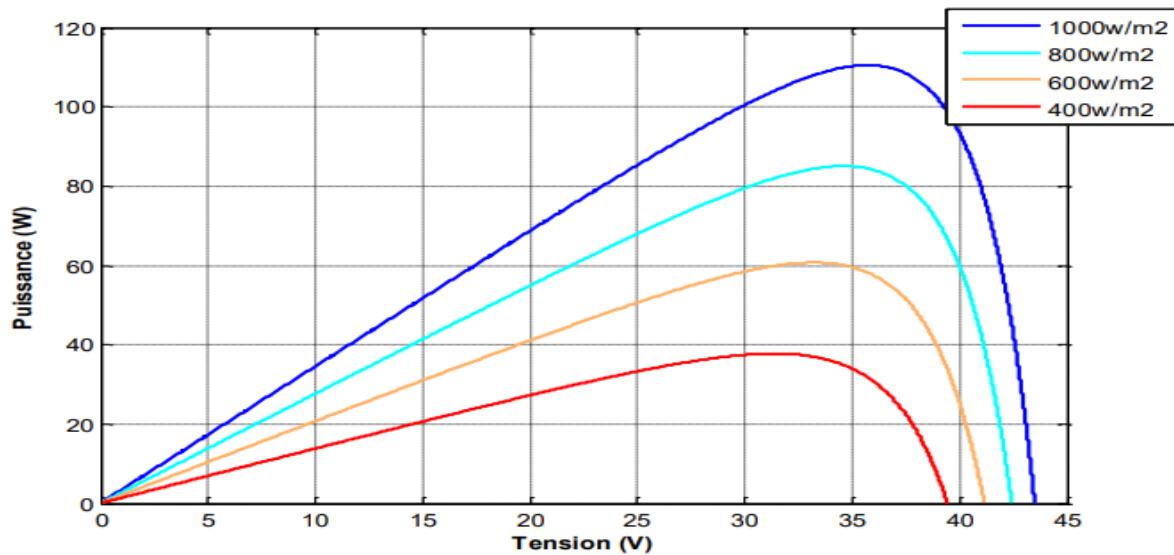


**Figure III.4 :** Caractéristique  $I(V)$  d'un module PV

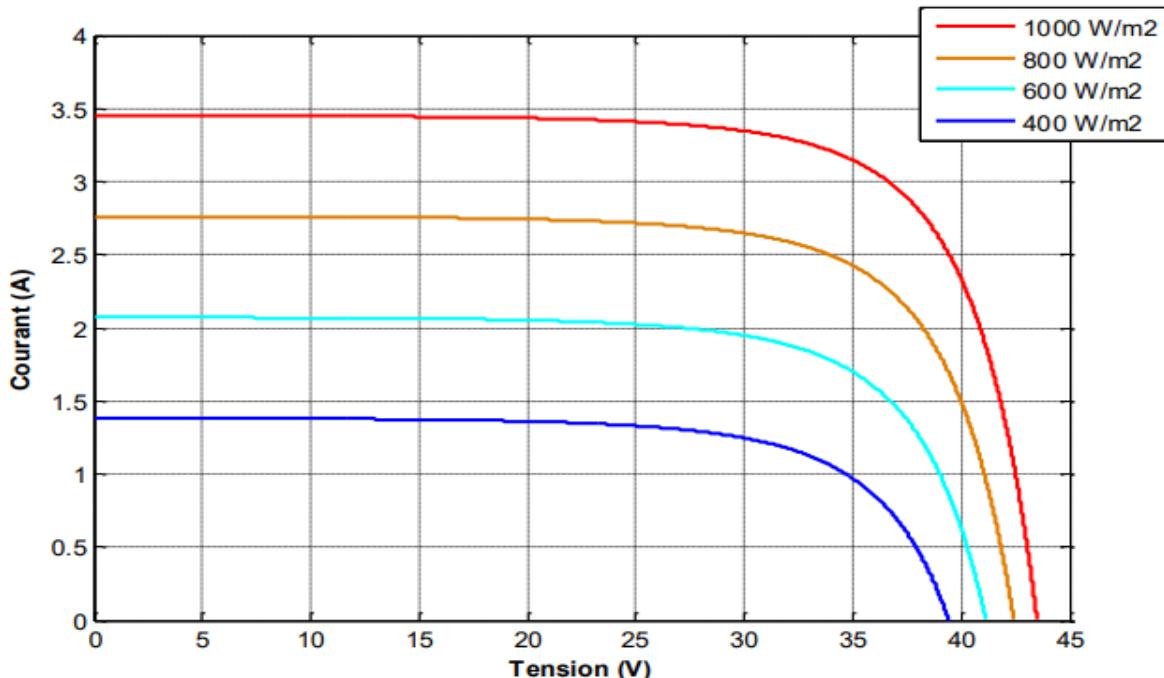
La température joue un rôle crucial dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques. La figure présente le fonctionnement du module avec un éclairage constant de  $1000(W / m^2)$ , et des températures allant de  $0^\circ\text{C}$  à  $75^\circ\text{C}$ . On remarque que la valeur du courant de court-circuit est influencée de manière négligeable par la température. En revanche, la tension dans le circuit ouvert diminue de manière significative lorsque la température augmente. Il est donc conclu que le panneau peut fournir une tension adéquate, même avec un éclairage faible, ce qui entraîne une diminution de la puissance extractible.

### III.1.3. Influence de l'irradiation :

Les résultats des caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  du panneau à  $25^\circ$  obtenus pour différentes valeurs de l'éclairement sont présentés dans les figures suivants :



**Figure III.5 :** Caractéristique  $P(V)$  d'un module PV



**Figure III.6 :** Caractéristique  $I(V)$  d'un module PV

En comparant les propriétés fournies par le constructeur, nous constatons qu'il est évident que le courant de court-circuit dépend directement de l'intensité du rayonnement. En revanche, la tension en circuit ouvert n'est pas sensiblement différente, mais reste presque constante même à faible éclairage.

Cela signifie donc que :

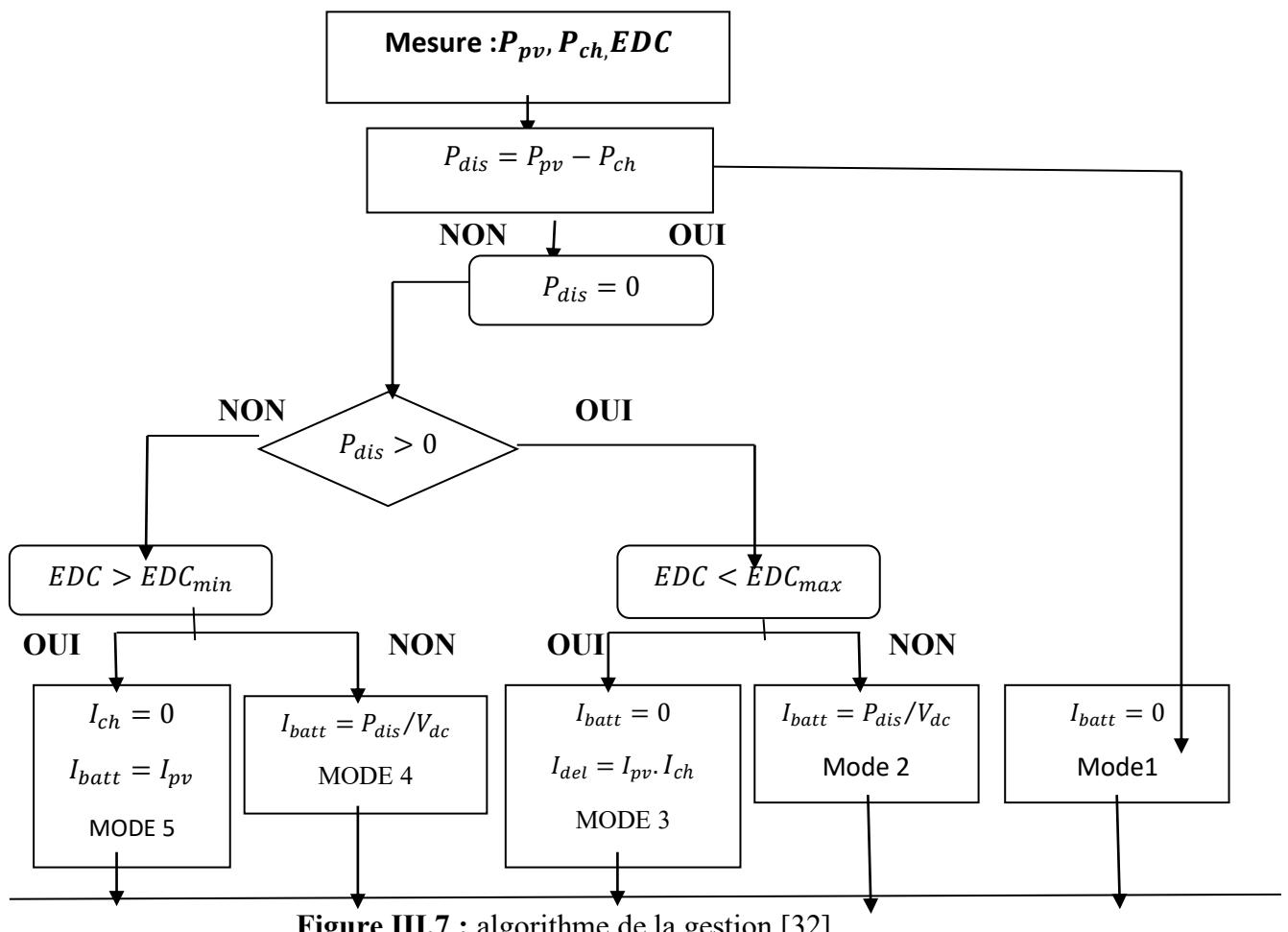
- La puissance maximale de la cellule ( $P_{mpp}$ ) est presque directement liée à l'intensité de l'éclairage.
- La tension maximale est à peu près égale aux points de puissance maximale.

### III.2. La gestion d'énergie photovoltaïque

Pour assurer le bon fonctionnement du système, il est essentiel de gérer de manière optimale le flux d'énergie entre les divers éléments.

Le but de l'algorithme de gestion est de superviser les échanges d'énergie entre les différents éléments, tout en régulant le processus de charge/décharge du stockage (pour éviter les surcharges et les décharges profondes), afin de préserver les ressources optimales et le flux d'énergie entre les divers éléments [32].

La figure (III.1) présente le diagramme de l'algorithme de gestion.



**Figure III.7 :** algorithme de la gestion [32]

A partir de cet algorithme, on peut définir les modes de fonctionnement de ce système de gestion.

Soit  $P_{pv}$  la puissance fournie par les panneaux et  $P_{ch}$  la puissance demandée par la charge, la différence entre ces deux puissances est notée  $P_{dis}$ (puissance disponible) nous obtenons :

$$P_{dis} = P_{pv} - P_{ch} \quad (\text{II.32})$$

➤ **Modes de fonctionnement [32] :**

## La gestion d'énergie et résultat de simulation

- **Mode 1 :** Dans ce cas, la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est égale à la puissance demandée par la charge, ce qui va conduire à l'alimentation directe de la charge.
- **Mode 2 :** Quand la puissance disponible est supérieure à la puissance demandée par la charge, et que l'état de charge de la batterie est inférieur à  $EDC_{max}(90\%)$ , on alimente la charge et on charge la batterie.
- **Mode 3 :** Quand la puissance photovoltaïque est supérieure à la puissance demandée par la charge et que l'état de charge de la batterie est supérieur à  $EDC_{max}(90\%)$ , on déconnecte la batterie et la charge sera alimentée par les panneaux photovoltaïques, et le surplus d'énergie sera dirigé vers une résistance de délestage.
- **Mode 4 :** Ce cas représente la situation où la puissance photovoltaïque est inférieure à la puissance demandée par la charge, donc le manque de puissance sera compensé par la batterie étant donné que l'état de charge de la batterie est supérieur à  $EDC_{min} (30\%)$ .
- **Mode 5 :** Dans ce cas, la puissance photovoltaïque est insuffisante pour alimenter la charge, et l'état de charge de la batterie est inférieur à  $EDC_{min} (30\%)$ , donc on déconnecte la batterie, et vu que la demande de la charge n'est pas satisfaite, cette dernière va aussi se déconnecter, dès que cela arrive la batterie se reconnecte à nouveau pour emmagasiner le peu d'énergie disponible [31].

### III.2.1. Simulation du système de gestion :

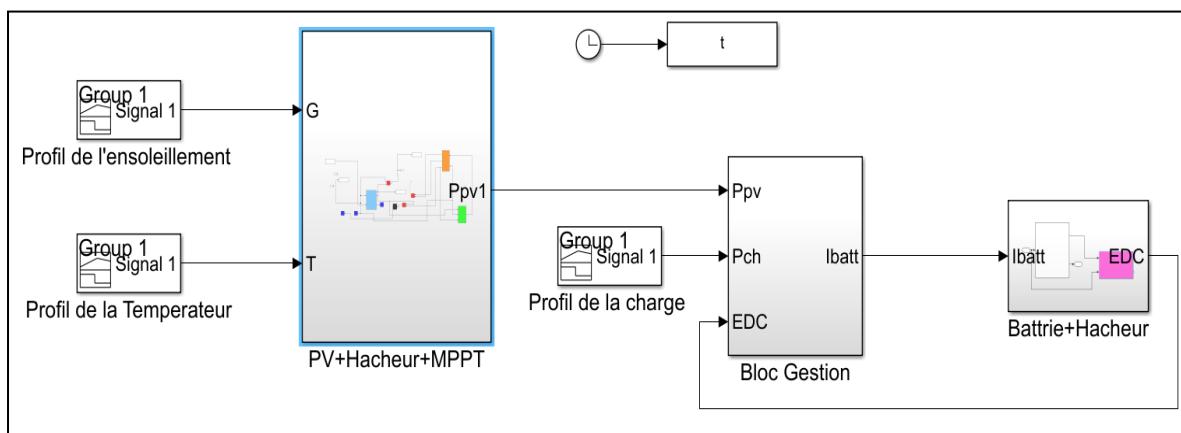
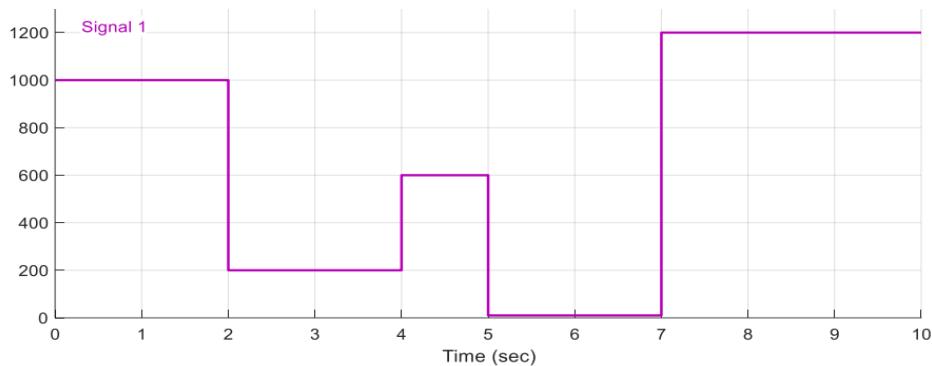


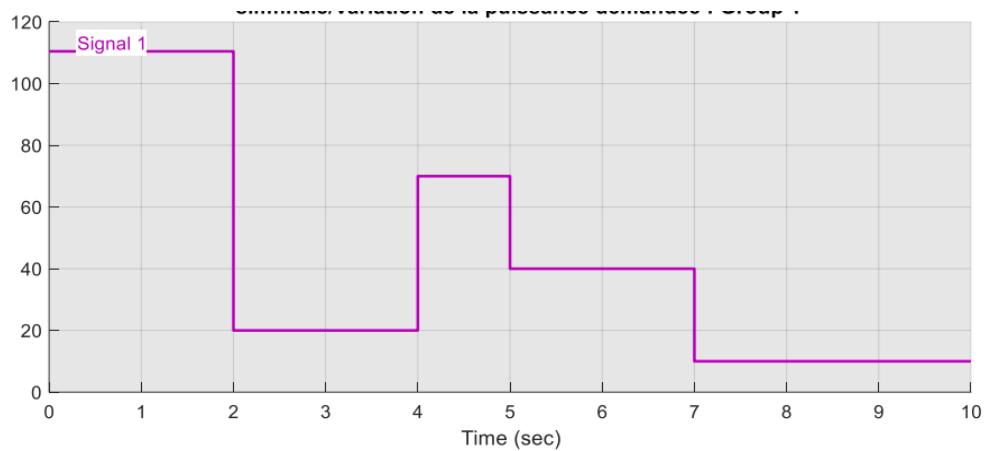
Figure III.8 : schéma de simulation

## La gestion d'énergie et résultat de simulation

Pour évaluer la performance de l'algorithme de gestion d'énergie, nous effectuons une simulation dans l'environnement Simulink/Matlab en utilisant les données suivantes :

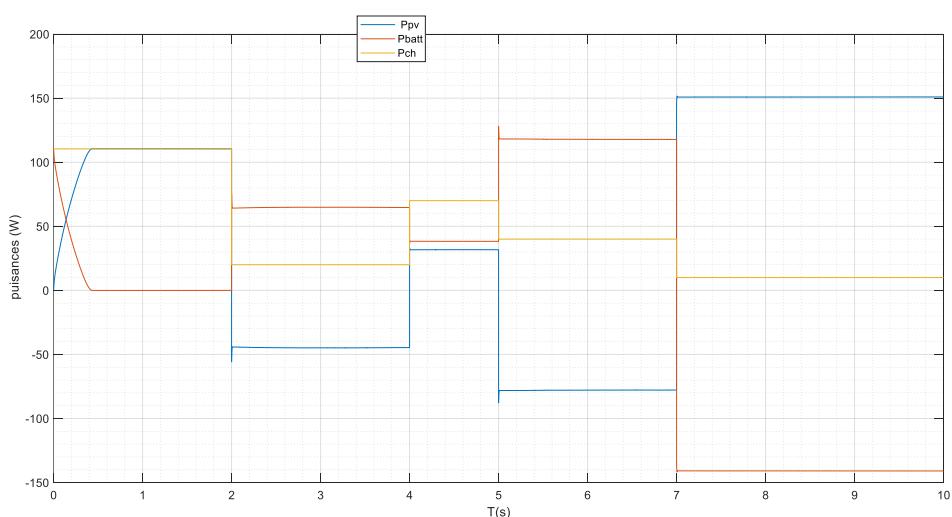


**Figure III.9** : profil d'ensoleillement.

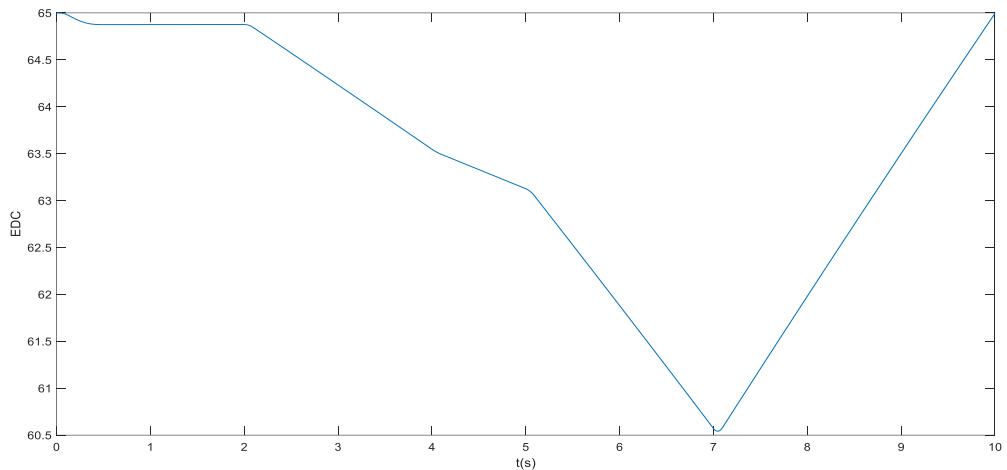


**Figure III.10** : profil de charge

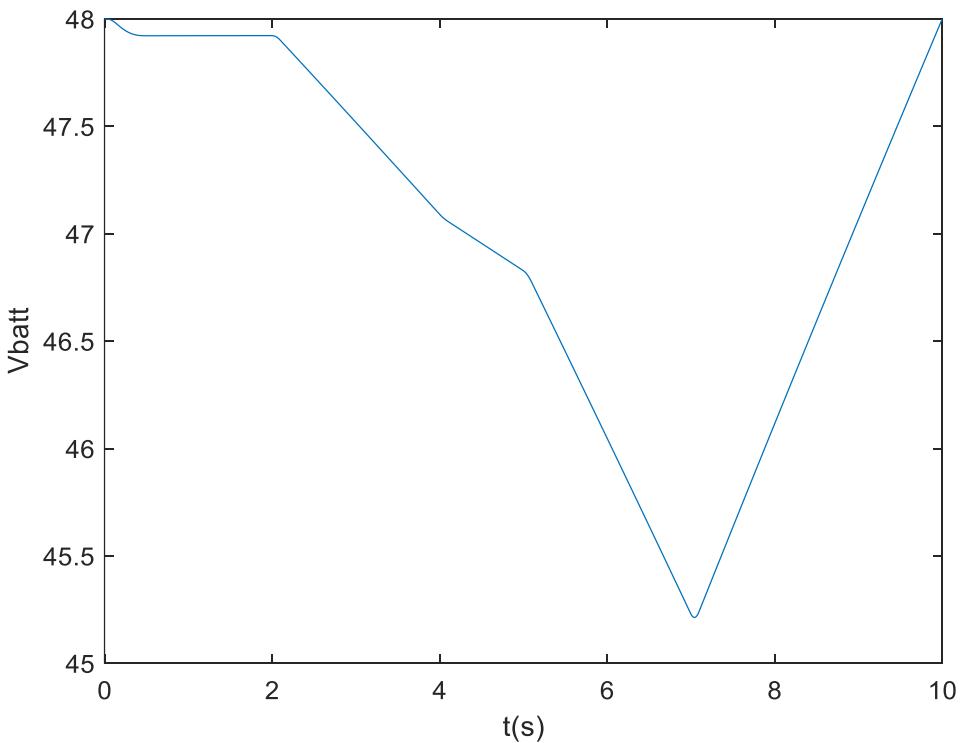
### III.2.1.1. Résultats des simulations :



**Figure III.11** : Puissance photovoltaïque, batteries et de la charge



**Figure III.12 :** L'état de charge de la batterie



**Figure III.13 :** Tension de la batterie

### III.3. Interprétation des résultats :

- $t=1s$  jusqu'à  $t=2s$  : A cet instant on remarque que les deux puissances  $P_{pv}$  et  $P_{pch}$  sont congruentes, qui signifie que la charge s'alimente directement avec l'énergie produite par le panneau photovoltaïque et la batterie sera automatiquement déconnectée.
- $t=2s$  jusqu'à  $t=7s$  : durant cette période la puissance photovoltaïque est inférieure à la puissance demandée par la charge, donc le manque de puissance sera compensé par la

## La gestion d'énergie et résultat de simulation

---

batterie étant donné que l'état de charge de la batterie est supérieur à  $EDC_{min}$  (30%) selon la Figure (III.12).

- t=7s jusqu'à t=10s : la puissance de panneau photovoltaïque est supérieure à la puissance demandée par la charge selon la Figure (III.11), et l'état de charge de la batterie est inférieur à  $EDC_{max}$ (90%) dans ce cas on observe que la charge est alimentée et la batterie est entrain de se charger.

### Conclusion :

Ce chapitre présente une simulation individuelle ensuite un algorithme de gestion de l'énergie pour un système PV avec capacité déstockage. On peut en déduire que ces résultats de simulation sont d'une importance capitale dans la gestion de ce genre d'installation pour le rentabiliser dans de plusieurs contextes différents.

### Conclusion générale

Dans cette étude, nous avons réalisé la modélisation d'une cellule photovoltaïque et nous avons optés pour le modèle à diode qui est le plus couramment utilisé en raison de la qualité de ses résultats obtenus, et On a fait une étude sur l'énergie piézoélectrique et la modélisation de son modèle électrique.

Dans cette perspective, nous avons exposés les différents systèmes d'énergies renouvelables, notamment les systèmes photovoltaïques et piézoélectriques. De plus, nous avons exposé en général leurs principes de conversion vers l'énergie électrique.

Après avoir fait la modélisation d'un générateur photovoltaïque, nous avons vu le comportement du système photovoltaïque (caractéristique puissance-tension et les caractéristique courant-tension) par rapport à la variation de l'éclairement ( $G$ ) et la température ( $T_c$ )

Pour optimiser la performance du système proposé, nous avons choisi de recourir à la méthode MPPT pour les perturbations et l'observation. Dans ce mémoire, les résultats montrent que l'utilisation de cette commande permet d'améliorer les performances des systèmes photovoltaïques.

Finalement nous avons illustré la simulation de gestion globale de l'énergie photovoltaïque sous Matlab-Simulink, avec l'association d'une batterie. Cette dernière nous a montré la façon dont la puissance sera distribuée selon différents modes de charge.

Durant notre travail nous avons rencontré plusieurs problèmes. Le premier est manque d'informations sur le piézoélectrique ce qui nous a empêchés de réaliser sa simulation.

Il serait aussi intéressant en simulation d'enrichir ce travail par plus de recherches et investigations.

## Bibliographie

- [1] ROBERT Jérôme "FABAS Laurent, Guide de la maison économe", Edition Eyrolle, Paris 2008.
- [2] Ministère de la Transition Écologique, "Énergies renouvelables", [ecologie.gouv.fr](https://www.ecologie.gouv.fr) 2022.
- [3] Énergies Renouvelables, "Actualités et ressources sur les énergies propres", [energies-renouvelables.org](https://energies-renouvelables.org) 2022.
- [4] FEDDAOUI Omar "Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération, Application aux Energies Renouvelables" Mémoire de magister, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras 2014.
- [5] N. BOUKHETAIA, J. FYOT, H. HOLIN «Biomasse énergie "L'industrie des énergies décarbonées, 2010
- [6] XPair, "Énergie hydraulique – Définition", [xpairs.com](https://xpairs.com) 2022.
- [7] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de L'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003
- [8] S. Haffen, "Caractéristiques Géothermiques du Réservoir Gréseux du Buntsandstein D'Alsace", Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, Septembre 2012.
- [9] GUEMOUNI Brahim et MESSAHLI Ramzy, «Application des différentes techniques de reconfiguration d'un générateur photovoltaïque sous un ombrage partiel» Mémoire de master, Université Université A. MIRA-BEJAIA 2022.
- [10] Connaissance des Énergies, "Portail sur les énergies", [connaissancedesenergies.org](https://connaissancedesenergies.org) 2022.
- [11] Énergir, "Énergie solaire", [energir.com](https://energir.com) 2022.
- [12] TARGANT Lyes et Mr KHALEF Sofiane « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique » UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2017/2018
- [13] M.N. Mchalikh et Ch. Hmada "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau" Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [14] AouchacheFakhreddine (méthode iterative pour la modélisation et la conception des Composants) mémoire de master université Larbi ben M'hidi d'Oum el Bouaghi 2014 .
- [15] Azoui (Systèmes photovoltaïques) Notes de cours Master Energies renouvelables, université Batna ,2019/2020

## Bibliographie

---

- [16] Belhadj Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008
- [17] Curie, P. & Curie, J. (1880), Lippmann, G. (1881), & Voigt, W. (1918). Découverte et développement de la piézoélectricité
- [18] E, Boucher. Elaboration et caractérisation de céramiques PZT Bi-Substituees
- [19] P; V, Lambeck, ET G; M, Jonker. Ferroelectric domain stabilization in BaTiO<sub>3</sub> by bulk ordering of defects. Ferroelectrics. Vol. 22, p. 729-731. (1978)
- [20] Electricity & Magnetism, "5 types de matériaux piézoélectriques les plus courants", [electricity-magnetism.org](http://electricity-magnetism.org) [2022].
- [21] Tools Research, "What is piezoelectric ceramics?", [toolsresearch.com](http://toolsresearch.com) 2022.
- [22] Wikipédia, "Piézoélectricité", [fr.wikipedia.org](http://fr.wikipedia.org) 2022.
- [23] HICHEM NOUIRA, « Contribution à la conception d'un micro-convertisseur d'énergie Mécanique vibratoire en énergie électrique », thèse de doctorat, université de FRANCHE – COMTE, 2008
- [24] PZT Piezo, "The Principle and Application of Piezoelectric Materials", [pztpiezo.com](http://pztpiezo.com) 2022.
- [25] GHALMI.Z. «Contribution au développement d'un capteur ultrasonique pour mesurer l'épaisseur de la glace» Thèse en doctorat présenté à l'université du Québec à Chicoutimi Mars 2006. Modélisation non linéaire de leur comportement en contrainte et en champ électrique
- [26] Belaidsofia «énergie solaire photovoltaïque» cour master 2 énergie renouvelable, université de Bejaia 2014/2015
- [27] TATI Fethallah BEN LAMOUDI Oussama « Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue» UNIV OUARGLA
- [28] Bellil.A et yagouni.y « optimisation d'un système photovoltaïque par la logique floue» mémoire de master université de Bejaia 2019/2020
- [29] Abid Manel et Ammari Hana, 'Détection des ondes élastiques dans les matériaux piézoélectriques', Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, 2020.
- [30] ACHOURI.B et SLAIM.D « Commande Basée Sur la Passivité et l'assignation d'interconnexion et d'amortissement d'un Générateur Photovoltaïque » mémoire de master université Bejaia 2013
- [31] Akassewa Tchapo SINGO « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride Pour l'habitat énergétiquement autonome » université Nancy février 2010

## **Bibliographie**

---

[32] LOUAILECHE Chahla et IMLOUL Laria «Etude d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage» mémoire de master univ-bejaia 2017/2018

## Résumer

L'objectif de ce travail est l'étude générale sur la piézoélectrique et la modélisation et simulation d'un système photovoltaïque avec la gestion d'Energie se basant sur un convertisseur (dévolteur - survoltEUR) ce système fonctionne à une puissance maximale avec l'utilisation d'un convertisseur DC-DC (survoltEUR) commandé par technique MPPT. Avec l'utilisation de l'environnement Matlab Simulink pour faire la simulation

**Mots clés :** système photovoltaïque, gestion d'énergie, technique MPPT, convertisseur (dévolteur -survoltEUR), Convertisseur (DC-AC), simulation, Matlab Simulink

## Abstract :

The objective of this work is the general study of piezoelectrics and the modeling and simulation of a photovoltaic system with Energy management based on a converter (devolver - booster) this system operates at maximum power with the use of a DC-DC converter (booster) controlled by MPPT technique. Using the Matlab Simulink environment for simulation.

**Keywords:** photovoltaic system, energy management, MPPT technique, converter (step-down - step-up), Converter (DC-AC), simulation, Matlab Simulink