

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE 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**

**Présenté pour obtenir**

**LE DIPLOME DE MASTER**

**Filière : Automatique**

**Spécialité : Automatique et informatique industriel**

Par

- Benchikouche Hadjira
- Khoudour Khaoula

**Intitulé :**

**Commande MPPT D'un Générateur Hybride PV/TEG**

Soutenu le :Septembre 2022

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
KHENFER Riad.	MCA	Président	Univ-BBA
BENHADOUGA Seddik	MCA	Encadreur	Univ-BBA
LAYADI Toufik Madani	MCA	Examineur	Univ-BBA

Année Universitaire 2021/2022

## *Remerciements*

Nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce travail.

Nous adressons aussi notre sincère sentiment de gratitude à notre promoteur le docteur **BENHADOUGA SEDIK** qui nous a guidé et orienté durant toute cette période.

À l'ensemble des enseignants du département des sciences et de la technologie et plus particulièrement ceux de la spécialité automatique et informatique industrielle.

Nous tenons également à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Nous espérons que ce mémoire servira d'exemple et de support pour les années à venir.

Finalement un grand merci à ceux qui ont fait l'honneur de juger ce mémoire.

## *Dédicace*

*Nous dédions ce travail à :*

*Nos parents, et le dévouement dont ils font preuve. A nos familles et amis(es), et à tous qui nous sont chers.*

*Hadjira & Khaoula*

# Table Des Matières

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I. Introduction générale

I.1. Introduction

I.2. Les énergies renouvelables

I.2.1. L'énergie solaire

I.2.1.1. Énergie solaire thermique

I.2.1.2. Énergie solaire photovoltaïque

I.2.2. Énergie éolienne

I.2.3. Énergie Hydraulique

I.3. Énergie solaire photovoltaïque

I.3.1: Description de la cellule

I.3.2. L'effet photovoltaïque

I.3.3. Type de cellule photovoltaïque

I.3.3.1. Les cellules mono-cristallines

I.3.3.2. Les cellules poly-cristallines

I.3.3.3. Les cellules amorphes

I.3.4. Circuit équivalent et modèle mathématique

**I.4. Module PV**

I.4.1: Panneaux PV

I.4.2: Générateur PV

I.4.3: Les caractéristiques d'un module PV

I.4.3.1 : La tension en circuit ouvert

I.4.3.2. Le courant de court-circuit

I.4.3.3. La puissance maximale

I.4.3.4. Le rendement

I.4.3.5 Le facteur de forme

I.5. Les différents types du système PV

I.5.1. Systèmes autonomes

I.5.2. Systèmes hybrides

I.5.3. Système PV accordée au réseau

I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

I.6.1. Les Avantages

I.6.2. Inconvénients et Limite

I.7. Le thermoelectric generateur :

I.7.1. Les generateurs thermoelectrique

I.7. Le thermoelectric generateur :

I.7.1. Les generateurs thermoelectrique

I.7.2. Effets thermoelectriques

I.7.2.1. Effet Seebeck

I.7.2.2. Effet Peltier

I.7.2.3. Effet Thomson

I.7.2.4. Effet Joule

I.7.3. Conversion d'énergie par effet thermoelectrique

I.7.3.1. Generation d'énergie par effet de Seebeck

I.7.3.2. Refrigeration par effet de Peltier

I.7.4. Types de generateurs thermoelectriques :

I.7.4.1. Generateur thermoelectrique massifs

I.7.4.2. Generateur thermoelectrique en couche mince

I.7.4.3. Generateur thermoelectrique sur substrat souple Green TEG

I.7.5. Applications

I.7.6. Les equations mathematiques de TEG

I.8. Conclusion

Chapitre 2 : Les convertisseurs statiques et la commande MPPT "P&O"

II. Introduction :

## II.1. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

### II.1.1. Les types des convertisseurs DC-DC

## II.2. Poursuite du point de puissance maximale

### II.2.1 Définition

### II.2.2. Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum MPPT

## II.3. Classification des Commandes MPPT

### II.3.1. MPPT indirecte

### II.3.2 MPPT Directe

### III.3.3. Principe de la commande MPPT

## III.4. Commande « Perturbation et Observation » (P&O)

### III.4.1. Principe de la méthode P&O

### III. 4.2. Algorithme de la méthode P&O

## III.5. Application de la commande (P&O) sur un système PV/TEG

## III.6. Conclusion

## Chapitre III : Résultat et discussions.

### III. Introduction

### III .1. Simulation du système photovoltaïque.

#### III.1.1. Description du système à simuler

#### III.1.2. Influence de température et de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V

##### III.1.2.1. Effet de la variation de la température

##### III.1.2.2. Effet de la variation d'irradiation

### III.2. Simulation de TEG

#### III.2.1. Simulation de TEG

#### III.2.2. L'association des modules teg serie/parallele sans MPPT

### III .2.3. Résultats de simulation de la commande MPPT

#### III.2.3.1. Le Generateure PV avec TEG

#### III.2.3.2. Application de MPPT pour un système PV/TEG

## III.4. Conclusion

## III.5. Conclusion générale

## Table Des Figures

**Figure (1.1) :** Description d'une cellule.

**Figure (1.2):** Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque .

**Figure (1.3):** mono-cristallines

**Figure (1.4):** poly-cristallines

Figure (1.5): amorphes

**Figure (1.6) :** Modèle électrique équivalent à la cellule solaire.

**Figure (1.7.a) :** Module photovoltaïque

**Figure (1.7.b) :** Vue en coupe d'un module PV.

**Figure( I.8) :** Influence de la température sur le courant PV

**Figure(I.9) :** Influence de la température sur la puissance sur le GPV

**Figure (I.10) :** Influence de l'ensoleillement sur le courant PV

**Figure( I.11):** influence de l'ensoleillement sur puissance.

**Figure( I.12): :** Schema de principe de l'effet Seebeck

**Figure( I.13):** Schema de principe de l'effet Peltier

**Figure( I.14):** Schema de principe de l'effet Thomson pour  $\tau < 0$  (a) et  $\tau > 0$

(b)

**Figure( I.15):** Generateur thermoelectrique massifs EurekaMesstechnik.

**Figure( I.16):** Generateurs thermoelectrique en couche mince Micropelt.

**Figure( I.17):** Generateur thermoelectrique sur substrat souple Green TEG.

**Figure (II.1) :** Symbole d'un convertisseur DC-DC

**Figure (II.2) :** Schémas de principe d'un hacheur parallele

**Figure(II.3) :** Schéma du hacheur Buck

**Figure (II.4) :** Schemas de principe d'un hacheur serie-parallèle (buck)

**Figure( II.5).** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge

**Figure (II.6):** Organigramme de classification des commandes MPPT.

**Figure(II.7) :** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

**Figure(II.8) :** Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O

**Figure(II.9) :** Organigramme de l'algorithme P&O.

**Figure(II.10) :** schéma globale d'un système PV/MPPT/TEG

**Figure (III.1) :** Schéma de simulation d'un panneau PV étudié MSX-60

**Figure(III.2) :** Courbe des caractéristiques du I-V du panneau.

**Figure (III.3) :** Courbe des caractéristiques du P-V du panneau

**Figure(III.4) :** Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs de température

**Figure (III.5) :** Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs d'irradiation

**Figure (III. 6):** schema d'un TEG

**Figure(III. 7):** Shema interne d'un bloc de TEG

**Figure (III.8) :** La caractéristique puissance/tension pour 10 teg

**Figure (III. 9) :** La caractéristique courant/tension pour 10 teg

**Figure(III .10) :** Le champ d'un thermoélectrique générateur

**Figure (III.11) :** les caractéristique p-v

**Figure (III.12) :** les caractéristique I-V

**Figure (III.13):** Shéma d'un GPV associé avec un champ des teg

**Figure(III.14) :** les caractéristique de puissance en fonction de tension

**Figure(III.15) :** les caractéristique de puissance en fonction de tension

**Figure(III.16) :** le système globale d'application mppt avec pv/teg

**Figure(III.17) :** Obtention d'un signal (PWM).

**Figure(III.18) :** Les résultats globale de système(pv-teg-mppt-boost)

## Table Des Tableaux

**Tableau 1 : Spécifications du module PV Solare MSX-60**

**Tableau( III.2). Paramètres du convertisseur DC/DC BOOST**

### I. Introduction générale

L'énergie est l'élément essentiel pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'humanité. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique sans cesse d'augmenter, la crainte d'une pollution d'environnement de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité ; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle permet à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche de suivi de point de la puissance maximale ( MPPT).

Dans la plupart des systèmes de conversion des énergies PV, il existe une technique particulière s'appelle « maximum power point Tracking ». Cette technique, comme son nom l'indique, permet de tirer le point maximum de la puissance que le panneau est apte à fournir. La puissance recherchée dépend généralement du changement de conditions climatiques telles que l'irradiation et la température. Par conséquent, la technique MPPT, destinée à contrôler le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, est nécessaire pour le fonctionnement optimal du système PV dans différentes conditions d'exploitation [1].

Plusieurs laboratoires travaillent sur les matériaux en cherchant à maximiser et d'améliorer l'efficacité énergétique, y a compris les générateurs thermoélectriques (TEG) qui à grande échelle. Au quotidien, une quantité importante d'énergie thermique est perdue principalement dans les secteurs des transports et de l'industrie. Pour récupérer une partie de cette chaleur perdue, on peut utiliser un générateur thermoélectrique en anglais ( Thermoelectric generator ) qui peut directement convertir l'énergie thermique en électricité grâce à un mécanisme appelé « effet Seebeck ». Les dispositifs thermoélectriques peuvent également transformer le courant électrique en un gradient de température « effet Peltier » qui peut être utilisé pour le chauffage ou le refroidissement.

L'objectif de notre mémoire est de proposer et d'améliorer un système hybride (PV-BOOST-MPPT) par l'association des générateurs thermoélectriques avec l'une des techniques MPPT nommé perturbant et observe (P&O), puis va discuter les résultats de simulations obtenues.

Le mémoire présenté est organisé en trois chapitres :

➤ Dans le premier chapitre, nous avons abordé les systèmes photovoltaïques en général, la production de cellules solaires, ainsi que l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement, puis en va donner en détail les bases des générateurs thermoélectriques.

## I. Introduction générale

---

➤ Dans le deuxième chapitre, nous allons examiner les différents types de convertisseurs statiques (DC-DC ). Le convertisseur sera consacré à la modélisation dans notre étude et le convertisseur statique BOOST qui sera contrôlé par la commande MPPT.

➤ Dans le troisième chapitre, nous allons donner en détail les résultats de simulations du générateur hybride PV/TEG. Et à la fin de ce chapitre nous donnons les interprétations sur les résultats trouvés.

### I.1. Introduction

Les énergies renouvelables est l'énergie qui ne se terminent pas avec le temps et qui sont disponibles en grande quantité. Elles ne produisent pas d'émissions polluées pendant la phase d'exploitation, Et les cinq formes d'énergies renouvelables les plus importants sont la géothermie, la biomasse, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque, c'est la dernier (L'énergie solaire photovoltaïque) provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette transformation d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut changer en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule photovoltaïque.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale (MPP) [2].

Ce chapitre commence par une introduction sur les énergies renouvelables puis la description de la cellule et leurs principes de fonctionnement et les cellules solaires les plus utilisées, ainsi que la modélisation d'une cellule photovoltaïque (CPV), l'influence des différents paramètres métrologiques (la température et l'éclairement). Vers la fin, on va présenter le générateur thermoélectrique et citer quelques avantages et inconvénients de ce dernier.

### I.2. Les énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance dans ces dernières années pour de multiples cas. L'environnement et la question politique du réchauffement de la planète ont engendré une forte poussée pour l'exploitation des ressources d'énergie renouvelables en tant que méthode de réduction des émissions de dioxyde de carbone par le remplacement des ressources énergétiques hydrocarbonés [5]. Une énergie est dite renouvelable si elle est produite à partir de ressources inépuisables. Toutes les énergies sont issues du soleil, directement (énergie solaire) ou indirectement (énergie éolienne, hydraulique et biomasse), les énergies issue du magma terrestre (géothermie) et les énergies issue de la gravitation (énergie marémotrice). Les diverses énergies que l'on pourrait tirer des océans, telles que l'énergie de la houle, des courants marins ou du gradient thermique des mers, sont également issues indirectement de l'énergie solaire et font partie du champ des énergies renouvelables [6]. Leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de gaz à effet de serre ou à des déchets dangereux. La production d'électricité décentralisée via des énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère intermittent des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation de ces systèmes de récupération d'énergie [7].

### **I.2.1.L'énergie solaire**

Ce terme désigne l'énergie donné par les rayons du soleil. Les rayons sont constitués de photons, vecteurs d'énergie. L'énergie du rayonnement solaire parvenant au sol s'emploie aujourd'hui pour désigner l'électricité solaire et l'énergie thermique obtenues à partir de l'exploitation du rayonnement du soleil. Les principales exploitations de l'énergie solaire sont l'énergie solaire thermique, thermodynamique et photovoltaïque. L'énergie solaire permet de chauffer un bâtiment ou un chauffe-eau grâce à des capteurs thermiques, mais aussi de produire de l'électricité. Elle utilise la chaleur transmise par le rayonnement, alors que l'énergie photovoltaïque utilise le rayonnement lui-même [8].

#### **I.2.1.1. Énergie solaire thermique**

Elle désigne l'énergie récupérée sous forme de chaleur à partir de la lumière du soleil. L'énergie solaire thermique peut être utilisée de façon passive ou active. On parle de solaire thermique passif pour les installations permettant de chauffer directement un bâtiment par ses surfaces vitrées (effet de serre) et/ou l'accumulation de chaleur sur des murs exposés au rayonnement solaire. Le solaire thermique actif consiste à récupérer la chaleur du soleil dans des panneaux solaires ou capteurs solaires thermiques dans les quels circule un fluide caloporteur. Ce fluide chauffé dans les panneaux solaires peut stocker sa chaleur dans un ballon à accumulation qui alimente ensuite un circuit de chauffage [9].

#### **I.2.1.2 Énergie solaire photovoltaïque**

Le mot photovoltaïque est un mariage de deux mots : le mot grec « photo », qui signifie lumière, et « voltaïque », qui signifie l'électricité. La technologie photovoltaïque utilisée pour décrire le matériel qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de la lumière (photons) en électricité par le biais des matériaux semi-conducteurs, il a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel, grand père d'Henri Becquerel qui a découvert en 1896 la radioactivité. Les modules photovoltaïques (PV) qui effectuent cette conversion ont de nombreux avantages, ils sont durables, fiables et nécessitent un entretien minime, car ils n'ont pas de pièces mobiles. Ils sont également totalement silencieux et ne nécessitent que la lumière du soleil comme combustible. Le cœur du photovoltaïque (PV) est un matériau semi-conducteur qui peut être adapté pour libérer des électrons, ces derniers sont les particules chargées négativement qui forment la base de l'électricité. Le matériau semi-conducteur le plus couramment employé dans les cellules photovoltaïques est le silicium, un élément le plus souvent trouvé dans le sable. Les cellules au silicium cristallin (près de 84 % de la production 2001) ont un rendement de 12 à 16 %, soit avec une valeur typique de 12 %, un mètre carré recevant 1 kW peut délivrer 120 W électriques [10], [11].

### **1.2.2 Énergie éolienne**

L'énergie éolienne est une source d'énergie employée depuis des milliers d'années pour des tâches telles que la propulsion des navires à voile, moudre le grain, pompage de l'eau et l'alimentation des machines des usines. La première éolienne au monde utilisée pour produire de l'électricité a été construite par un Danois, Poul la Cour, en 1891. Malheureusement, ce n'est qu'après les années 1980 qu'un intérêt professionnel naît pour des applications importantes des énergies renouvelables [12], [13]. Cette ressource éolienne provient du vent, qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre : une différence de pression se crée entre certaines régions de la planète, en fonction du réchauffement ou du refroidissement local, mettant ainsi des masses d'air en mouvement. Exploitée depuis l'antiquité puis longtemps négligée, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette parmi toutes les énergies renouvelables avec un potentiel mondial de 30 10<sup>15</sup> kWh/an. La croissance vite de cette production décentralisée rend difficile la stabilisation du réseau électrique, en raison du déséquilibre entre production – consommation et plus souvent les parcs éoliens ne participent pas aux services systèmes (régulation de la fréquence et du plan de tension). La puissance éolienne produite au fil du temps est caractérisée par sa fluctuation due à sa source primaire imprévisible et très intermittente. Ceci limite l'intégration en grand nombre d'éoliennes dans le réseau et rend difficile leur participation aux services systèmes [3].

### **1.2.3 Énergie Hydraulique**

Comme l'énergie éolienne qui utilise la force du vent, l'énergie hydraulique est une énergie primaire utilisant la force du mouvement d'eau (chutes d'eau, cours d'eau, courants marin, marée, vagues). L'énergie hydraulique est une manifestation indirecte de l'énergie du soleil, comme beaucoup de sources d'énergies renouvelables sur terre, sa source est inépuisable mais contrairement à l'énergie du vent, les cours d'eau ne cessent de couler [14]. L'énergie hydraulique est une énergie permanente qui trouve son origine dans le cycle d'eau (évaporation-précipitation) causé par le rayonnement solaire sur le globe terrestre ainsi que la force gravitationnelle qui permet à l'eau de couler de haut en bas. L'énergie hydraulique est utilisée depuis l'antiquité sous forme d'énergie mécanique pour moudre le grain dans les moulins à eau placés le long des cours d'eau. Ce principe a été perfectionné pour actionner des forges, pour carder la laine, tanner les peaux, etc., au cours de l'époque préindustrielle. Actuellement, l'énergie hydraulique est essentiellement utilisée pour produire de l'électricité, on parle alors d'énergie hydroélectrique.

## **1.3.Énergie solaire photovoltaïque**

### **1.3.1: Description de la cellule**

C'est l'élément de base qui grâce à lui la conservation est faite par l'assemblage de plusieurs cellules, on peut atteindre la puissance que l'on veut.

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants [4].

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly-cristalline, ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe) [5] [4].

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des "impuretés") sont substitués à des atomes de silicium dans un réseau cristallin : c'est ce que l'on appelle le dopage :

- Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type "N" (ex : dopage au phosphore).
- Si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le Silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type "P" (ex : dopage au bore).

Une cellule solaire sera obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposées (jonction PN). Au voisinage de la jonction, un champ électrique apparaît provoqué par le déséquilibre de charges. Il va contribuer à drainer les électrons qui auront été détachés par l'énergie des photons (grains de lumière) incidents [4].

Pratiquement, la cellule PV est composée de plusieurs couches minces figure (1.1) à savoir :

- Une couche "antireflet" sur la face avant dont le but est de faciliter au maximum la pénétration d'un maximum de photons à travers la surface et de réduire les pertes par réflexion.
- Une grille conductrice avant " collectrice des électrons " qui doit également être liée au silicium et ne pas être sensible à la corrosion.
- Une couche dopée N avec porteurs de charge libres négatifs (électrons).
- Une couche dopée P avec porteurs de charge positifs (trous).
- Une surface de contact conductrice en métal (collectrice des électrons), ayant une bonne conductivité ainsi qu'un bon accrochage sur le silicium.

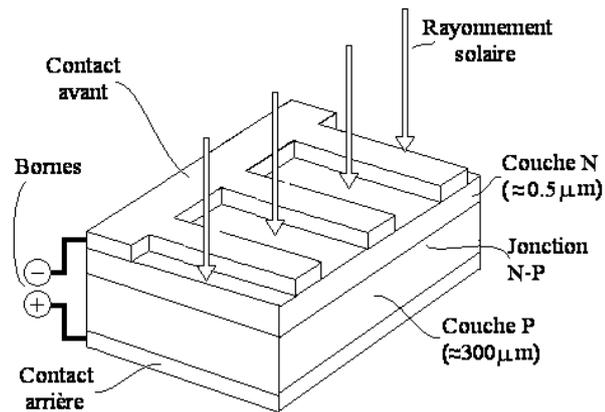


Figure (1.1) : Description d'une cellule.

### I.3.2. L'effet photovoltaïque

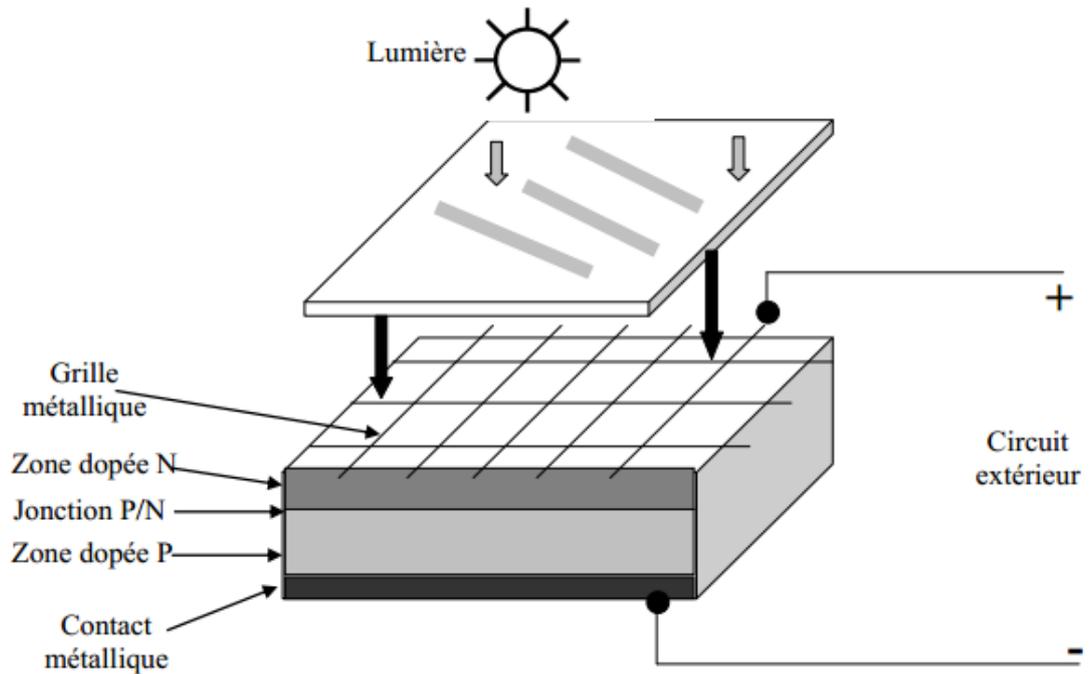
Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

« Phots », qui signifient lumière.

« Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827, inventeur de la pile électrique).

La conversion d'énergie solaire PV repose sur un phénomène physique appelé :

Effet photovoltaïque, qui est la conversion directe de la lumière en électricité quand des photons frappent une cellule faite généralement du silicium. Cette dernière est un composant électronique semi conducteur dans lequel l'absorption des photons, grains élémentaires de la lumière, libère des "électrons" chargés négativement et des "trous" chargés positivement. Ces charges électriques sont séparées par un champ électrique interne et collectées par une grille à l'avant et un contact à l'arrière. La cellule PV constitue ainsi un générateur électrique élémentaire (Figure 1.2).[6]



**Figure (1.2):** Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque .

### **I.3.3. Type de cellule photovoltaïque**

#### **I.3.3.1. Les cellules mono-cristallines**

On appelle cellule monocristalline une cellule issue d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Ce genre de cellule est rond, parfois presque carré, et possède une couleur uniforme.

Les panneaux à cellules monocristallines offrent un rendement de 14 à 18%. Leur méthode de production restant complexe et coûteuse (il faut beaucoup d'énergie pour obtenir du cristal de silicium pur), ces panneaux sont donc chers. [7]

#### **I.3.3.2. Les cellules poly-cristallines**

Les cellules poly-cristallines sont issues d'un bloc de silicium cristallisé en cristaux multiples. Elles ont souvent un aspect rectangulaire. [7]

Les panneaux solaires à cellules poly-cristallines ont un rendement plus faible que ceux à cellules monocristallines (de 11 à 15%). Leur coût de production étant moins élevé, elles offrent le meilleur rapport qualité/prix.

#### **I.3.3.3. Les cellules amorphes**

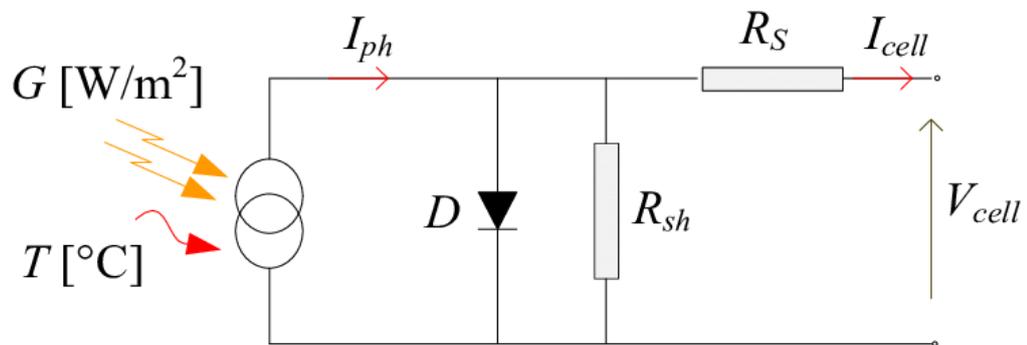
Les cellules photovoltaïques amorphes sont produites à partir d'un « gaz de silicium », qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Cette technique permet d'utiliser des couches très minces de silicium. Les cellules pv amorphes sont moins coûteuses à produire que les précédentes, mais leur rendement n'est que de 7 à 9%. [7]



**Figure (1.3):** mono-cristallines **Figure (1.4):** poly-cristallines **Figure (1.5):** amorphes

### I.3.4. Circuit équivalent et modèle mathématique :

La caractéristique I– V du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par un circuit équivalent. Il existe plusieurs modèles électriques de la cellule photovoltaïque, mais dans cette étude, nous utilisons le modèle schématisé dans par Figure II.3. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série  $R_s$  et parallèle  $R_p$  pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule [8].



**Figure (1.6) :** Modèle électrique équivalent à la cellule solaire.

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série  $R_s$  représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt  $R_p$  représente le courant de fuite. Une diode  $D$  en parallèle qui modélise la jonction PN. Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [9].

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q(V_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{n * K * T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_s)}{R_p} \quad (I.1)$$

Où :

$V_{pv}$  : Tension de sortie de la cellule (V),

$I_{pv}$  : Courant de sortie de la cellule (A),

$I_{ph}$  : Courant photo-généré ou photo-courant (A),

$I_{sat}$  : Courant de saturation de la diode (A),

$q$  : Charge d'électron  $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$  (C),

$k$  : Constant de Boltzmann ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K),

$T$  : Température absolue de fonctionnement de la jonction (K°),

$n$  : Facteur d'idéalité de la diode ( $n \in [1, 3]$ ),

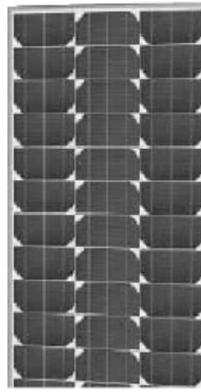
$R_s$  : Résistance série ( $\Omega$ ),

$R_p$  : Résistance parallèle ( $\Omega$ ),

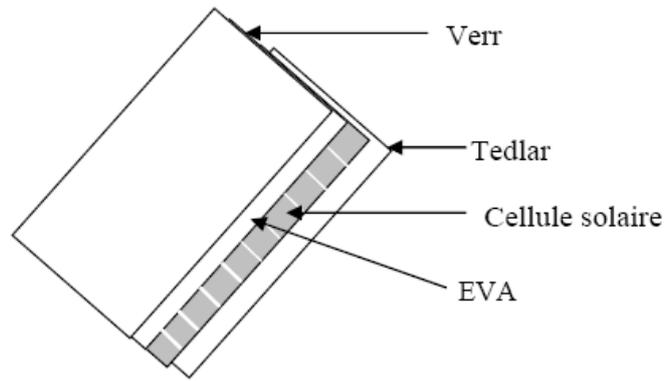
#### **I.4. Module PV**

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module **figure (1.7.a)**. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant [10].

Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) **figure (1.7.b)** et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [11].



(a)



(b)

**Figure (1.7.a) :** Module photovoltaïque d'un module PV.

**Figure (1.7.b) :** Vue en coupe

#### **I.4.1: Panneaux PV**

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en série (augmenté la tension) et en parallèle (augmenté le courant) pour former un panneau.

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants du panneau PV dépend :

- Des besoins en électricité
- De la taille du panneau
- De l'ensoleillement du lieu d'utilisation
- De la saison d'utilisation[12]

#### **I.4.2: Générateur PV**

Le câblage série/parallèle des panneaux est utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées, ce dernier que l'on appelle un central photovoltaïque.[12]

#### **I.4.3: Les caractéristiques d'un module PV**

##### **I.4.3.1 :La tension en circuit ouvert**

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à son borne, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement) [12].

#### **I.4.3.2. Le courant de court-circuit**

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une photopile en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit  $I_{cc}$ . De plus, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, le photocourant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau mis en œuvre, Ainsi, plus ces deux paramètres seront élevés, plus l'intensité produite sera grande [13].

#### **I.4.3.3. La puissance maximale**

L'objectif principal de l'utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible, c'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale  $U_m$  et à une intensité maximale  $I_m$ . Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC standard (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (Wc) [13].

#### **I.4.3.4. Le rendement**

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit  $S$  la surface du module et  $E$  l'éclairement en W/m<sup>2</sup>, ce rendement a pour formule [13] :

$$\eta = P_m S \times E \quad (I.2)$$

#### **I.4.3.5 Le facteur de forme**

Le facteur de forme est un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour évaluer la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{CC} \times V_{CO}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de révolution technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [14].

$$FF = P_m V_{CO} \times I_{CC} \quad (I.3)$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7, Il diminue avec l'augmentation de la température.

### **I.5. Les différents types du système PV**

Les systèmes PV sont composés selon les exigences en trois types : autonome, raccordée au réseau et hybride :

### **I.5.1. Systèmes autonomes**

Une installation photovoltaïque (PV) est dite autonome – ou isolée – quand elle n'est pas reliée à un réseau de distribution. Le système PV autonome permet de fournir du courant électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau. Donc l'énergie produite est utilisée immédiatement (pompage, l'éclairage, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée.

Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques [15].

Les performances des systèmes autonomes reviennent surtout sur l'état des batteries, c'est l'élément de base dans ces types des systèmes

### **I.5.2.Systèmes hybrides**

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés [16].

### **I.5.3.Système PV accordée au réseau**

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings», eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings [17].

Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs.

Dans les systèmes raccordés au réseau, c'est l'onduleur qui remplace les batteries, dans ce cas c'est l'élément de base dans ces types des systèmes.

## **I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque**

### **I.6.1. Les Avantages**

- Sa gratuité.
- Pas de pollution.

- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coût de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière.

### **I.6.2. Inconvénients et Limites**

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution.

la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.[18]

## **I.7.Le générateur thermoélectrique**

### **I.7.1.Les générateurs thermoélectrique**

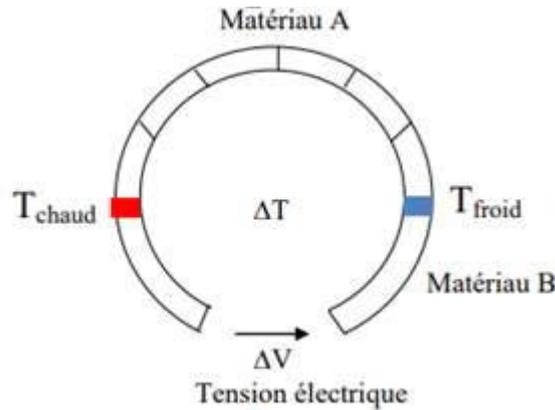
Les générateurs thermoélectriques permettent la conversion directe de l'énergie thermique en énergie électrique. Constitue d'un ensemble de modules thermoélectriques insérés entre deux échangeurs de chaleur. Chaque module thermoélectrique est ensuite constitué de quelques dizaines à certains couples de matériaux semi-conducteur qui permettent de convertir directement une partie de la chaleur qui les traversent en énergie électrique [19].

### **I.7.2.Effets thermoélectriques**

Les effets thermoélectriques décrivent l'interaction entre la chaleur et l'électricité dans les solides. Sur la base de ces effets, des dispositifs thermoélectriques ont été développés et utilisés pour la production d'énergie ou la réfrigération. Les effets thermoélectriques qui ont lieu dans un TEM comprennent : l'effet Seebeck, l'effet Peltier et l'effet Thomson. Ces trois effets sont liés par les relations de Kelvin. Ils représentent les fondamentaux de la thermoélectricité [20]

### I.7.2.1. Effet Seebeck

C'est un phénomène physique découvert par Seebeck en 1821. Il s'agit de la génération d'une tension électrique  $V$  aux bornes de deux jonctions de matériaux dissemblables, notes ici a et b, lorsqu'ils sont exposés à un gradient de température  $\Delta T = T_H - T_C$  (voir la Figure 1.12), où  $T_H$  et  $T_C$  désignent les températures des cotés chaud et froid, respectivement [20][21]



Figure( I.12): : Schéma de principe de l'effet Seebeck

La tension en circuit ouvert générée est donnée par la relation :

$$V_{OC} = \alpha_{ab} \cdot \Delta T \quad (I.4)$$

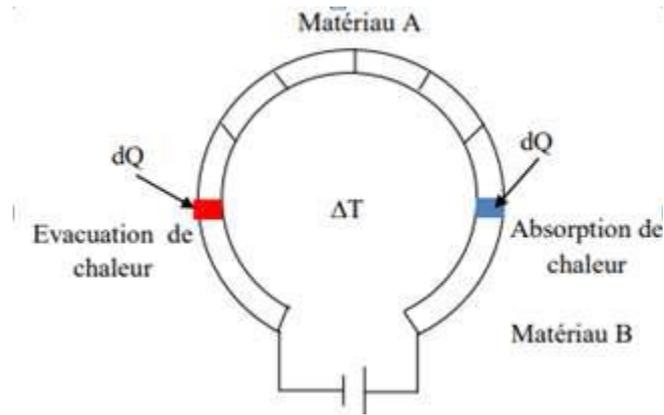
Le coefficient de proportionnalité  $\alpha_{ab}$  [ $V.K^{-1}$ ] est le coefficient Seebeck.

### I.7.2.2. Effet Peltier

De façon réciproque, le passage d'un courant au travers d'une jonction A-B entre deux matériaux va s'accompagner d'une libération ou d'une absorption de chaleur  $Q$  suivant le sens du courant (Figure 1.8). Cette absorption et ce dégagement de chaleur sont proportionnels à l'intensité du courant  $I$  qui les traverse, La quantité de flux de chaleur (absorbée/dissipée) d'une jonction à une autre jonction est donnée par :

$$QP = \pi_{ab} \cdot I \quad (I.5)$$

Où  $\pi_{ab}$  [ $W.A^{-1}$ ] est le coefficient Peltier relatif au couple de matériaux considérés. [20]



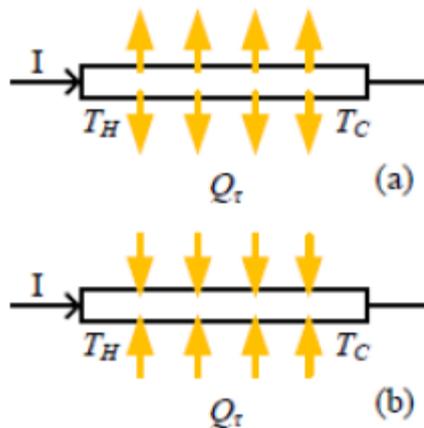
Figure( I.13): Schéma de principe de l'effet Peltier

### I.7.2.3. Effet Thomson

Un phénomène physique découvert par Thomson en 1851 contrairement aux effets Seebeck et Peltier, l'effet Thomson s'observe pour un matériau unique. Il représente l'absorption/dissipation de flux de chaleur  $Q$  résultant de l'action simultanée d'un gradient de température  $\Delta T$  et de la circulation d'un Courant électrique  $I$  dans un matériau voir la Figure (1.14) L'absorption/dissipation totale de flux de chaleur est donnée par :

$$Q_{\tau} = \tau \cdot \Delta T \cdot I \quad (I.6)$$

Ou  $\tau$  [ $W \cdot I^{-1} \cdot K^{-1}$ ] est le coefficient Thomson.



Figure( I.14): Schéma de principe de l'effet Thomson pour  $\tau < 0$  (a) et  $\tau > 0$  (b)

L'effet Thomson existe dans tous les dispositifs de conversion thermoélectrique et son influence peut être importante lorsque le gradient thermique appliqué à ses bornes est élevé La Figure 1.14 illustre le comportement d'un matériau selon que  $\tau < 0$  (a) ou  $\tau > 0$  (b) ; le matériau diffuse ou absorbe un flux de chaleur,

respectivement. L'effet Thomson est en général difficile à mettre en évidence car il est faible devant l'effet Joule [22].

#### **I.7.2.4. Effet Joule**

C'est un phénomène qui relie les aspects thermiques et les aspects électriques, découvert par Joule en 1843. Il apparaît lorsqu'un courant électrique  $I$  circule à travers un matériau. La chaleur dissipée par cet effet est quantifiée [20]

$$Q_j = R \cdot I^2 \quad (1.7)$$

Où  $R$  est la résistance électrique du matériau considéré.

#### **I.7.3. Conversion d'énergie par effet thermoélectrique**

Les applications qui exploitent les effets thermoélectriques sont classées sous deux catégories de la conversion d'énergie. Ces deux catégories sont la réfrigération thermique par effet de Peltier et la génération de l'énergie électrique par effet de Seebeck.

##### **I.7.3.1. Génération d'énergie par effet de Seebeck**

La génération d'énergie par un module thermoélectrique consiste à convertir une chaleur appliquée en un courant électrique par effet de Seebeck. Le générateur thermoélectrique est composé d'un ensemble de thermocouples mis électriquement en série et thermiquement en parallèle. Chaque thermocouple est formé par deux matériaux différents connectés entre eux par un connecteur métallique. Les deux plaques céramiques fonctionnent comme collecteur et évacuateur de chaleur pour, respectivement, la côté chaude et le côté froid. Elles sont des conducteurs de chaleur et des isolateurs électriques afin de ne pas court-circuiter les thermocouples. Le rendement de ce type de modules dépend de sa topologie et la qualité des matériaux thermoélectriques utilisés et la charge couplée sur sa sortie. [23]

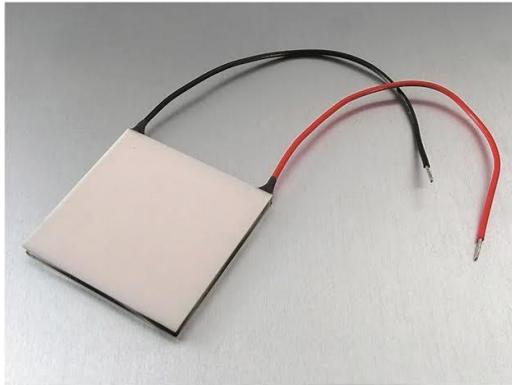
##### **I.7.3.2. Réfrigération par effet de Peltier**

La réfrigération thermique consiste à créer un cycle de pompage de chaleur entre deux côtés d'un module thermoélectrique en exploitant l'effet de Peltier

#### **I.7.4. Types de générateurs thermoélectriques**

##### **I.7.4.1. Générateur thermoélectrique massifs**

Un générateur thermoélectrique constitue le cœur de système de récupération d'énergie thermique. Plusieurs générations thermoélectriques existent à ce jour celles-ci se distinguent notamment par leurs méthodes de fabrication, même si les matériaux thermoélectriques employés sont communs. Les premiers générateurs réalisés appartiennent à la catégorie des générateurs dits massifs. Un exemple de générateur massif de la gamme proposée par Eureka Messtechnik est présent dans la figure suivante :



Figure( I.15): Générateur thermoélectrique massifs Eureka Messtechnik.

#### **I.7.4.2. Générateur thermoélectrique en couche mince**

L'essor des techniques de micro-fabrication permet aujourd'hui de réaliser des générateurs thermoélectrique aux dimension très inférieures aux générateurs massifs cette technologie offre la possibilité de cibler des applications impliquant des objets plus compacts de plus elle présente l'intérêt d'intégrer un nombre de paires d'élément semi-conducteurs p-n important un générateur massifs comporte en moyennes quelques dizaines de paires de jonction p-n par centimètre carré tandis qu'un générateurs en couche mince peut intégrer plus d'une certaine de paires de millimètre carré par conséquent ce type de TEG délivre des tensions exploitables a partir de gradients de température relativement faibles. En revanche le nombre important de paires de jonction p-n augmente la résistance électrique du générateur ce qui limite la puissance électrique générée



Figure( I.16): Générateurs thermoélectrique en couche mince Micropelt.

### I.7.4.3. Générateur thermoélectrique sur substrat souple Green TEG

D'autres générateurs peuvent être réalisés sur substrat souple Green TEG développe actuellement des générateurs thermoélectriques flexibles pour l'intégration dans une vanne de chauffage intelligente et à l'énergie autonome. Cette figure montre un exemple de ce type de fabricant Green TEG en différentes tailles et géométries cependant cette technologie.



Figure( I.17): Générateur thermoélectrique sur substrat souple Green TEG.

### I.7.5.Applications

Le concept de générateur thermoélectrique venant d'être expliqué précédemment, nous sommes maintenant en mesure de présenter les applications où il peut être utilisé. Les secteurs concernés par la génération thermoélectriques sont nombreux mais le niveau de maturité de cette technologie reste très hétérogène dans l'ensemble des secteurs. De plus chaque secteur ayant des spécificités et des contraintes qui lui sont propres, nous avons décidé de classer les TEG en six catégories différentes définies comme suit :

- La production d'électricité en milieu extrême, avec des sources de chaleur dédiées ;
- La récupération de chaleur perdue, l'objectif ici est de convertir l'énergie thermique perdue en électricité de manière à augmenter le rendement du système global ;
- La production d'électricité décentralisée ;
- La micro production, avec des puissances de l'ordre du mW ;
- La production solaire thermoélectrique. [24]

### I.7.6. Modélisation mathématiques de TEG

- La tension du générateur thermo électrique est :

$$V_{teg} = V_{oc} - R \cdot I_{teg} \quad (I.8)$$

• Le gradient de température applique sur un thermoélectrique générateur sous la forme suivante :

$$\Delta T_{teg} = T_h - T_c \quad (I.9)$$

• D'ou La tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  est donnée par :

$$V_{oc} = S. \Delta T = \alpha. k_{th}. (T_h - T_c) \quad (I.10)$$

Alors que le courant est calculé par :

$$I_{teg} = (V_{oc} - V_{teg}) / R_{teg} \quad (I.11)$$

• Finalement on trouve l'équation de la puissance comme suite :

$$P_{teg} = I_{teg}. V_{teg} \quad (I.12)$$

### **I.8. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque en observant les caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV ainsi que ses performances sous l'influence de quelques paramètres atmosphériques (température et ensoleillement) et quelque des avantage et inconvénients . Ensuite nous avons présente l'étude d'un générateur thermoélectrique et les différents effets thermoélectriques et leurs différents types ainsi leurs applications et le modèle mathématique d'un thermoélectrique.

Dans le chapitre suivant les différentes méthodes de commande MPPT pour la recherche De point maximal de puissance et les convertisseurs seront étudiés en détaille.

## II.1. Introduction

Les générateurs photovoltaïques sont reconnus par leur fonctionnement en large gamme de tension et courant de sortie, mais ils ne peuvent délivrer une puissance maximale. En effet, les variations climatiques qui influent sur la caractéristique I(V) entraînent la fluctuation de la puissance maximale. Pour cela il existe plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le MPP.

Ces commandes sont connues sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking), associées à un hacheur DC\DC qui assure le couplage entre le générateur et la charge. Nous n'examinerons que les convertisseurs de type élévateur (**Boost**) dans le cadre de cette étude. Après avoir déterminé la structure du convertisseur utilisé par la suite.

Le but de ce chapitre est de définir les types des convertisseurs statiques et une technique de commande MPPT (P&O) puis analyser le système de commande.

### II.1. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [25].

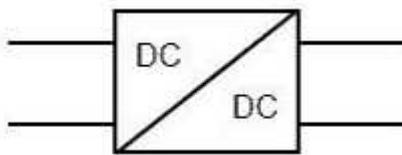


Figure (II.1) : Symbole d'un convertisseur DC-DC.

#### II.1.1. Les types des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [26]:

- ❖ convertisseur survolteur (hacheur survolteur ou parallèle).
- ❖ convertisseur dévolteur (ou série).

- ❖ convertisseur dévolteur- survolteur (hacheur série-parallèle).

Dans notre travail, on se limite au convertisseur type survolteur qui est également connu sous le nom d'élévateur de tension.

### a).Hacheur survolteur (parallèle)

Lorsqu'on souhaite augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur. Ce dispositif de l'électronique de puissance est un convertisseur continu-continu mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs. Le découpage se fait à une fréquence très élevée ce qui a pour conséquence de créer une tension moyenne. Pour un rapport cyclique «  $\alpha$  » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$V_s = \frac{V_e}{1-\alpha} \quad (\text{II.1})$$

La figure ci-dessous donne la forme la plus simple du hacheur BOOST.

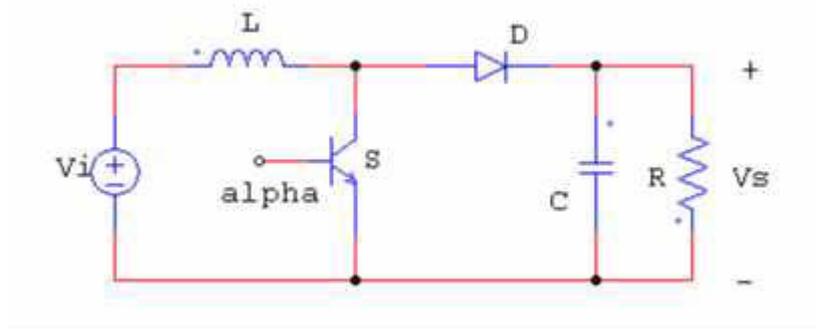
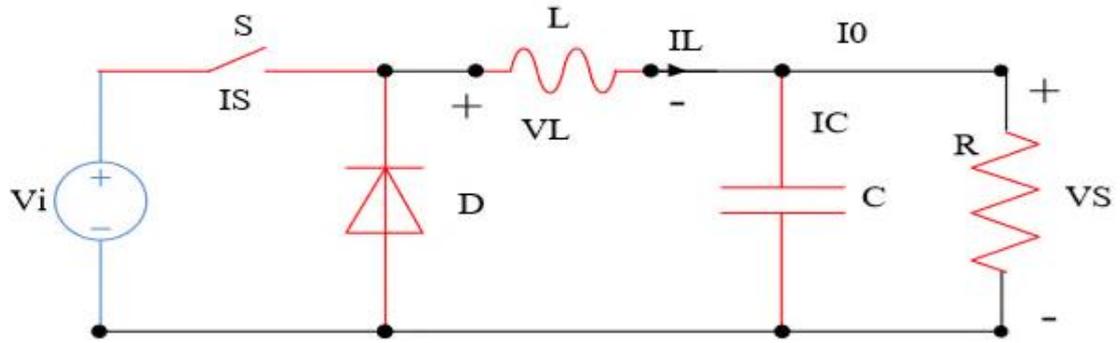


Figure (II.2) : Schémas de principe d'un hacheur parallèle

### b) Hacheur dévolteur (sérié)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $V_s$  est inférieure à celle de l'entrée  $V_e$ . Pour un rapport cyclique «  $\alpha$  » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$V_s = \alpha \cdot V_e \quad (\text{II.2})$$



Figure(II.3): Schéma du hacheur Buck.

### c) Hacheur mixte (série\_ parallèle)

Un convertisseur Buck-BOOST est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue de plus faible en une plus grande. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de bornes reliées au zéro, compliquant ainsi sa commande.

Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit :

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_e \quad (\text{II.3})$$

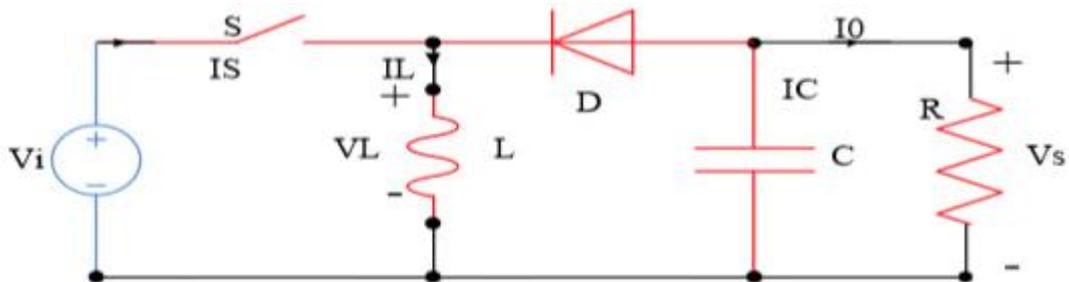


Figure (II.4) : Schéma de principe d'un hacheur série-parallèle

## II.2.Poursuite du point de puissance maximale

### II.2.1 Définition

La commande MPPT « Maximum Power Point Tracking » est une méthode permet au générateur PV de travailler à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques d'irradiations et de température Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  d'un convertisseur DC-DC à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

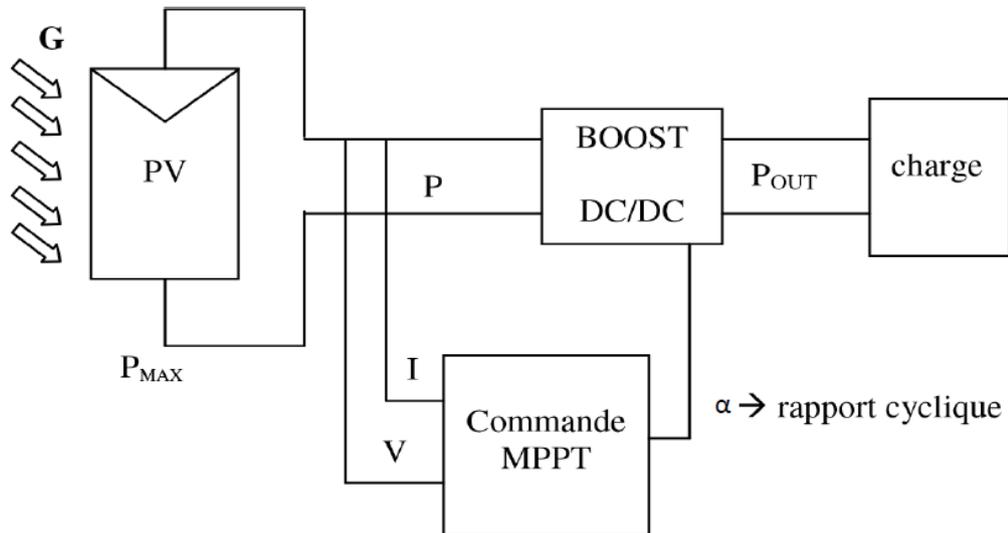
Les hacheurs sont utilisé comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge. A partir de cette règle et selon le type de contrôleur, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes, afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire [27].

### II.2.2. Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum MPPT

Pour la maximisation de puissance de la source PV, en intercalant un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie DC-DC entre la source PV et la charge et avec le contrôle rigoureux du rapport cyclique de ce dernier, Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le PPM du panneau PV et un suivi continu de la puissance maximale est assuré.

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95% [28].

La Figure (II.5) représente chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.



Figure( II.5).Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge

### II.3.Classification des Commandes MPPT

La classification peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirectes :

### **II.3.1.MPPT indirecte**

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{sc}$  ou  $V_{oc}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc.... [29]

### **II.3.2 MPPT Directe**

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV est indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance (InC)... [29]

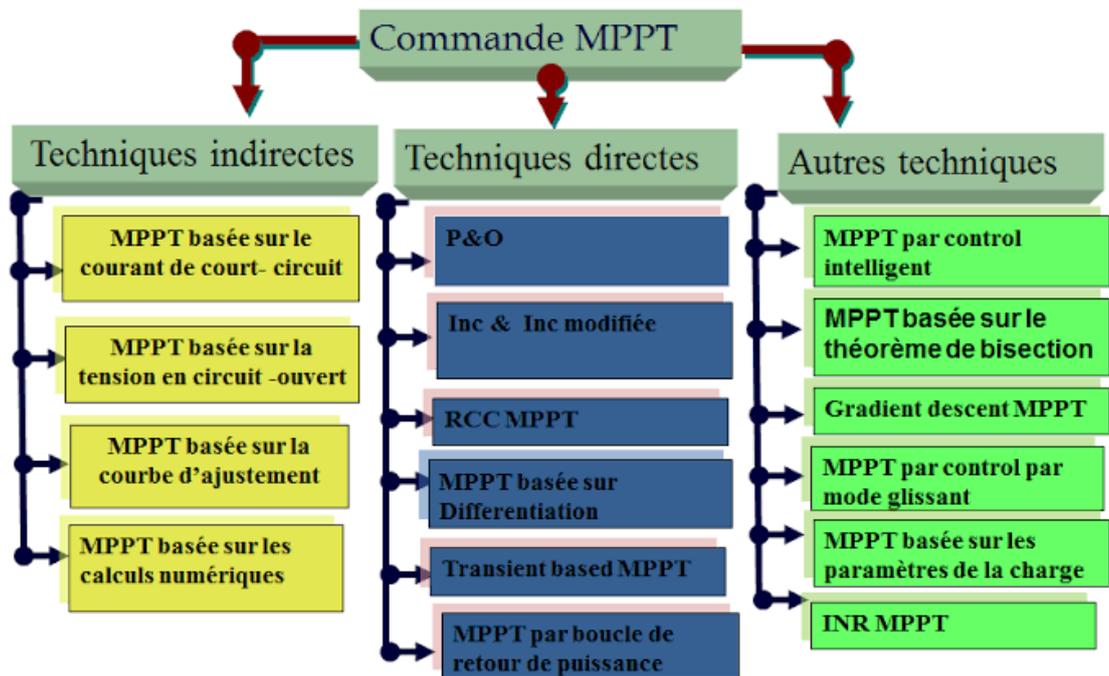
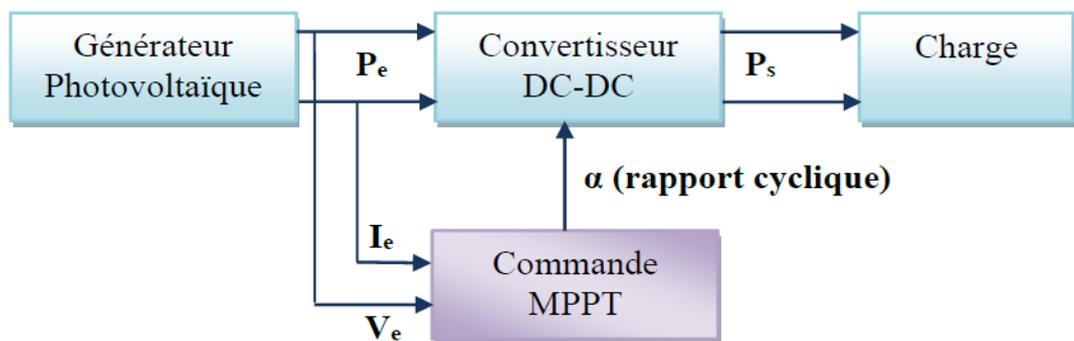


Figure (II.6): Organigramme de classification des commandes MPPT.

### II.3.3.Principe de la commande MPPT

La figure III.7 représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT



Figure(II.7) :Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

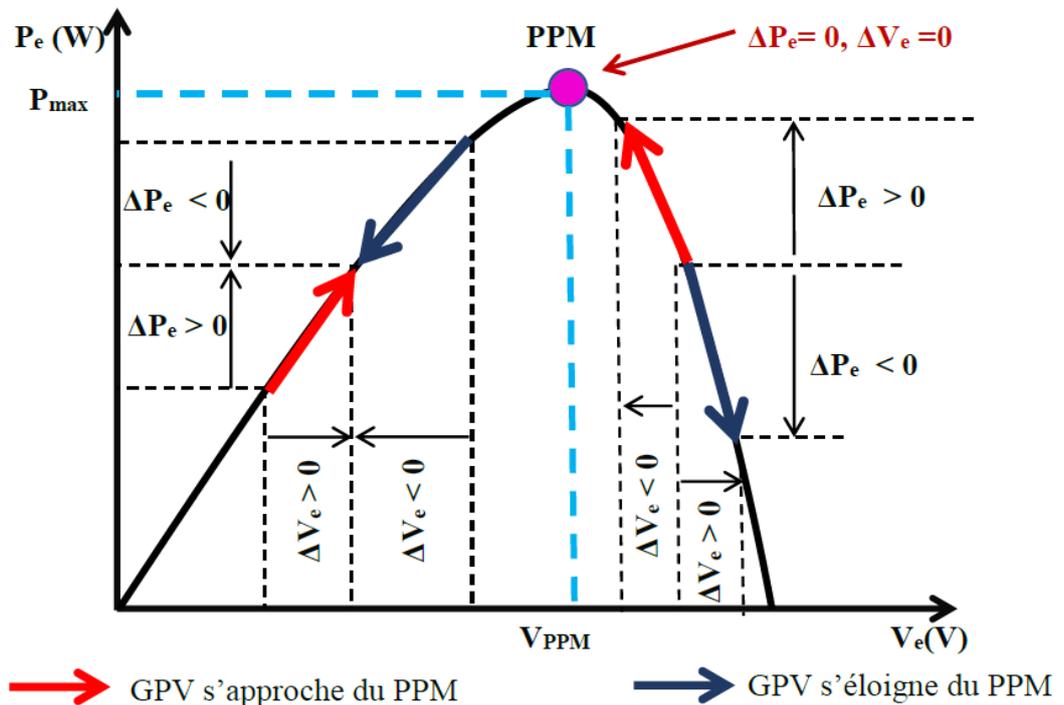
La commande MPPT permet de chercher le point de fonctionnement optimal du module photovoltaïque dans les conditions météorologiques variables. Ceci est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  du signal qui commande le convertisseur d'énergie, à une valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du module [28].

### III.4. Commande « Perturbation et Observation » (P&O)

La méthode de P&O est une approche largement répandue dans le domaine des techniques MPPT, car elle est simple. Elle exige seulement des mesures sur la tension aux bornes du panneau et son courant de sortie.

#### III.4.1. Principe de la méthode P&O :

Comme son nom l'indique, la méthode de P&O fonctionne par la perturbation de la tension de fonctionnement du panneau et l'observation de son impact sur le changement de la puissance à sa sortie. Le principe de cette commande est de générer des perturbations en diminuant ou en augmentant le rapport cyclique  $\alpha$  et d'observer l'effet sur la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque.



Figure(II.8) : Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O.

Ainsi, comme l'illustre la figure (II.8) pour différentes zones de fonctionnement, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [30].

On résume cette figure dans quatre cas :

- Premier cas :  $\Delta P_{pv} > 0$  et  $\Delta V_{pv} > 0$

Dans ce cas le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; en plus  $\Delta V_{pv}$  est positive, on est donc dans la bonne direction. Pour la prochaine itération, on augmente la tension du champ photovoltaïque. Ceci peut être réalisé par une diminution du rapport cyclique. Soit donc :

$$(k) = (k - 1) - \Delta\alpha \quad (2.10)$$

- Deuxième cas :  $\Delta P_{pv} > 0$  et  $\Delta V_{pv} < 0$

Le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP ; en plus  $\Delta V_{pv}$  est négative, la recherche du MPP se fait dans la bonne direction. On va donc pour la prochaine itération continuer à diminuer la tension (donc à augmenter le rapport cyclique). Soit donc :

$$(k) = (k - 1) + \Delta\alpha \quad (2.11)$$

- Troisième cas :  $\Delta P_{pv} < 0$  et  $\Delta V_{pv} < 0$

Le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; et comme  $\Delta V_{pv}$  est négative on se dirige dans le mauvais sens. Lors de la prochaine itération on doit corriger le sens de la recherche en augmentant la tension. Soit donc :

$$(k) = (k - 1) - \Delta\alpha \quad (2.12)$$

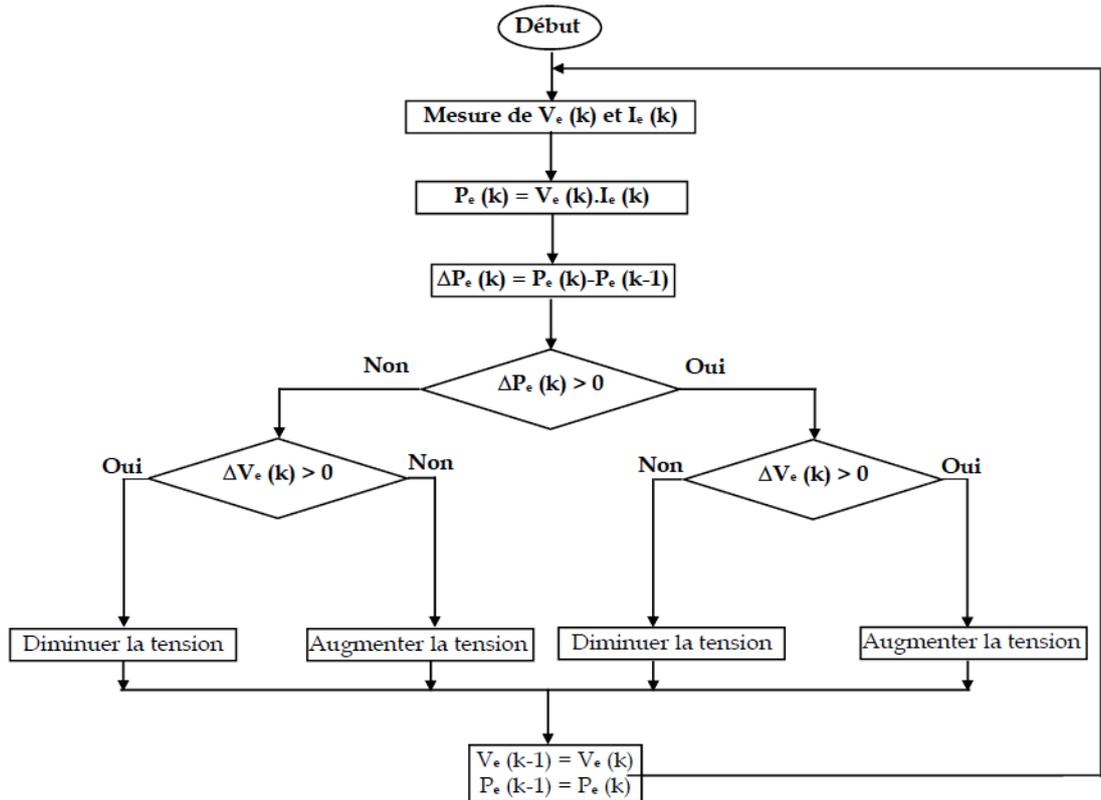
- Quatrième cas :  $\Delta P_{pv} < 0$  et  $\Delta V_{pv} > 0$

Le point de fonctionnement actuel est à droite du MPP ; en plus  $\Delta V_{pv}$  est positive, la recherche se fait donc dans la mauvaise direction. Pour la prochaine itération, on va diminuer la tension (donc augmenter le rapport cyclique). Soit donc:

$$(k) = (k - 1) + \Delta\alpha$$

### III. 4.2.Algorithme de la méthode P&O

La figure III.13 montre l'organigramme de l'algorithme P&O. Cet algorithme est conçu de sorte qu'il fonctionne sur un calculateur et donc à chaque cycle de l'algorithme, le courant et la tension du panneau sont mesurés pour calculer  $(k)$ . Cette valeur de  $(k)$  est comparée avec celle de  $(k-1)$  déjà calculée à l'itération précédente.



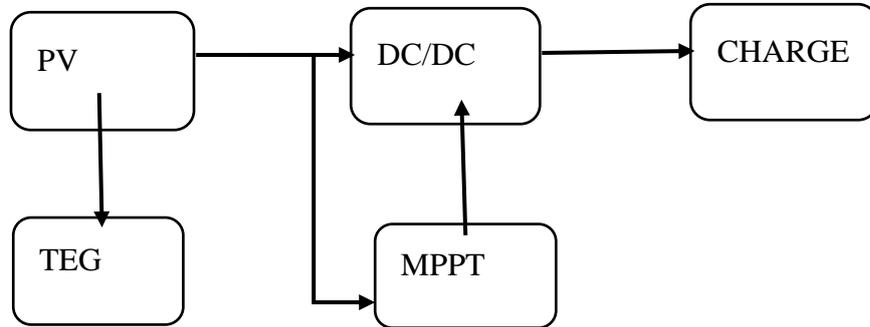
Figure(II.9) : Organigramme de l'algorithme P&O.

Si la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière mesure, c'est-à-dire le point de puissance maximale n'est pas atteint, la perturbation de la tension continuera dans la même direction que celle qui a été prise au dernier cycle. Lorsque le point de puissance maximale est atteint, la tension du panneau oscille autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. Une fois la puissance de sortie a diminué depuis la dernière mesure, c'est-à-dire le point de puissance maximale est dépassé, la tension est perturbée dans la direction opposée de celle de l'itération précédente.

### III.5.Application de la commande (P&O) sur un système PV/TEG

Pour améliorer notre modèle précédent (PV-BOOST-commande) et obtenir une puissance maximale efficace nous avons utilisé l'un des méthodes de la commande MPPT (P&O), Après avoir réalisé une modélisation mathématique du système global, Et l'implémenter sous le logiciel Matlab a l'aide d'un convertisseur statique (BOOST) dans le but de rapprocher du PPM les résultats obtenu va discuter en détail sur la troisième chapitre.

La figure suivante représente le schéma asymptotique d'un système PV/MPPT/TEG .



Figure(II.10) : Schéma globale d'un système PV/MPPT/TEG .

### III.6.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs statiques (convertisseur DC-DC) .On a étudié l'une des méthodes MPPT basées sur la commande P&O .Dans la chapitre suivante on va discuter les résultats de simulation obtenu dans le but d'étude la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque adapté à un hacheur survolteur « boost» avec une commande MPPT numérique « perturbation et observation » associé avec un « TEG ».

## Chapitre III : Résultat et discussions.

### III .Introduction

La simulation est un outil très important pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet cette partie nous permettra d'effectuer des simulations d'un générateur photovoltaïque suivi par un convertisseur DC/DC et de tester les commandes MPPT. Ceci nous permet de modifier les paramètres des systèmes facilement tels que les conditions météorologiques. la puissance maximale obtenue par notre modèle est 60Watt , donc les résultats sont identiques.

Le logiciel MATLAB et son extension graphique associée SIMULINK font partie d'un ensemble d'outils intégrés au traitement du signal, présentent la possibilité de simuler des systèmes à leurs états continus et discrets, il est donc bien adapté pour tester les commandes MPPT numériques. Ce chapitre est consacré à la simulation et l'étude de méthode de commande P&O avec un générateur thermoélectrique à fin d'obtenir de meilleurs résultats.

### III .1. Simulation du système photovoltaïque

#### III.1.1.Description du système à simuler

Nous avons choisie de simuler un panneau photovoltaïque mentionné dans la spécification MSX 60, ce panneau est composé de 36 cellules photovoltaïques en silicium poly-cristallin disposées électriquement, la figure suivante représente le modèle du panneau photovoltaïque étudié.

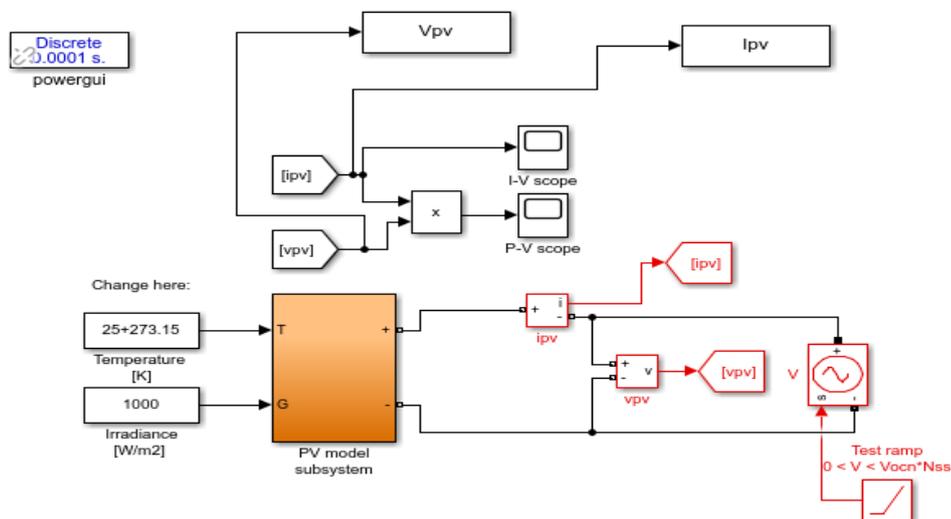


Figure (III.1). Schéma de simulation d'un panneau PV étudié MSX-60 .

### Chapitre III : Résultat et discussions.

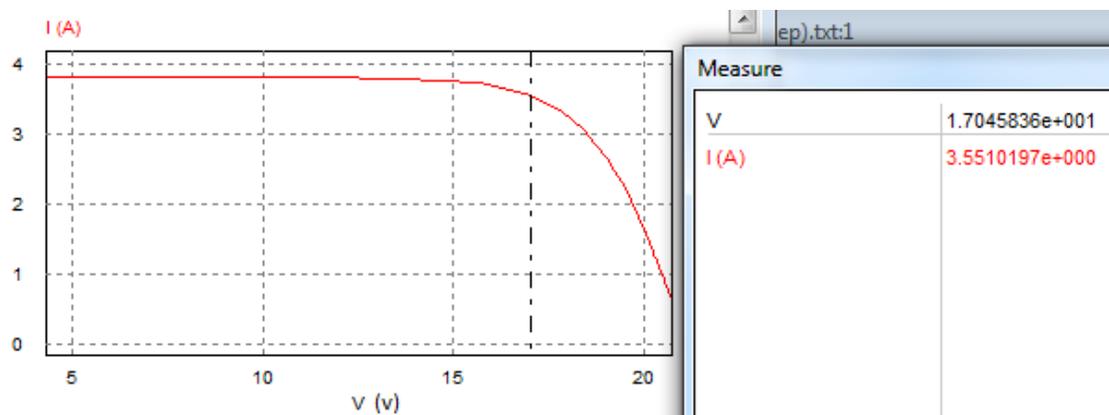
Puissance maximale, Pmax	60W
Tension de Pmax , Vmp	17.1V
Courant de Pmax , Imp	3.5A
Courant de court-circuit, Isc	3.8A
Tension de circuit-ouvert, Vco	21.1V
Coefficient de température en circuit-ouvert Voc, Kv	-80mV/°C
Coefficient de température en court-circuit Isc, Ki	2.4mA/°C
Nombre de cellules	36

**Tableau 1** : Spécifications du module PV Solare MSX-60

Pour faire l'analyse du fonctionnement du panneau PV choisi, en se basant sur le modèle étudié, une série de simulation ainsi que les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes, tel que :

➤ La première courbe présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement  $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$  et de température  $T = 25^\circ\text{C}$  .

➤ La deuxième courbe présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement  $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$  et de température  $T = 25^\circ\text{C}$ .



Figure(III.2) .Courbe des caractéristiques du I-V du panneau.

## Chapitre III : Résultat et discussions.

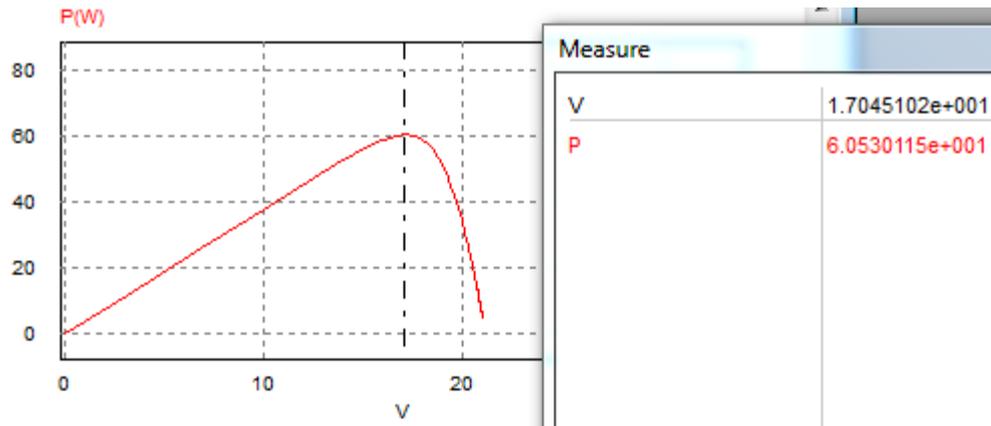
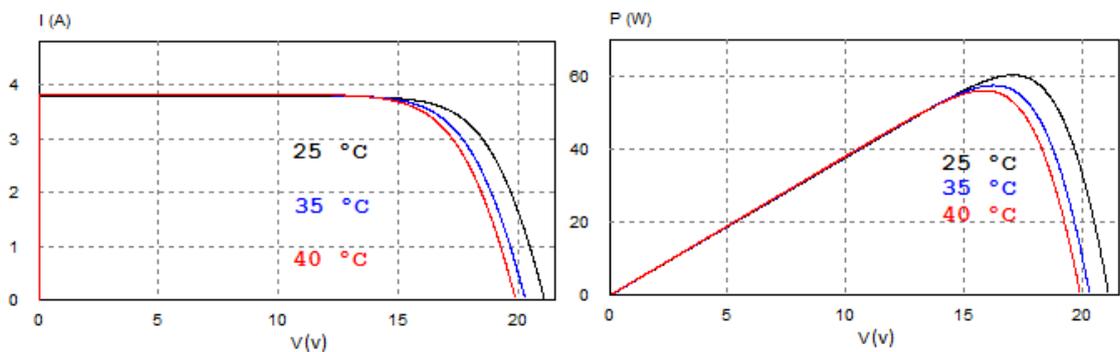


Figure (III.3) : Courbe des caractéristiques du P-V du panneau.

### III.1.2. Influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V :

#### III.1.2.1. Effet de la variation de la température

La Figure III.4 représente les caractéristiques de la puissance de sortie en fonction de la tension et de courant de sortie en fonction de la tension pour une température variable [40 35 25] °C et une irradiation constante égale à 1000W /m<sup>2</sup>.



Figure(III.4) : Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs de température.

On note que lorsque la température augmente, la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ , baisse légèrement, tandis que le courant de court-circuit augmente. Ce comportement est validé et présenté dans la figure.

#### III.1.2.2. Effet de la variation d'irradiation

La Figure III.5 représente les caractéristiques de la puissance de sortie en fonction de la tension et de courant de sortie en fonction de la tension pour une irradiation variable [400 600 800 1000] W/m<sup>2</sup> et une température constante égale à 25°C

## Chapitre III : Résultat et discussions.

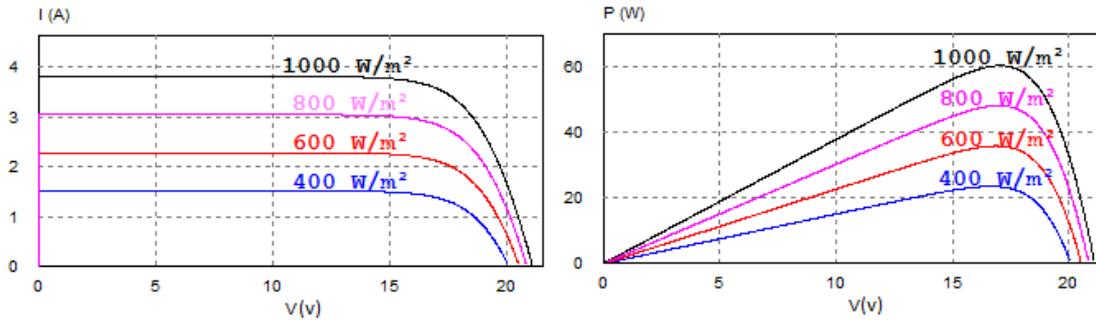


Figure (III.5) : Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs d'irradiation

On note alors que pour le bon fonctionnement du panneau PV le point de puissance maximale doit atteindre une puissance  $P=60W$ , et  $I=3.5A$  pour un éclairement  $G = 1000W /m^2$  et de température  $T = 25^{\circ}C$ .

Nous observons que la tension et la puissance fournie par le générateur photovoltaïque est instable, Par conséquent, MPPT doit être utilisé pour tracer les valeurs maximales de la puissance. Pour l'éclairement  $G = 1000W /m^2$  et de température  $T = 25^{\circ}C$ .

### III.2. Simulation de TEG

#### III.2.1. Simulation de TEG

Le schéma détaillé d'un générateur thermoélectrique en l'environnement Matlab/Simulink est représenté par la figure III.6 ainsi la figure III.7 .

Dans la modélisation, la puissance de sortie du teg est obtenue par l'effet de seebeck (la différence entre la coté chaude /froid). Comme des entrées on a  $t_h / t_c$  et le nombre de résistance interne  $R_{in}$  ces paramètre seront calculé dans la modélisation figure La figure représente un module du TEG contient 5 TEG en sérié avec  $t_h=95$  ,  $t_c=20$  et  $R_{in}=2.9\Omega$ . Dans tous les cas de simulation nous avons fixé le  $T_H$  et  $T_C$ .

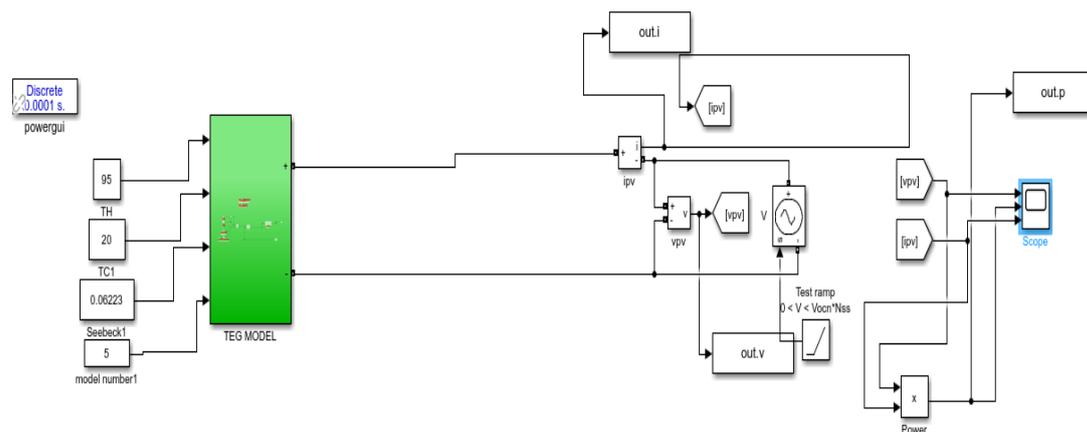
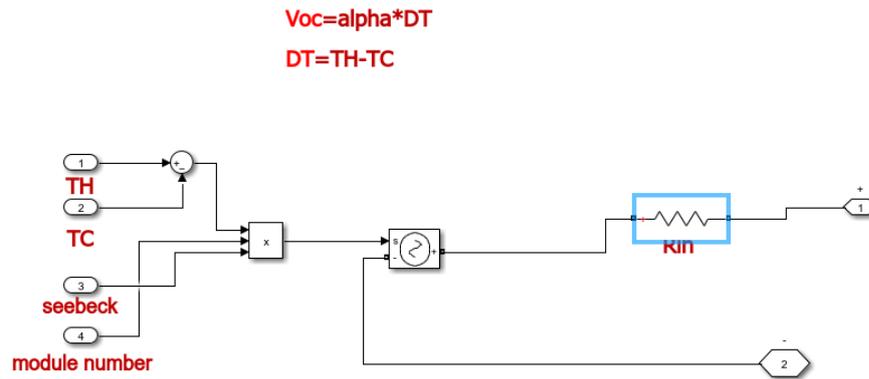


Figure (III. 6): schéma de modélisation d'un générateur TEG.

## Chapitre III : Résultat et discussions.



Figure(III. 7): Schéma interne d'un bloc de TEG

➤ Les résultats de la simulation :

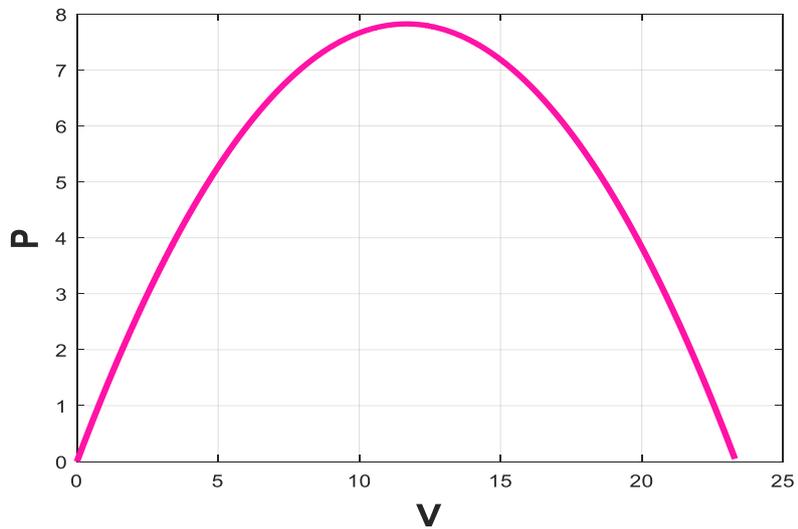


Figure (III.8) : La caractéristique puissance/tension pour 10 TEG

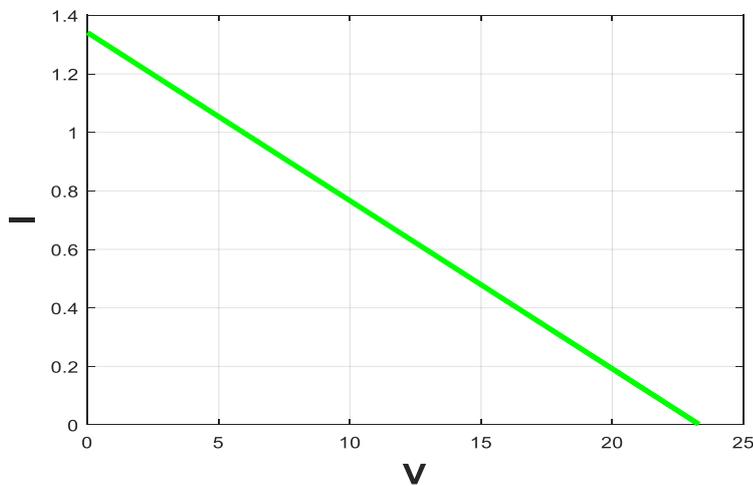


Figure (III. 9) : La caractéristique courant/tension pour 10 teg

## Chapitre III : Résultat et discussions.

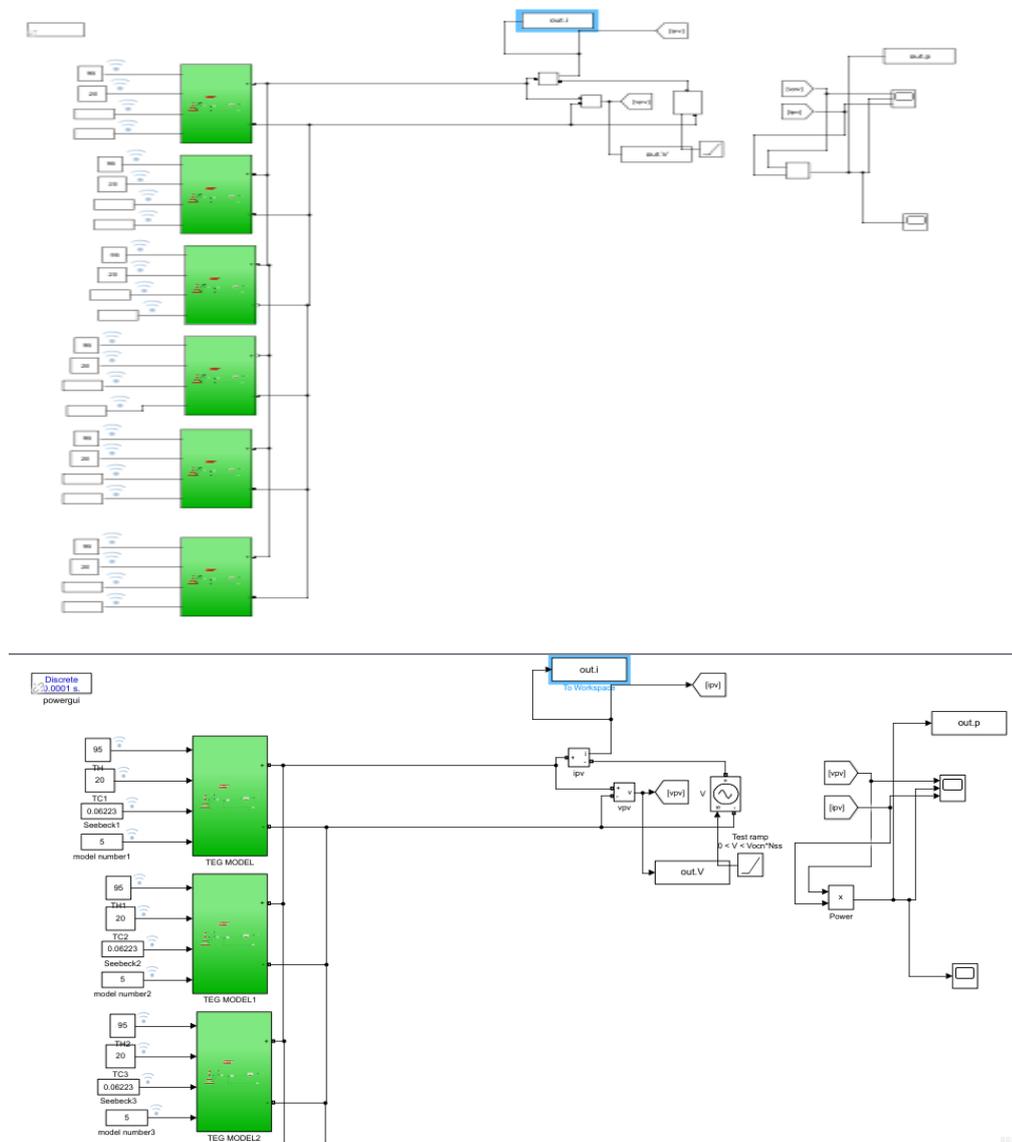
On peut alors tracer en fonction de la tension  $v$ , l'évolution de la puissance électrique et le courant généré. La puissance générée est une courbe parabolique et que la puissance maximale (PPM) située au milieu.

En effet, la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  correspond à la valeur de la tension quand le courant est nulle (intersection de la droite de courant avec l'axe des abscisses). Le courant en Court-circuit  $I$  correspond à la valeur du courant max lorsque la tension est nulle (intersection de la droite de courant avec l'axe des ordonnées).

On peut noter que la valeur maximale de la puissance du teg a été égal  $=8$  wat. Tant dis que pour chaque teg à une puissance  $max= 1.6$ wat.

### III.2.2.L'association des modules teg série/parallèle sans MPPT :

la figure suivante représente le schéma globale d'un champ de 36 teg dans lequel on utilise 6 module du teg en parallèle pour chaque module contient 6 teg en série.



Figure(III .10) :Le champ d'un générateur thermoélectrique

### ➤ Les résultats de la simulation

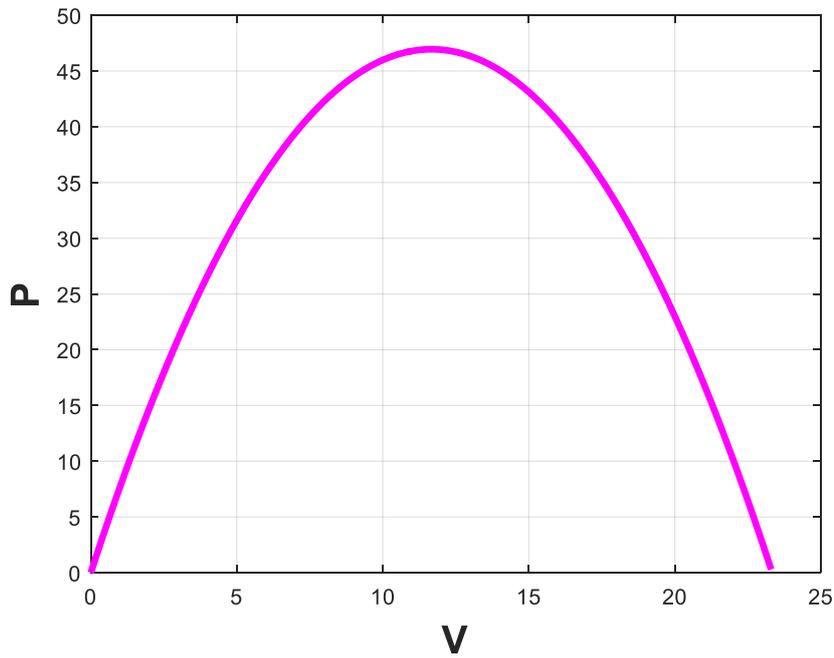


Figure (III.11) : caractéristique p-v de générateur TEG

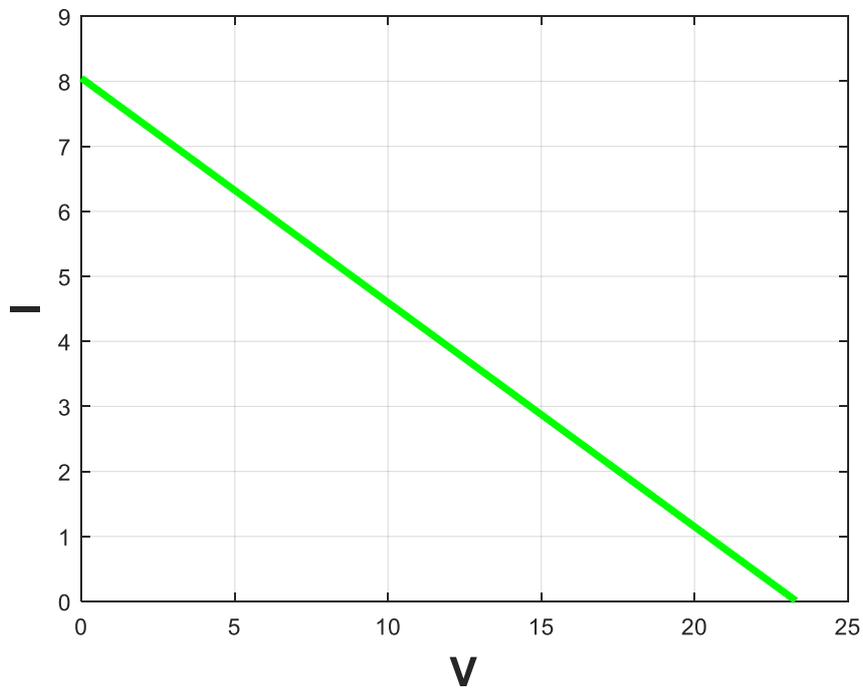


Figure (III.12) : caractéristique I-V de générateur TEG

## Chapitre III : Résultat et discussions.

---

La tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à différentes nombre des teg , Nous remarquons que l'augmentation du nombre des teg engendre une augmentation de la puissance de TEG, et le point maximal de la puissance est toujours situe au milieu. Ce schéma donne une valeur de puissance approximative à 48 watt .

On peut remarquer aussi que la tension optimal  $V_{mp}$  est toujours égale à la moitié de la tension de circuit ouvert ainsi le courant maximale a été augmenté.

### III .2.3. Résultats de simulation de la commande MPPT :

Pour avoir une meilleure connexion entre le GPV et la charge et bénéficier de la puissance maximale, on présente l'une des méthodes de la commande MPPT qui est la méthode P&O, partant de la modélisation de cet algorithme aux résultats des tests.

#### III.2.3.1.Le Générateur hybride PV avec TEG

Le schéma représente un générateur PV associé avec un générateur thermoélectrique précédant lié avec des diodes anti-retour :

## Chapitre III : Résultat et discussions.

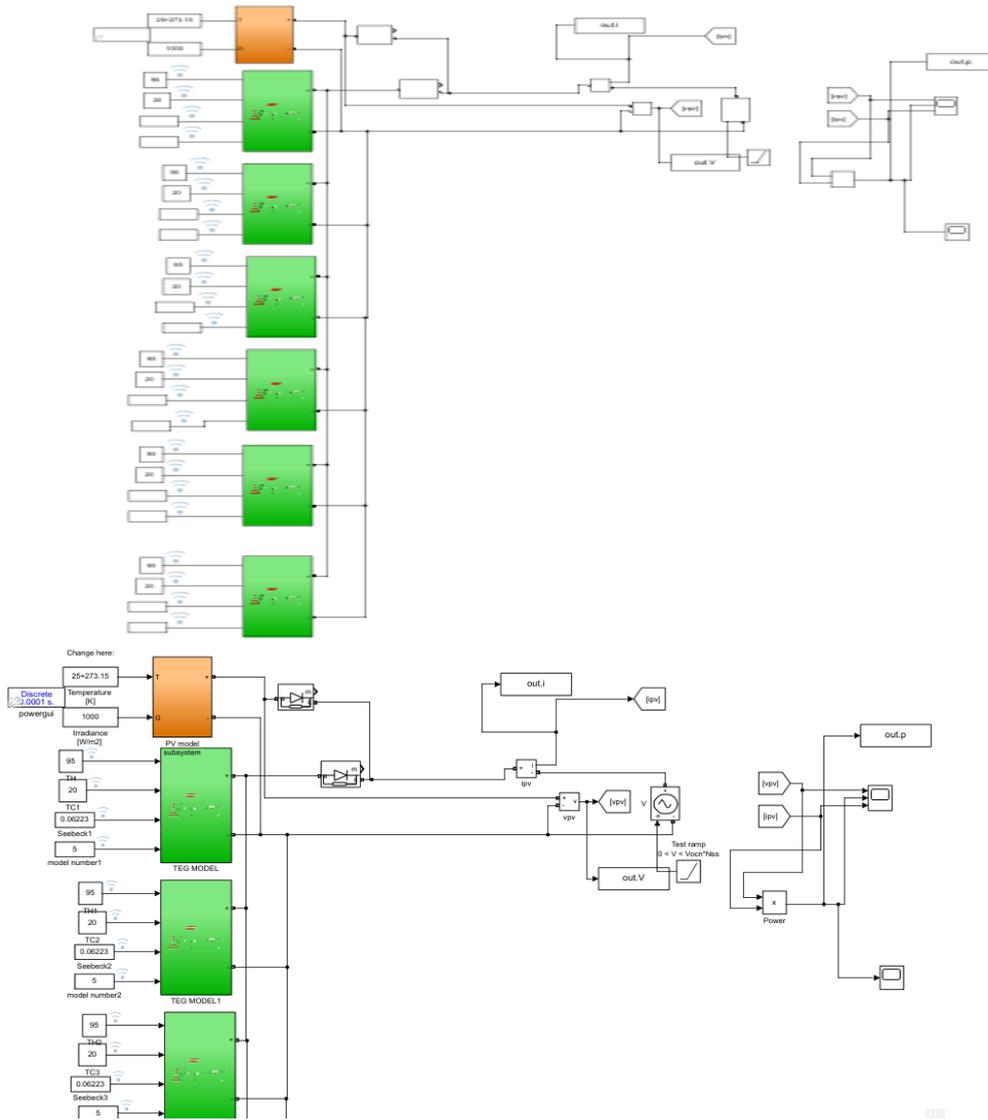
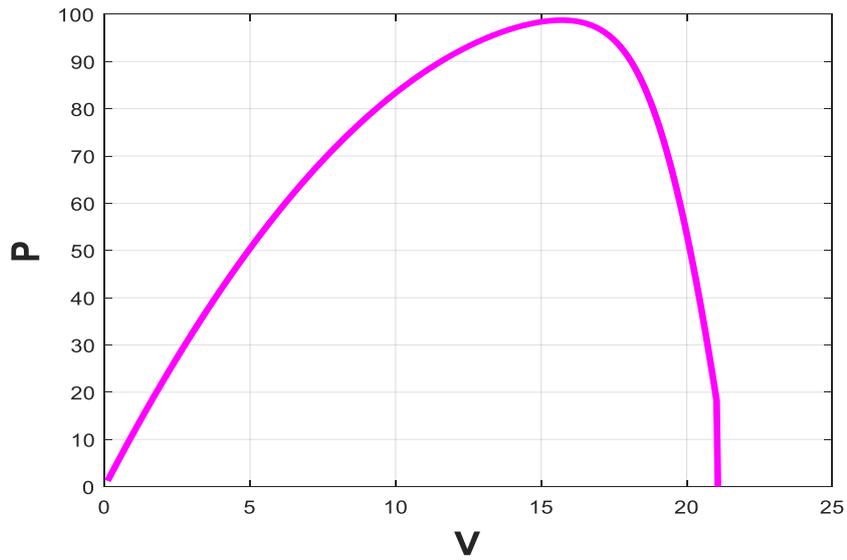


Figure (III.13):Schéma d'un GPV associé avec un champ des TEG

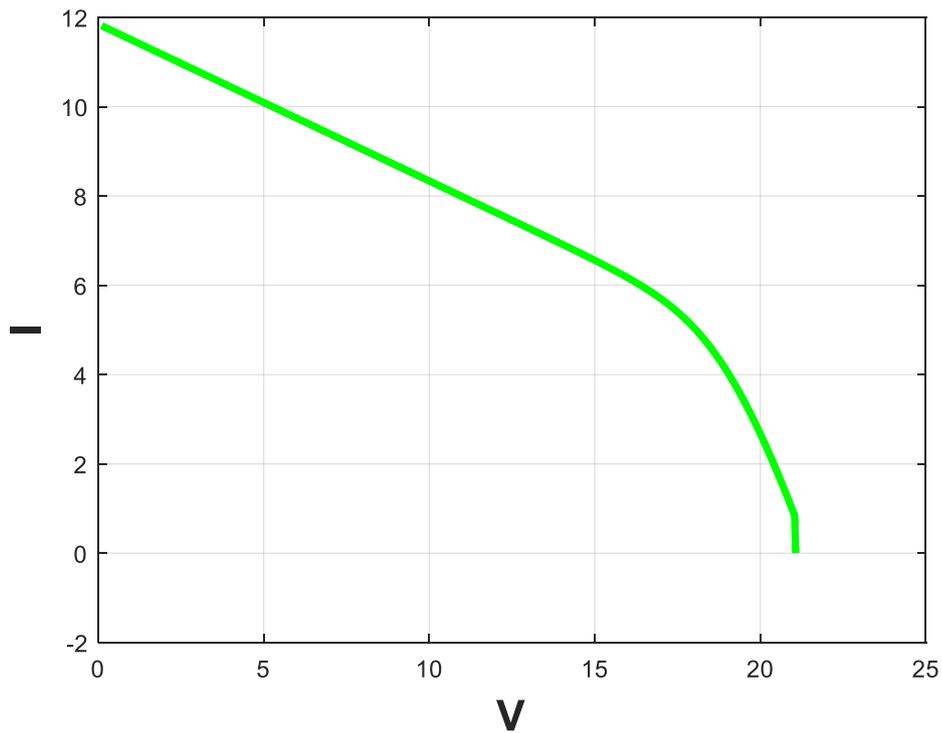
➤ Les resultats de la simulation :

### Chapitre III : Résultat et discussions.

---



Figure(III.14) : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension du système hybride PV/TEG



Figure(III.15) : Caractéristique de courant en fonction de la tension du système hybride PV/TEG

On remarque que l'augmentation de puissance à travers le 100 watt indique que la puissance maximale du pv sommé avec la puissance maximale du TEG donc le générateur thermoélectrique ont un bon fonctionnement.

## Chapitre III : Résultat et discussions.

---

On conclure que les générateurs thermoélectriques sont des éléments très important pour améliore la production d'énergie dans les systèmes d'hybridations

### III.2.3.2.Application de MPPT pour un système PV/TEG

#### a) Simulation et description du schéma global

La figure (III .16) Représente le schéma global d'un système photovoltaïque composé d'un module PV avec un hacheur BOOST commandé en MPPT de type P&O associé avec un champ de générateur thermoélectrique compose de 36 TEG (sérié/parallèle).

Pour tester les fonctionnements des algorithmes modélisés précédemment, on a inséré le bloc de commande MPPT pour le système photovoltaïque, les entrées de la commande sont le courant et la tension du panneau et du G, la sortie représente la puissance maximale.

Nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT-TEG et une charge) sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement  $1000W/m^2$  et une température de  $25^{\circ}C$ )

La Figure (III .16) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système PV/TEG adapté par la commande MPPT.

#### b) Simulation de hacheur boost

De nombreuses applications industrielles utilisent des signaux de commande MLI (ou PWM, Pulse width modulation), car ces signaux sont robustes en présence de bruit. La technique de modulation de large d'impulsion (PWM) consiste à générer un signal carré avec un rapport cyclique modulé en fonction d'un signal de commande. La valeur moyenne de la tension commandée dépend du rapport cyclique.

Pour montrer le rôle des convertisseurs boost nous avons utilisé logiciel Matlab pour la simulation et nous prenons  $D= 0.5$  alors : Cycle de service= 50%.

En pronant :

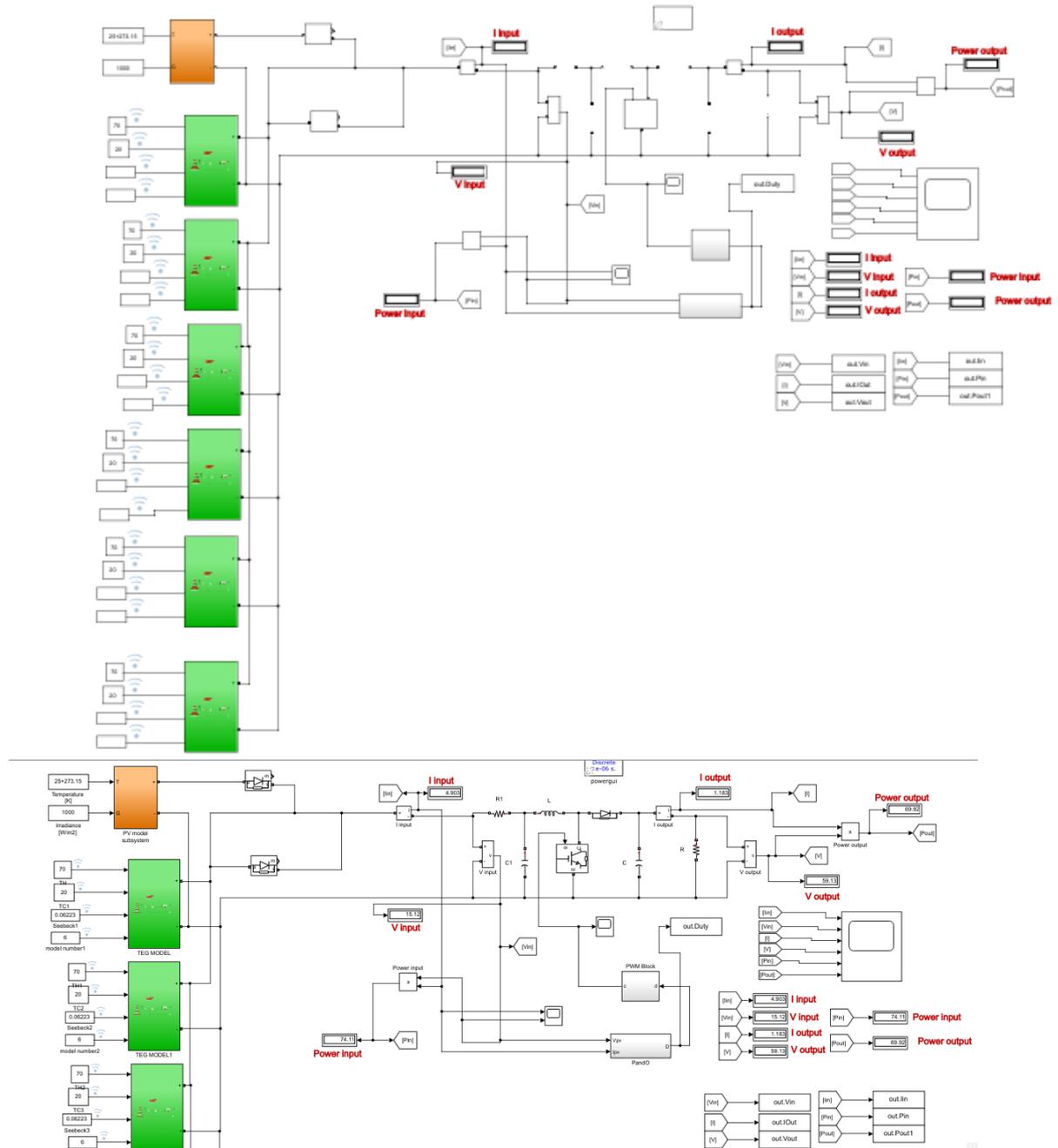
C	C1	R	L
$2500e-6(F)$	$1000e-6(F)$	50(Ohms)	$10e-3(H)$

Tableau( III.2). Paramètres du convertisseur DC/DC BOOST.

### Chapitre III : Résultat et discussions.

Nous avons réalisé une modélisation mathématique du système global, et l'implémenter sous le logiciel MATLAB. Les résultats de simulation obtenus à la fois.

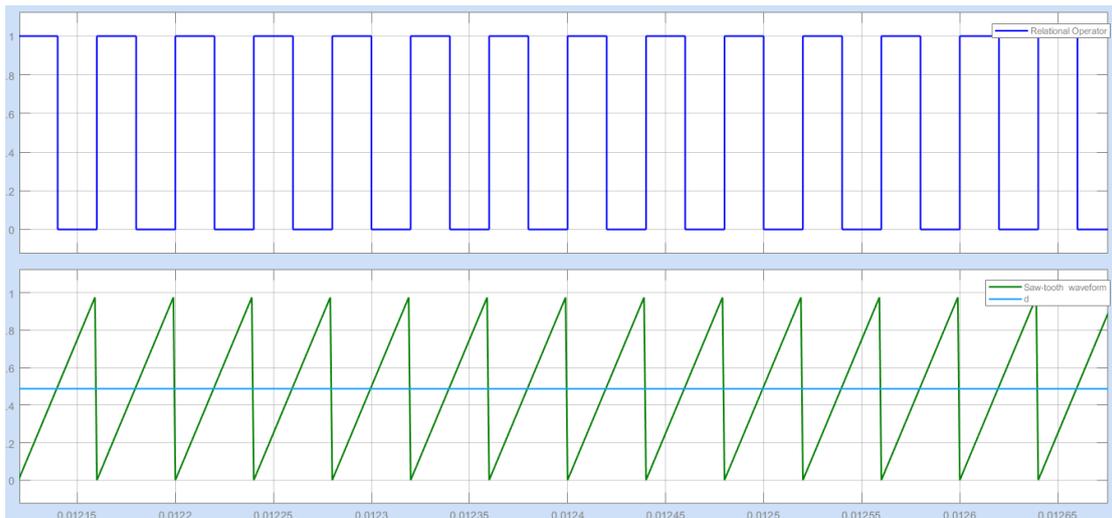
La figure suivante représente le schéma global d'un système (pv-boost-mppt-teg) étudié sous MATLAB/SIMULINK



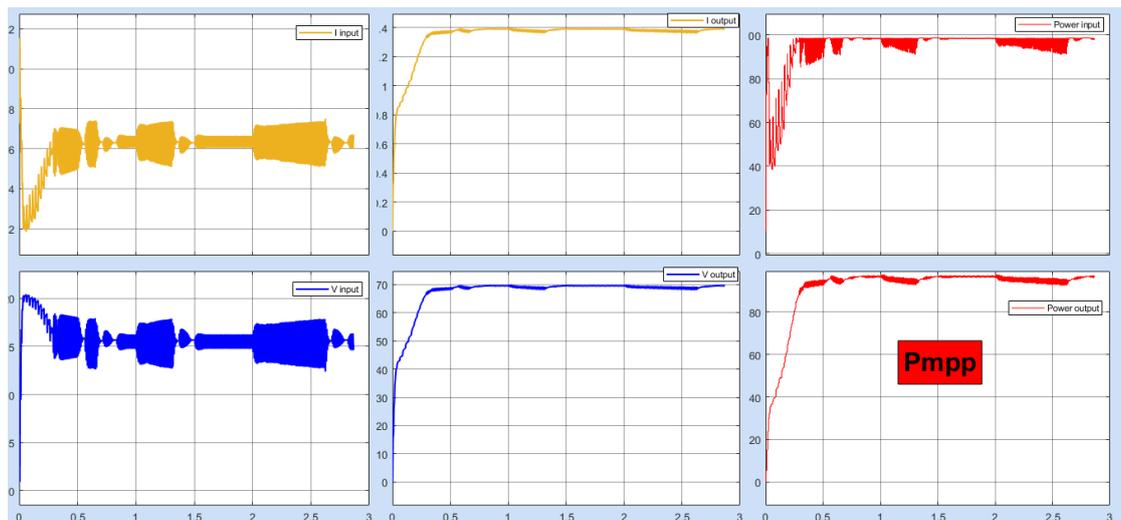
Figure(III.16) : le système global d'application mppt avec pv/teg

La figure(III.17 suivante montre l'obtention d'un signal PWM. Dans le diagramme supérieur une représentation d'un signal carré PWM.et dans le graphe du bas, un signal en dents de scie et le rapport cyclique .

## Chapitre III : Résultat et discussions.



Figure(III.17) : Obtention d'un signal (PWM).



Figure(III.18) : Les résultats globaux de système (pv-teg-mppt-boost)

➤ À partir des résultats obtenus, on remarque que la commande P&O a permis de retrouver le point de puissance maximale du panneau. Avec la présence de la commande P&O, on remarque que : la courbe de la puissance d'entrée illustrée dans la Figure (IV.9) atteint jusqu'à 99 Watt avec de grandes oscillations.

➤ Cette figure illustre l'évolution de la puissance de crête atteinte en utilisant la méthode P&O. On remarque que la puissance se varie selon le même profil dans les valeurs de 99 watt donc la commande suit parfaitement le point maximal avec

## Chapitre III : Résultat et discussions.

---

une grande précision (presque la même allure et valeur de  $P_{in}=P_{out}$ ) et le courbe de puissance de sortie bien filtré par rapport la puissance d'entrée.

➤Le courant générer est suis presque la même allure avec moins des oscillations et nous remarquons la proportion inverse entre le courant et la tension quand la tension augment le courant diminué et l'inverse est juste.

➤D'après la figure obtenue on remarque que la tension de sortie  $V_{out}$  est supérieure à celle d'entre  $V_{imp}$  ce qui prouve que la tension de la charge est plus supérieure a la tension d'entrée, et cela revient au convertisseur utilise est de type élévateur de tension (BOOST). donc les résultats du hacheur boost effectué correctement sans rôle puisque la tension de sortie d'hacheur boost est supérieur à celle l'entrée.

### III.4.Conclusion

D'après les résultats de simulations obtenus nous avons assure le transfert maximal de la puissance d'un générateur hybride PV/TEG quel que soit les conditions de fonctionnement, donc c'est ce qui prouve l'efficacité de la commande choisis MPPT de type P&O ainsi le hacheur BOOST, donc ils affectent correctement leurs rôles par le suivi exact de la puissance maximum de TEG et du panneau solaire.

## Chapitre III : Résultat et discussions.

---

### Conclusion générale

La révolution énergétique mondiale consomme beaucoup d'énergie, pour cela, la recherche a conduit à employer l'énergie solaire et l'énergie thermique comme des sources importantes d'énergie électrique. Et pour réaliser cet objectif on a proposé un générateur hybride photovoltaïque/thermoélectrique qui peut être une solution efficace pour la forte demande d'énergie. Le travail effectué dans ce mémoire apporte sur l'étude de caractéristique et la commande MPPT d'un système hybride PV/TEG. L'objectif principal est de proposer et de développer une technique de commande efficace et valable pour le contrôle de transfert max de la puissance de système hybride vers la charge quel que soit les conditions climatiques.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la modélisation et la commande d'un système hybride PV/TEG. L'énergie produite est utilisée pour alimenter des charges à courant-continu à travers d'un convertisseur DC-DC de type boost. Ce convertisseur est associé avec un générateur PV, TEG ou PV/TEG.

Premièrement, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques et le système thermoélectriques.

Ensuite, notre étude est apportée sur la présentation des différents convertisseurs DC/DC qui inclut les convertisseurs abaisseurs (BUCK), élévateur (BOOST) et abaisseur-élevateurs (BUCK-BOOST) et nous avons donné et présenté les méthodes de commande MPPT tel que P&O.

Finalement, à travers le dernier chapitre, on a présenté l'application de la commande MPPT basée sur P&O appliquée sur les systèmes photovoltaïques et thermoélectrique. Cette commande permet d'assurer un fonctionnement au PPM et une robustesse vis-à-vis des variations de l'éclairement. Les résultats de simulation exposés montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer le rendement des installations photovoltaïques.

On se termine avec une réalisation d'un modèle d'un TEG et PV par l'utilisation d'un convertisseur BOOST associée à sa commande de recherche du point maximum MPPT "P&O" et pour obtenir des bons résultats, nous avons choisi d'utiliser le logiciel MATLAB/SIMULINK.

## Chapitre III : Résultat et discussions.

---

### References

- [1] : Durukan, I. K., Bayal, Ö., Kurtuluş, G., Baş, Y., Gültekin, A., Öztürk, M. K., ... & Özbay, E.(2015). Examination of the temperature related structural defects of InGaN/GaN solar cells. Superlattices and Microstructures, 86, 379-389.f.
- [2] A. B. Ibarreta, "Réalisation de commandes MPPT Numériques", Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Université Rovira Virgili 2006 .
- [3] M.N. Mchaliq 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.
- [4]: L'électricité photovoltaïque, Yves JAUTARD et Thierry BOUDOL (Solarte) - 25/05/2000.
- [5]: Alain RICAUD, "Modules photovoltaïques, Filières technologiques", Techniques de l'ingénieur, D3940.
- [6] M.N. Mchaliq 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.
- [7] M. SLAMA Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïque interconnectées au réseau électrique», mémoire de magister, Université Ferhat Abbas –Sétif ,2012
- [8] S. Liu And R.A. Dougal, “dynamic multiphysics model for solar array”, IEEE transactions on energy conversion, vol. 17, n°2, pp. 285 – 294, june 2002.
- [9] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud Et I. Youm « etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » revue des energies renouvelables vol. 11 n°3 sénégal, 2008
- [10]: Cédric CABAL, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat soutenue le 15 décembre 2008.
- [11]: Belhadj Mohammed, Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome, mémoire de magister, Centre Universitaire De Bechar, Soutenue le 2007-2008.
- [12] : MERAHI REDA, MODELISATION D'UN DISPOSITIF MPPT POUR L'ETUDE DE L'AUGMENTATION DE LA PUISSANCE PRODUITE PAR LES GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUES soutenue le 2010
- [13]: Laura Baxerres, Aurélie Michallet, Céline Ramet, Rapport\_PIP\_Microtransat\_Energie\_I, "Partie électronique et énergétique", 2005-2006.

### Chapitre III : Résultat et discussions.

---

[14]: M. PETIBON Stéphane, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Thèse de doctorat soutenue le 20 janvier 2009.

[ 15] :Installations photovoltaïques, "Systèmes autonomes", document du constructeur BELPOWER

[16]: Maouedj Rachid, "Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah", Mémoire De Magister soutenue en 2005.

[17]: Installations photovoltaïques, "Systèmes raccordés au réseau", document du constructeur BELPOWER.

[18] : Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque

[19] <https://www.industrie-techno.com> >>

[20] Saima Siouane. Systeme thermoelectrique pour la recuperation d'energie : modelisation electrique et continuite de service de la circuiterie electronique. Micro et nanotechnologies/ Microelectronique. Universite de Lorraine, 2017. Francais. NNT : 2017 LORR0201. Tel-01906188

[21] G. S. Nolas, J. Sharp, and J. Goldsmid, Thermoelectrics : basic principles and new materials developments, vol. 45. Springer Science & Business Media, 2013. 8

[22] Y. Aperte, Reflexions sur l'optimisation thermodynamique des generateurs thermoelectriques. PhD thesis, Universite Paris Sud-Paris XI, 2013. vii, 10

[23] These CamilleFAVAREI « Optimisation de generateurs thermoelectriques pour la production d'electricite » Ecole doctorante des science exactes et de leurs applications de l'universite pau 2014

[24] Thèse : « Optimisation de générateurs thermoélectriques pour la production d'électricité »

[25] H. FATIHA et R. AICHA« Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque» Mémoire master académique en Electrotechnique universite kasdi merbah ouargla 2014.

[26] F. Slama '' Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique''Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF- 01/04/2011

[27] A. e. M. A.GUELLAL, «La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparativeetimplémentation sur FPGA, Le 4ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et renouvelable,» 2016.

### Chapitre III : Résultat et discussions.

---

[28] B. Messaoud et L. M. Islam, "Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïques :

Mémoire Master en Automatique , Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel 2018..

[29] G. Obeidi, « Commande des hacheurs MPPT par la logique floue », Mémoire de Magister,École Nationale Polytechnique, Alger 2006.

[30]Bouchareb Khalil et Touati Ayyoub ,Modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT basée sur un mode glissant.