

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LARECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI MERBAH -OUARGLA
Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
Département d'Electronique et des Télécommunications



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master Professionnel

Domaine : Science et Technologie

Filière: Automatique

Spécialité: Instrumentation industrielle

Présenté par:

DJABOU LAHCEN

LEBSSISE FOUAD

MOKRANI KHALED

Thème

**Génération de courant par effet
thermoélectrique à base du module Peltier.**

Devant le jury :

Nom &Prénom	Grade	Qualité	Université
-----	M.A.A	Président	UKM Ouargla
M.RACHEDI Mohamed Yacine	M.A.A	Encadreur	UKM Ouargla
-----	M.A.A	Examineur	UKM Ouargla

AnnéeUniversitaire:2019 /2020

Remerciement

Remerciement

Avant tout nous tenons à remercier **ALLAH** qui nous a aidé et nous adonné la patience et le courage de finir ce travail.

Nous tenons à remercier vivement **Mr. RACHDI MOHAMMED YACINE** notre promoteur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements.

Nous voudrions remercier tous les enseignants de département d'électronique notamment :

Mr. BOUZIDI M, Mr. ELAGGOUNEH, Mr. SAMAI DJ, Mme. KARA F, Mr. TOUBAKH H...

pour leurs modesties et le moral haut.

Nos plus chaleureux remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A Mon Père, vous avez toute ma gratitude, car c'est grâce à
vous j'ai atteint mon but...

Ma chère maman, je vous remercie pour votre soutien moral
et vos conseils qui m'ont guidé durant mon parcours

A mes frères et mes sœurs

A mes très chers amis

A Toute la famille **DJABOU** et **HERKOUS**

A tous ceux qui utilisent la science pour le bonheur et la
prospérité de l'humanité.

DJABOU LAHCEN

Je dédie ce travail :

A mon père et ma mère

A mes frères et mes sœurs

Je dédie également ce travail à ma femme et mon fils

A Toute la famille **AISSAOUI** et **BISKRI**

A tous ceux qui utilisent la science pour le bonheur et la
prospérité de l'humanité.

MOKRANI KHALED

Je dédie ce travail :

A mon père et ma mère

A mes frères et mes sœurs

Je dédie également ce travail à ma femme et mon fils

A Toute la famille **LEBSSISSE** et **TATI**

A mes très chers amis

LEBSSISSE FOUAD

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I	
Généralités sur le photovoltaïque	
I.1.Introduction	3
I.2. Le photovoltaïque	3
I.2.1. Définition.....	3
I.2.2. Principe d'une cellule photovoltaïque.....	3
I.2.3. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	3
I.2.3.1. Le générateur de courant.....	4
I.2.3.2. La résistance R_s	4
I.2.3.3. La résistance R_p	4
I.2.3.4. Diode.....	4
I.2.4. Différents types de cellules PV.....	4
I.2.4.1. Cellules à silicium monocristallin	5
I.2.4.1.1. Avantage	5
I.2.4.1.2. Inconvénients	5
I.2.4.2. Cellules à silicium poly-cristallin	5
I.2.4.2.1. Avantage	5
I.2.4.2.2. Inconvénients	5
I.2.4.3. Cellules amorphes	5
I.2.4.3.1. Avantage	5
I.2.4.3.2. Inconvénients	5
I.2.4.4. Cellules multi-jonctions	5
I.2.4.5. Les cellules organiques	6
I.2.5. Effet photovoltaïque.....	6
I.2.6. Avantages et inconvénients.....	7
I.2.6.1. Avantages.....	7
I.2.6.2. Inconvénients.....	8
I.2.7. Facteurs influents sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	8
I.2.7.1. Influence de l'ensoleillement.....	8
I.2.7.2. Influence de la température	9
I.2.8. Cellules solaires organiques.....	9
I.3. Energie solaire.....	10

I.3.1. Définition	10
I.3.2. Différents types d'énergie solaire	10
I.3.2.1. Energie solaire thermique	10
I.3.2.2. Energie solaire photovoltaïque	11
I.3.2.3. Energie solaire thermodynamique	11
I.3.4. Avantages et Inconvénients	11
I.3.4.1. Avantages.....	11
I.3.4.2. Inconvénients.....	12
I.4. Photovoltaïque/thermique	12
I.4.1. Définition.....	12
I.4.2. Principe du PV/T	12
I.4.3. Application PV/T	14
I.4.3.1. Pompe à chaleur.....	14
I.4.3.2. Pompe à chaleur avec ates	14
I.4.4. Avantages et inconvénients du mixte photovoltaïque / thermique.....	15
I.5. Conclusion.....	16

Chapitre II

Thermoélectrique (module Peltier)

II.1. Introduction.....	18
II.2. La Thermoélectricité.....	18
II.3. Effets thermoélectriques.....	18
II.3.1. Effet Seebeck.....	18
II.3.1.1. Définition.....	18
II.3.1.2. Schéma de principe.....	19
II.3.1.3. Explication du phénomène.....	19
II.3.2. Effet Peltier.....	20
II.3.2.1. Définition.....	20
II.3.2.2. Schéma de principe	20
II.3.2.3. Explication du phénomène.....	20
II.3.3. Effets Thomson.....	21
II.3.4. Applications des modules thermoélectriques.....	21

II.4. Module Peltier.....	22
II.4.1. Principe du module Peltier.....	22
II.4.2. Applications dédiées au module Peltier.....	24
II.5. Capteurs thermoélectriques.....	24
II.5.1. Types de Thermocouple.....	25
II.5.1.1. Définition.....	25
II.6.1. Alimentation photovoltaïque des modules thermoélectriques.....	28
II.6.1.1. Modules à effet Peltier.....	29
II.6.1.2. Réfrigération thermoélectrique alimentée par énergie solaire	29
II.7. Conclusion.....	30

Chapitre III

Simulation du modèle thermoélectrique à base du module Peltier

III.1. Introduction.....	32
III.2. Modèles théoriques.....	32
III.3. Simulation dans Matlab/Simulink	32
III.3.1. Modèles utilisés dans l'estimation de la température de la cellule PV.....	33
III.3.2. Modélisation de la température de la cellule PV	34
III.3.3. Calcul statistique	36
III.3.4. Génération de courant, tension et puissance à base du module Peltier.....	38
III.4. Conclusion	42
Conclusion générale.....	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau(II.1) :Types de générateurs de thermocouple.....	27
Tableau (III.1) :Equation Modèles utilisés dans température de la cellule PV.....	34
Tableau (III.2) : Données de Météo de Ouargla le 20/07/2019.....	34
Tableau (III.3) : Température de la cellule PV simulée et mesurée.....	35
Tableau(III.4) : Performances des modèles utilisés.....	37
Tableau(III.5) : Courant obtenu pour les 4 modèles.....	38
Tableau(III.6) : Tension obtenue pour les 4 modèles.....	39
Tableau(III.7) : Puissance obtenue pour les 4 modèles.....	40

Liste des figures

Liste des figures

Figure(I.1) : Principe d'une cellule photovoltaïque.....	3
Figure(I.2) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	4
Figure(I.3) : Types de cellules photovoltaïques.....	6
Figure(I.4) : L'effet photovoltaïque et la jonction PN.....	7
Figure(I.5) : Influence de l'ensoleillement sur les cellules photovoltaïque	8
Figure(I.6) : Influence de la température sur les cellule photovoltaïque.....	9
Figure(I.7) : Les quatre étapes de la conversion photovoltaïque organique.....	10
Figure(I.8) : Matériel de l'eau pile et Collecteur PV/T.....	13
Figure(II.1) : Premier dispositif expérimental décrit par Seebeck.....	19
Figure(II.2) : Principe de l'effet Seebeck.....	19
Figure(II.3) : Effet Peltier	20
Figure(II.4) : Générateur (a) et refroidisseur (b) thermoélectrique.....	22
Figure(II.5) : Construction d'un module Peltier.....	23.
Figure(II.6) : Schéma bloc du Principe du Generateur Thermo-Electrique	23
Figure(II.7) : Schéma d'une cellule à effet Peltier.....	24
Figure(II.8) : Exemple de capteur thermoélectrique	24
Figure(II.9) : Circuit électrique thermoélectrique.....	26
Figure(II.10): Réponse à la température de différents types de thermocouple....	28
Figure(II.11): prototype d'une casquette avec éléments thermoélectriques alimenté par Énergie solaire.	29
Figure(II.12): Dispositif thermoélectrique de refroidissement alimenté par un système Photovoltaïque.	30
Figure(III.1) : Tc simulées par différents modèles.....	35
Figure(III.2) : Comparaison entre la valeur mesurée de Tc et celles simulées à base des modèles les plus performants.....	38
Figure(III.3) : Représentation du courant généré.....	39
Figure(III.4) : Représentation de la tension générée.....	40
Figure(III.5) : Représentation de la puissance générée.....	41

Liste des abréviations

PV	Photovoltaïque.
PV/T	Photovoltaïque thermique.
CIGS	Cuivre Indium Gallium Sélénium
CdTe	Le tellure de Cadmium
P_{max}	La puissance maximale produite PV (W).
V_{max}	Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
I_{max}	Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
V_{opt}	Tension optimale (V).
I_{opt}	Courant optimale (A).
I_{ph}	Générateur de courant
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.
R_s	Résistance série
R_p	shunt resistance
Si	Silicium
CDs	Cadmium
CdTe	Tellure de Cadmium
Ge	Germanium
Se	Sélénium
GaAs	d'Arséniure de Gallium
COP	coefficient de performance
ATES	Aquifère Thermal Energy Storage
dT	différence de température
dV	différence de potentiel
S_{ab}	coefficient Seebeck
Q	electronic charge
π	coefficient Peltier
τ	coefficient Thomson
dX	différence matériau
Bi₂Te₃	Bimuth Telluride
PbTe	Telluride de Plomb
SiGe	Germanium de Silicium
ZT	facteur de mérite
η_{pv}	rendement photovoltaïque
R	résistance interne
K_{th}	conductivité thermique
FOM	isolation thermique
STC	conditions de test standard
I = G	rayonnement solaire
T_a	température ambiante
T_a,NOCT	ambient temperature at NOCT conditions
V_w	vitesse du vent
U₀	coefficient d'échange
U₁	coefficient d'échange
noct	température de fonctionnement nominal de la cellule
PV_{sys}	<i>les valeurs de la température du module et celles</i>

τa	absorptance-emittance Product
R^2	coefficient de détermination
RMSE	Erreur quadratique moyenne
<i>MBE</i>	Erreur moyenne
MABE	Erreur absolue moyenne
MPE	Pourcentage de l'erreur moyenne
MAPE	Pourcentage de l'erreur absolue moyenne

INTRODUCTION GENERALE

Depuis le début des années 1990, un regain d'intérêt pour la thermoélectricité est apparu, dû en particulier à l'émergence de préoccupations environnementales concernant les gaz utilisés en réfrigération et les émissions de gaz à effet de serre ainsi que la volonté de développer des sources d'énergies alternative.

La génération de courant par effet thermoélectrique apparaît comme une source intéressante pour soulager les problèmes énergétiques actuels, en mettant à profit la transformation des énormes quantités de chaleur perdue dégagées par exemple par les voitures, les chaudières,..., en énergie utile.

Le refroidissement thermoélectrique est aujourd'hui principalement utilisé pour le refroidissement de petits volumes (glaciaires alimentaires ou médicales...).

Dans notre travail nous avons étudié la thermoélectricité et les effets thermoélectriques à savoir : l'effet Seebeck, Peltier et Thomson. Nous nous sommes par la suite intéressé aux matériaux thermoélectriques qui sont caractérisés par trois paramètres: le coefficient Seebeck, la conductivité électrique et la conductivité thermique. Les qualités d'un matériau thermoélectrique se mesurent par un coefficient sans dimensions appelé facteur de mérite ZT. Un bon matériau thermoélectrique doit posséder un bon coefficient Seebeck, une bonne conductivité électrique et une faible conductivité thermique.

Dans le but d'étudier les couplages photovoltaïque-thermoélectricité, nous avons fait une étude sur les cellules solaires photovoltaïques, leur principe de fonctionnement, les paramètres influant sur le rendement et les technologies photovoltaïques.

L'inconvénient majeur des cellules photovoltaïques et leur faible rendement, déplus les radiations non converties échauffent le panneau. Une solution a été proposée, celle-ci consistant à placer un module thermoélectrique sur la face arrière du panneau solaire de manière à ce que le réchauffement du panneau atteint le module thermoélectrique et produit du courant électrique par effet Peltier et ainsi augmenter le rendement.

Afin d'aboutir à cet objectif, nous avons décomposé notre travail en trois chapitres :

- **Chapitre 1** : Dans lequel on va parler sur le phénomène photovoltaïque.
- **Chapitre 2** : Est consacré au thermoélectrique.
- **Chapitre 3** : Est la partie de simulation du couplage entre photovoltaïque-thermoélectrique. Les résultats obtenus sont présentés et commentés dans ce même chapitre.

En finalisant notre travail par une conclusion générale et perspective au future.

Chapitre I

Généralité su le Photovoltaïque .

I.1.Introduction

Dans ce chapitre on fait appel à quelques bases indispensables dans le domaine photovoltaïque, Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie photovoltaïque

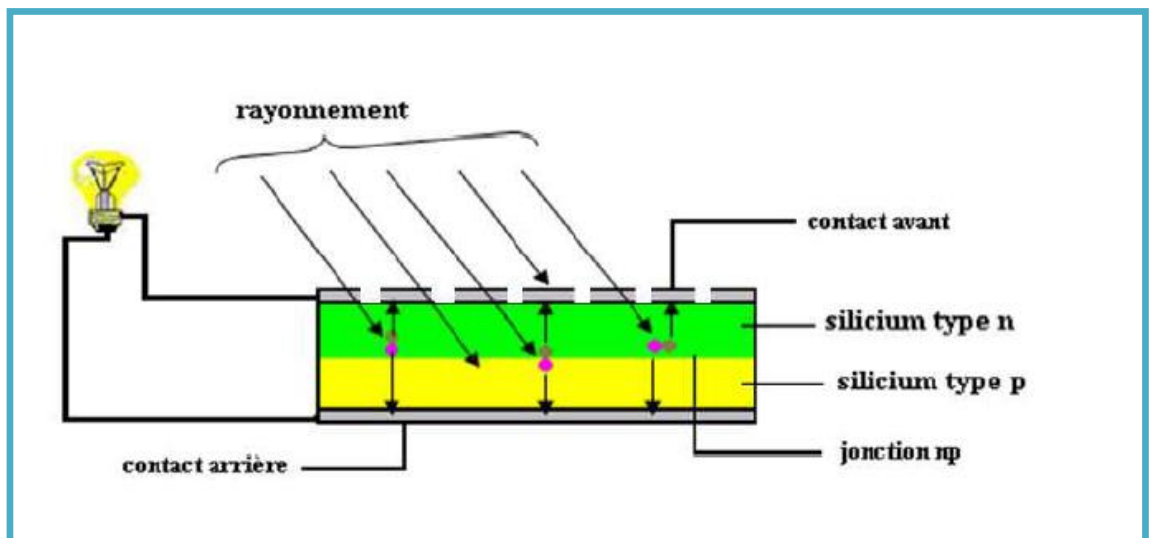
I.2. Le photovoltaïque

I.2.1. Définition

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie Électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable.

I.2.2. Principe d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un composant à semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique ; donc le principe de fonctionnement fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

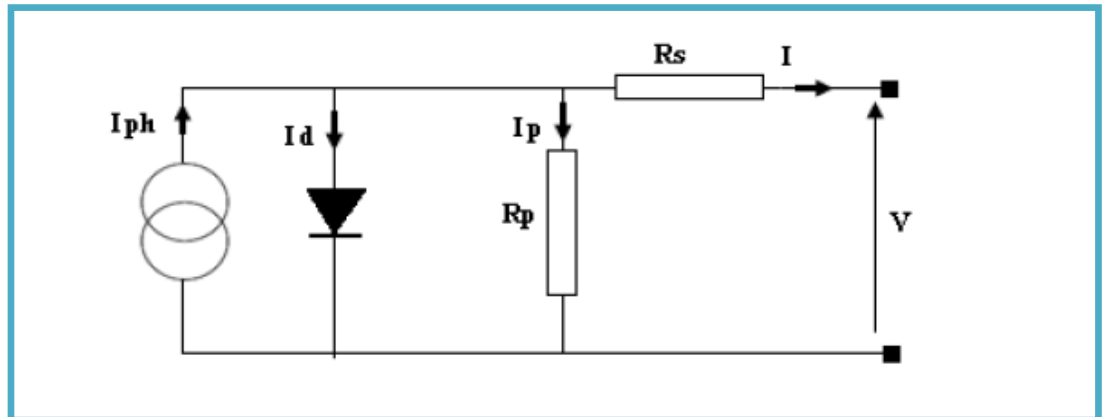


Figure(I.1) : Principe de l'effet photovoltaïque.

I.2.3. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairage et celui d'un générateur de courant produisant un courant I_{ph} auquel se soustrait le courant

de la polarisation de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simplifiée du fonctionnement de la cellule.



Figure(I.2) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque[1].

Les différents paramètres de ce modèle sont :

I.2.3.1. Générateur de courant: il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photo généré.

I.2.3.2. Résistance série R_s : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.

I.2.3.3. Résistance R_p : également connue sous le nom de court circuit, elle peut être due à un court circuit sur les bords de la cellule. On l'appelle aussi résistance de fuite.

I.2.3.4. Diode: modélise la diffusion des porteurs dans la base de l'émetteur[1].

I.2.4. Différents types de cellules PV

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs principalement à base de Silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs: de Sulfure de Cadmium (CDs), de Tellurure de Cadmium (CdTe), de Germanium (Ge), de Sélénium (Se) ou d'Arséniure de Gallium (GaAs). Le Silicium est actuellement le semi-conducteur le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. En effet, il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques dont les plus importants sont les suivantes :

I.2.4.1. Cellules à silicium monocristallin

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont formées d'un seul cristal. Elles sont en général d'un bleu uniforme.

I.2.4.1.1. Avantage

- Elles permettent d'obtenir des rendements élevés (rendement entre 13 à 17

I.2.4.1.2. Inconvénients

- Leur coût est très élevé.
- Rendement faible sous un faible éclairage.

I.2.4.2. Cellules à silicium poly-cristallin

Elles sont constituées de plusieurs cristaux. La cellule a un aspect bleuté mosaïque (pas uniforme). Leur rendement est de 11 à 15%.

I.2.4.2.1. Avantage

- Un bon rendement, mais cependant moins bon que pour les cellules monocristallines.
- Elles offrent actuellement un bon rapport qualité/prix.

I.2.4.2.2. Inconvénients

Rendement faible sous un faible éclairage.

I.2.4.3. Cellules amorphes

Le silicium est utilisé en couche mince, il n'est pas cristallisé. Il est déposé sur une plaque de verre. Ce type de cellule on le trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation (montre, calculatrice).

I.2.4.3.1. Avantage

- Moins cher que les autres.
- Fonctionnement avec un éclairage faible.

I.2.4.3.2. Inconvénients

- Rendement faible.
- Performances qui diminuent avec le temps, durée de vie courte.

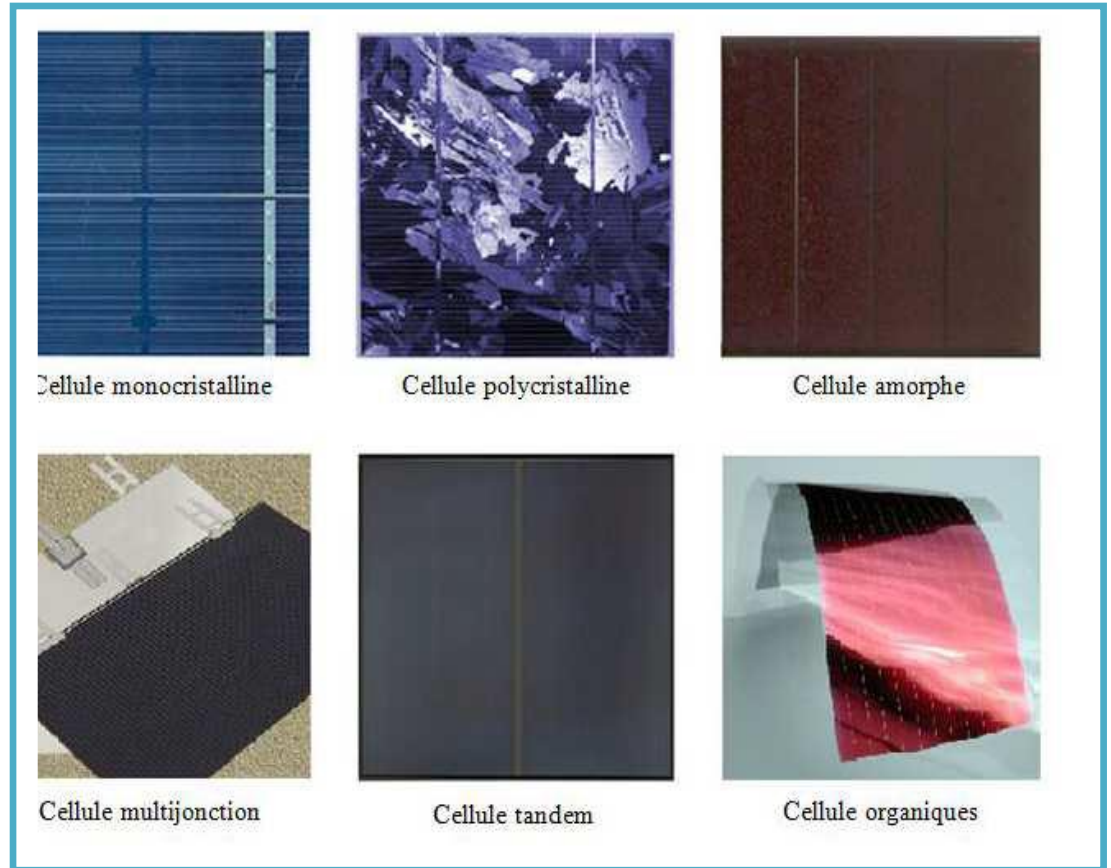
I.2.4.4. Cellules multi-jonctions

Les cellules multi-jonctions sont constituées de différentes couches qui permettent d'absorber la majorité du spectre solaire. Mais ces cellules ne sont pas commercialisées.

I.2.4.5. Cellules organiques

Encore au stade de la recherche, cette nouvelle technologie permet à présent la production de cellules solaires organiques légères, flexibles sur une grande surface et moins chères à produire.

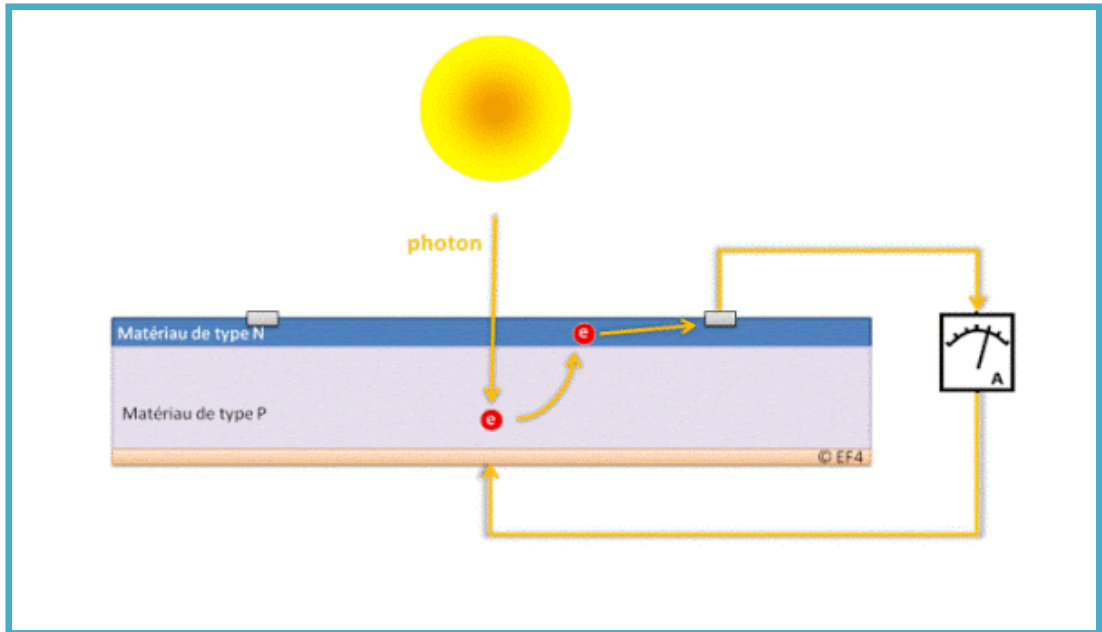
Les cellules PV organiques sont de trois types ; moléculaire, polymère et hybride[2].



Figure(I.3) : Types de cellules photovoltaïques[2].

I.2.5. L'Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un des effets photoélectrique. Il est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïque pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire. Il apparaît lors de l'absorption de photons ultraviolets de la lumière sur un matériau semi-conducteurs qui transmet leur énergie aux électrons .



Figure(I.4) : L'effet photovoltaïque

Des paires électrons trous (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction apparaissent alors, créant une tension ou un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe : photodiode , phototransistor ou photopiles. Cet effet photovoltaïque est notamment utilisé dans les panneaux solaire photovoltaïque[3].

I.2.6. Avantages et inconvénients

I.2.6.1. Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, 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.

I.2.6.2. Inconvénients

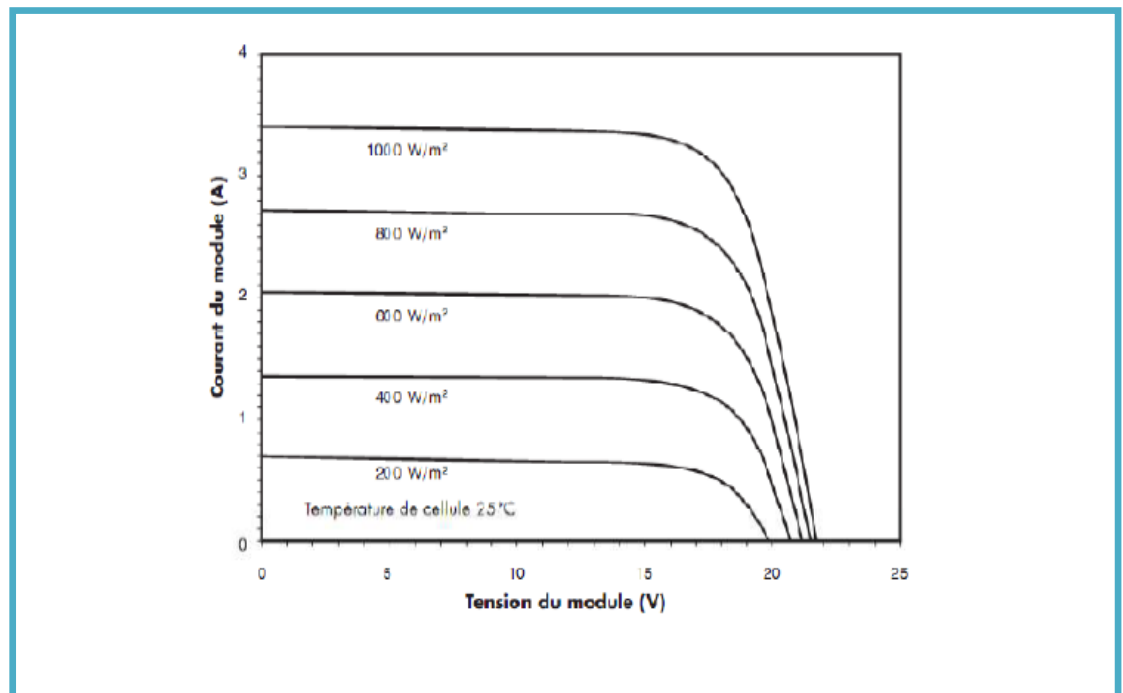
Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients...

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis[4].

I.2.7. Facteurs influents sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.2.7.1. Influence de l'ensoleillement

L'apport d'énergie permettant la séparation électron-trous étant assuré par l'énergie lumineuse, il est donc normal que l'augmentation de l'ensoleillement E entraîne automatiquement l'augmentation des paires électrons-trous. Le courant débité est proportionnelle à l'ensoleillement E [5].

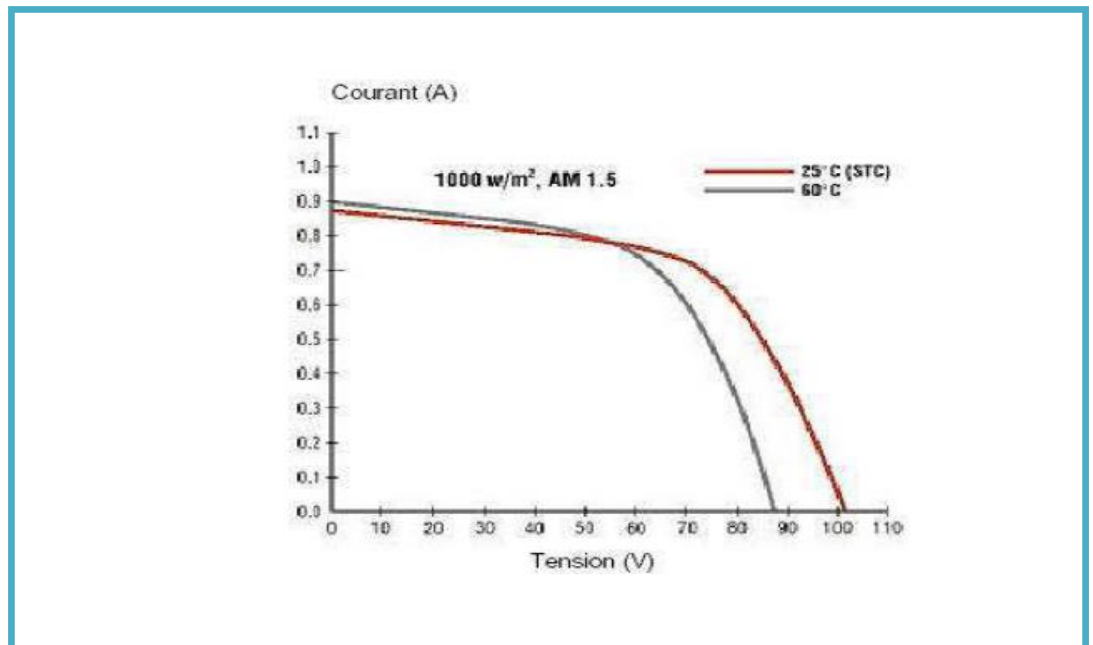


Figure(I.5) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I(V) [5].

I.2.7.2. Influence de la température

La température a une influence notable sur le rendement d'une cellule Photovoltaïque, nous remarquons que le courant de court circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée. La température a donc une influence non négligeable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque (perte de puissance de l'ordre de 9-15% pour une augmentation de 30°C [6].

Pour le même éclairement les courbes I(V) changent avec la température des cellules.



Figure(I.6) : Influence de la température sur la caractéristique I(V) [6].

I.2.8. Cellules solaires organiques

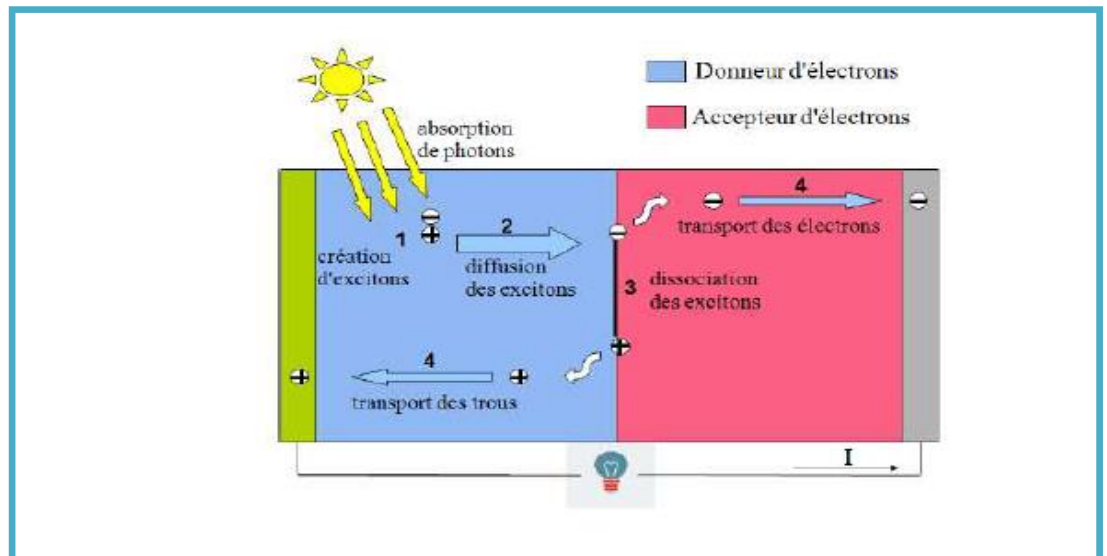
Une cellule photovoltaïque organique est un dispositif comprenant une couche active organique d'une épaisseur de l'ordre de la centaine de nm, insérée entre deux électrodes, l'une d'entre elle est transparente afin de permettre la pénétration de la lumière dans la couche active.

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique dans ces cellules est basée sur l'effet photovoltaïque. Les différentes étapes de la conversion lumière-électricité d'une cellule photovoltaïque organique sont les suivantes [7] :

- Absorption des photons et création des excitons.
- Diffusion des excitons.
- Dissociations des excitons.

- Transport de porteurs de charges.

La figure (I-7) résume ces quatre étapes :



Figure(I.7) : Les quatre étapes de la conversion photovoltaïque organique[7].

I.3. Energie solaire

I.3.1. Définition

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le soleil sous la forme lumière et de chaleur . Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le Soleil disparaîtra un jour).

L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'Homme pour s'éclairer (fenêtres, puits de lumière), se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques[8].

I.3.2. Différents types d'énergie solaire

Il faut dire que les techniques d'exploitation de l'énergie solaire n'ont cessé de s'améliorer au fil des années. Aujourd'hui, on compte trois types d'énergie solaire catégorisés selon leurs méthodes de production :

I.3.2.1. Energie solaire thermique

Ce type d'énergie est produit à partir de panneaux solaires thermiques posés sur le toit de la maison pour capter la chaleur du soleil. Les panneaux solaires thermiques contiennent des fluides caloporteurs, une fois chauffés par le soleil, ces derniers

chauffent à leur tour le ballon d'eau chaude. L'énergie thermique solaire ainsi obtenue peut être employée de différentes façons : chauffage solaire, chauffe-eau, cuisinières...

I.3.2.2. Energie solaire photovoltaïque

Si l'énergie solaire thermique est obtenue par la chaleur du soleil, l'énergie solaire photovoltaïque l'est par l'énergie même du rayonnement solaire. Autrement dit, les panneaux photovoltaïques, souvent installés sur le toit, recueillent les photons du soleil et les transforment en électricité. Ces panneaux photovoltaïques sont composés d'une superposition de couches de cellules dont l'une est chargée négativement et l'autre positivement. Dès qu'un photon traverse ces couches, il produit une tension électrique. Il ne reste plus qu'à raccorder un fil à la borne négative et un autre à la borne positive pour exploiter l'électricité produite. En gros, l'énergie solaire photovoltaïque fonctionne comme une pile.

I.3.2.3. Energie solaire thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique, quant à elle, est produite par des centrales solaires à concentration. Cet équipement est composé de miroirs avec des fluides caloporteurs et d'un générateur d'électricité solaire. Tout comme les panneaux solaires thermiques, ces miroirs transforment l'énergie apportée par le rayonnement solaire en chaleur, mais à une température considérablement plus élevée. Cette dernière peut, d'ailleurs, aller de 250 à 800° en fonction des techniques utilisées. La chaleur ainsi obtenue va, ensuite, être convertie en énergie électrique en activant le turbo-alternateur[9].

I.3.3. avantages et Inconvénients

I.3.3.1. avantages

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante
- l'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre
- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage. L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes.
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles

- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Le rendement énergétique est positif : il faut en moyenne entre 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommé pour sa fabrication.

I.3.3.2. Inconvénients

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé
- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes
- Un cycle de vie en question : la durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. Le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an. De plus, les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre, chrome, silicium, cadmium et tellure.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple[10].

I.4. Photovoltaïque/thermique

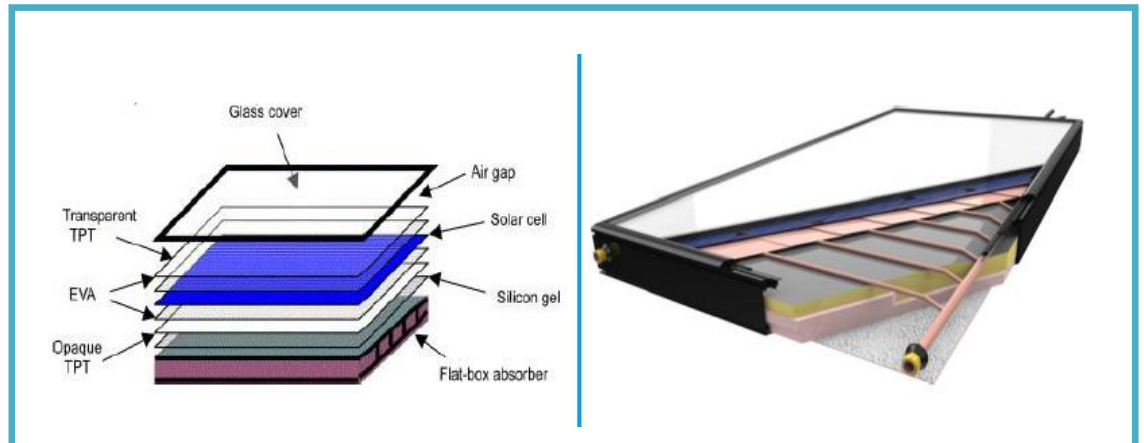
I.4.1. Définition

Un panneau photovoltaïque thermique (PV-T) ou panneau solaire hybride ou Photovoltaïque thermal hybride solaire collecter pour les anglophones, est un dispositif « hybride » conçu pour à la fois produire de l'électricité photovoltaïque et recueillir l'énergie thermique provenant du soleil pour la transmettre à un fluide caloporteur[11].

I.4.2. Principe du PV/T

La recherche et le développement des systèmes solaires photovoltaïques-thermiques ont été menés depuis les années 1970. Surtout après l'embargo pétrolier de 1973/4, on a pris de plus en plus conscience de la rareté des ressources et de la nécessité de développer des ressources d'énergie renouvelable indépendantes et locales. Cela a été particulièrement significatif pour l'industrie photovoltaïque et donc aussi pour le

développement de systèmes PV/T. La principale caractéristique d'un système PV/T est qui convertit le rayonnement solaire en électricité et en chaleur simultanément. L'électricité et la chaleur sont souvent nécessaires au même endroit, ce qui fait du système photovoltaïque et thermique une combinaison particulièrement intéressante. Dans les systèmes solaires thermiques standard, la chaleur est absorbée par une plaque d'absorption spécialement conçue. Dans les systèmes PV/T, la cellule solaire photovoltaïque est utilisée est l'absorbeur de chaleur et a donc une double fonction. Outre le principal avantage de produire de l'électricité et de la chaleur simultanément là où il est nécessaire, un système PV/T a des avantages supplémentaires. La performance électrique des cellules solaires est réduite lorsqu'elles sont exploitées à des températures plus élevées. Grâce au processus d'extraction de chaleur d'un système PV/T, la cellule photovoltaïque est activement refroidie et permet ainsi des performances électriques plus élevées. En outre, le rendement énergétique total par surface unitaire est augmenté; deux mètres carrés de PV/T donne plus d'électricité et de chaleur qu'un mètre carré de photovoltaïque et un mètre carré de panneaux solaires thermiques ensemble. En outre, les systèmes combinés permettent une apparence plus uniforme sur les toits et moins de coûts pour l'installation.



Figure(I.8) : Matériel de l'eau pile

Figure(I.9) : Collecteur PV/T

La façon la plus simple de faire un collecteur PV/T est de coller une cellule solaire photovoltaïque sur le dessus d'un collecteur solaire thermique. Cette conception simple peut être améliorée en ajoutant une couverture transparente (par exemple le verre de fer bas) sur le dessus de la cellule solaire pour limiter la perte de chaleur sur le côté avant du collecteur[12].

I.4.3. Application du PV-T

En général, les systèmes solaires thermiques sont en principe utilisés pour le préchauffage de l'eau du robinet dans le secteur résidentiel ou pour les piscines. Toutefois, dans les bureaux commerciaux, l'eau du robinet ne représente qu'une fraction de la nécessité énergétique totale d'un bureau, la plus forte demande d'énergie dans les bureaux commerciaux est de loin pour le chauffage et le refroidissement de l'espace et pour que l'électricité exécute leur équipement. Afin de répondre à ces demandes énergétiques des bureaux aux Pays-Bas, des combinaisons intelligentes de systèmes sont nécessaires. Deux combinaisons de systèmes qui sont pensés dans le projet Nanosol sont très brièvement décrites ci-dessous.

I.4.3.1. Pompe à chaleur

Les pompes à chaleur fonctionnent habituellement à l'électricité et sont utilisées pour améliorer un certain flux de chaleur en soustrayant la chaleur supplémentaire de son environnement. Pour cette raison, son efficacité dépasse 100 pour cent et donc sa performance est généralement donnée comme un coefficient de performance (COP). Une pompe à chaleur avec un facteur COP de 3 implique que la pompe à chaleur délivre 3 unités de chaleur (p. ex. 3 kW thermal) pour chaque unité d'entrée électrique (1 kW electrical). Ce faisant, la pompe à chaleur soustrait également deux unités de chaleur (2 kW thermal) de son environnement. Pour cette raison, les pompes à chaleur se composent toujours d'un système divisé dont une partie est placée à l'intérieur du bâtiment et l'autre à l'extérieur du bâtiment. Par ce principe, une pompe à chaleur pourrait être utilisée en combinaison avec un système PV/T; la chaleur des systèmes PV/T pourrait être mise à niveau à une valeur plus élevée (3kWthermal) et en même temps le refroidissement du bâtiment (2 kW thermal). La chaleur améliorée peut être utilisée ou pourrait être éliminée.

I.4.3.2. Pompe à chaleur avec ATES

Un système coûteux mais très efficace est la combinaison d'une pompe à chaleur avec Aquifère Thermal Energy Storage (ATES). Dans ce système, la pompe à chaleur échange de la chaleur de l'intérieur d'un bâtiment avec deux grands entrepôts (un froid et un stockage chaud) sous le sol. Pendant l'été, la chaleur de l'intérieur du bâtiment est pompée et stockée dans le sol (chargement de l'aquifère chaud) tandis que l'aquifère froid n'est pas chargé et ainsi refroidir le bâtiment. En hiver, la chaleur stockée est utilisée pour le chauffage du bâtiment et simultanément la source froide est rechargée à

nouveau. Un inconvénient de ce système cependant, est le fait qu'en général plus de chaleur est soustraite du sol que ce qui est remplacé à nouveau, résultant en un système déséquilibré. Un système PV-T pourrait parfaitement être combiné avec ce système pour reconstituer la source chaude de stockage d'énergie thermique aquifère[13].

I.4.4. Avantages et inconvénients du mixte photovoltaïque / thermique

Un panneau solaire hybride offre de très nombreux avantages pour quelques inconvénients. D'abord, le rendement énergétique de ce type de panneau solaire est bien supérieur aux panneaux solaires photovoltaïques. Aussi, vous économisez de l'espace en combinant deux technologies complémentaires sur une même surface.

Le panneau solaire PV/T a plusieurs avantages parmi lesquels on peut citer :

- Un rendement énergétique intéressant : le rendement énergétique est de 70 à 90% contre 12 à 20% pour les panneaux solaires photovoltaïques.
- Une production d'énergie supérieure : un panneau solaire hybride permet de générer jusqu'à deux fois plus d'énergie pour une maison individuelle et jusqu'à quatre fois plus pour un bâtiment collectif.
- L'optimisation de l'espace : économisez l'espace en combinant la production électrique et thermique sur une même surface.
- Une technologie non polluante : l'électricité photovoltaïque n'est pas génératrice de pollution. Il s'agit donc d'une solution entièrement écologique s'inscrivant dans les démarches de préservation de notre planète.
- Une source d'énergie illimitée : l'énergie solaire est inépuisable, gratuite et naturelle.
- Une génération d'économies : le solaire hybride permet de réaliser des économies pendant 20 ans, soit tout au long de la durée de vie du panneau.
- Un coût d'énergie compétitif : les subventions nécessaires au solaire se réduisant drastiquement, le prix de revente de l'électricité par les professionnels baisse également. Comme toute solution, celle-ci compte également certains inconvénients. Le principal est sa sensibilité en fonction des températures U qui font varier son rendement.
- Une sensibilité en fonction des températures : plus la température augmente, plus son rendement baisse.
- Un rendement limité : la stabilisation de la température du système n'offre pas une production solaire thermique optimale.
- Une dépendance au rayonnement solaire : aucune énergie solaire n'est produite en l'absence de rayonnement (nuit) [14].

I.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté brièvement le principe de l'énergie solaire ainsi que ses différentes formes notamment le solaire PV et le PV/T. dans un deuxième lieu, on a parlé sur les différentes types de cellules photovoltaïque. Dans le chapitre suivant, on va parler sur la production de l'électricité en utilisant le principe photovoltaïque-thermoélectrique.

Chapitre II

Thermoélectrique (module Peltier)

Chapitre II

Thermoélectricité (module Peltier)

II.1. Introduction

Ce chapitre a tout d'abord, présenté les différentes notions générales sur la thermoélectricité telles que les effets thermoélectriques (Seebeck, Peltier et Thomson) ou bien encore les grandeurs physiques principales intervenant (rendement de conversion, facteur de mérite).

Ensuite nous avons mentionnés les deux majeures applications des matériaux thermoélectriques à savoir la réfrigération et la génération d'électricité (module Peltier).

II.2. Thermoélectricité

L'effet thermoélectrique est un phénomène physique caractéristique de certains matériaux contribuant à la conversion de l'énergie. Un matériau thermoélectrique permet de transformer directement de la chaleur en électricité (génération d'électricité) ou de déplacer des calories par l'application d'un courant électrique (application de réfrigération).

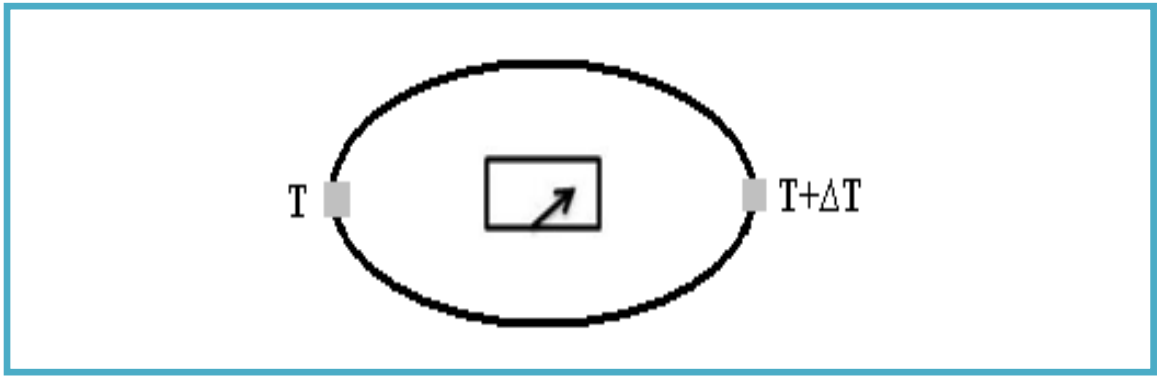
II.3. Effets thermoélectriques

II.3.1. Effet Seebeck

II.3.1.1. Définition

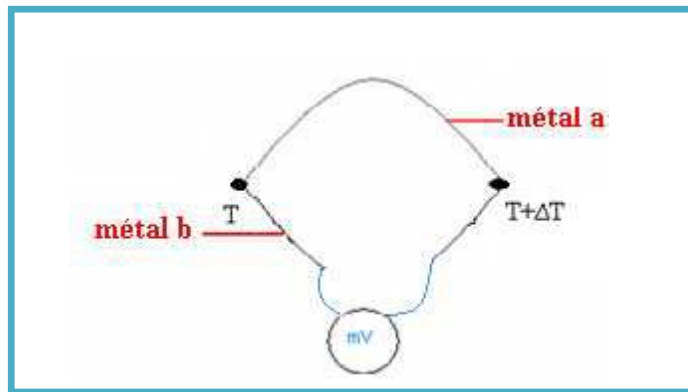
En 1821, le physicien Allemand THOMAS SEEBECK remarqua qu'une aiguille métallique est déviée lorsqu'elle est placée entre deux conducteurs de natures différentes et soumis à un gradient de température. Plus tard, on expliquera le phénomène par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température (Figure(II.1)) . Un matériau thermoélectrique va donc permettre de transformer directement la chaleur en électricité.

L'utilisation la plus connue de cet effet est la mesure de la température à l'aide d'un thermocouple.



Figure(II.1) : Premier dispositif expérimental décrit par Seebeck.

II.3.1.2. Schéma de principe



Figure(II.2) : Principe de l'effet Seebeck.

Un gradient de température (dT) appliqué aux extrémités d'un barreau conducteur engendre spontanément une différence de potentiel (dV) proportionnelle à la différence de température. La constante de proportionnalité constitue le coefficient Seebeck.

$$\alpha_{ab} = S_{ab} = \frac{dv}{dt} \dots\dots\dots (II.1)$$

II.3.1.3. Explication du phénomène

Lorsqu'un métal est soumis à un gradient de température ΔT , l'énergie moyenne des électrons étant plus élevée du côté chaud que du côté froid, il en résulte un gradient énergétique. Celui-ci va donner naissance à une force qui va entrainer la diffusion des électrons du côté chaud vers le côté froid. Cette diffusion entraine la polarisation du matériau (accumulation des porteurs majoritaires négatifs du côté froid et les porteurs majoritaires positifs du côté chaud) qui induit un champ électrique \vec{E} dont l'effet est d'aider les électrons froids à diffuser vers le coté chaud [15,16].

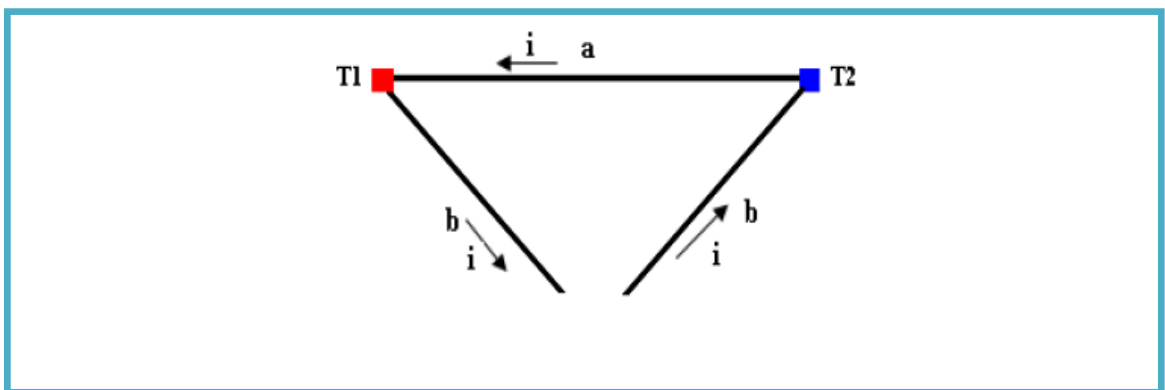
II.3.2. Effet Peltier

II.3.2.1. Définition

En 1834, le physicien Français JEAN PELTIER découvrit le second effet thermoélectrique : une différence de température apparaît aux jonctions de deux matériaux de nature différente (matériau type n et matériau type p) soumis à un courant électrique.

Un matériau thermoélectrique permettra donc de générer du froid ou de la chaleur par l'application d'un courant électrique.

II.3.2.2. Schéma de principe



Figure(II.3) : Effet Peltier .

Dans l'effet Peltier, la quantité de chaleur absorbée (Q) ou générée est proportionnelle au courant électrique (I).

La constante de proportionnalité π est le coefficient Peltier :

$$\pi = \frac{Q}{I} \dots\dots\dots (II.2)$$

II.3.2.3. Explication du phénomène :

Lorsque les porteurs de charge passent d'un niveau de basse énergie à un niveau d'énergie plus élevé e (par exemple lors du passage d'un matériau de type p à un matériau de type n), ils reçoivent de l'énergie de la part du système avec lequel ils interagissent. ce système ne peut être que le réseau cristallin sur lequel ils effectuent des collisions.

Ainsi, le réseau cristallin cède de l'énergie aux porteurs de charge et par conséquent l'effet Peltier se traduit par un refroidissement de la jonction. Si au contraire, les porteurs de charge passent d'un niveau de haute énergie à un niveau de basse énergie quand ils

traversent une jonction, l'énergie perdue est cédée au réseau et l'effet Peltier se traduit par un échauffement de la jonction. C'est donc la différence de nature entre les matériaux a et b et le sens du courant qui les traverse qui sont les causes d'un gradient de température dans l'échantillon [17].

Le couplage entre les phénomènes électriques et thermiques ouvre la voie à deux applications possibles, à savoir la réfrigération et la génération électrique. La réfrigération est rendue possible par le flux de chaleur qui s'établit suite à l'imposition de courant électrique aux bornes d'un matériau. Ce flux permet d'évacuer la chaleur d'un Corps à réfrigérer vers une zone où la chaleur est dissipée vers le milieu ambiant. La génération de courant peut se produire quand une chaleur extérieure impose une différence de température aux extrémités du matériau. Une tension électrique s'établit et elle peut être exploitée pour générer un courant dans une résistance de charge.

II.3.3. Effet Thomson

En 1851, le physicien William Thomson montra que les effets Seebeck et Peltier sont liés. On met cette correspondance en évidence lorsqu'on applique simultanément un gradient de température et un courant électrique. La différence fondamentale avec les deux premiers effets est que ce dernier ne concerne qu'un seul matériau et ne nécessite pas la présence d'une jonction ; en d'autre terme, l'effet Thomson définit une chaleur absorbée ou dégagée par unité de temps lorsqu'un courant électrique I traverse une région d'un matériau ayant un gradient de température.

Dans chaque segment dX du matériau, le gradient du flux thermique est donné par :

$$\frac{dQ}{dx} = \tau I \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots (II.3)$$

où x est la coordonnée spatiale et τ le facteur de Thomson, donné par la relation :

$$\tau_a - \tau_b = T = \frac{dS_{ab}}{dt} \dots\dots\dots(II.4)$$

Les trois coefficients absolus S, π et τ sont liés par la relation : [18]

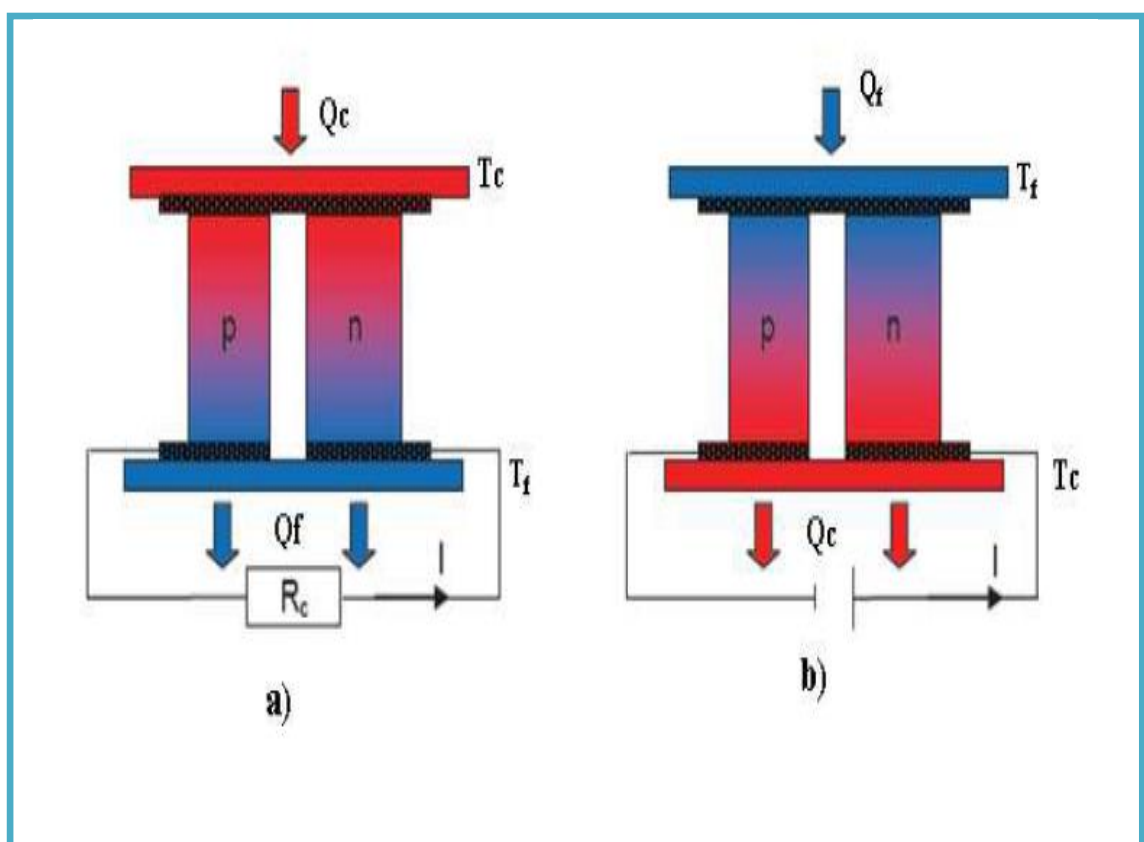
$$\pi = \tau S T \dots\dots\dots (II.5)$$

II.3.4. Applications des modules thermoélectriques

Un dispositif thermoélectrique (TE), peut transformer directement de la chaleur en électricité (un générateur TE) ou il peut transférer la chaleur (refroidir) en appliquant un courant électrique. Il y a donc deux applications principales : la réfrigération et la génération d'électricité.

La réfrigération thermoélectrique permet de pomper la chaleur d'un objet par application d'un courant électrique. Deux majeurs avantages de la réfrigération thermoélectrique sont l'absence de bruit et de vibration et ceci grâce à l'absence de pièces mobiles.

Les avantages de la génération d'électricité par l'effet thermoélectrique sont la fiabilité, la durabilité et la faible dimension des dispositifs. À cause de la dimension ajustable du générateur thermoélectrique, il est facile de générer de l'électricité en utilisant des sources de chaleur existantes inutilisées. Par exemple, Il y a environ 30 à 35% de la chaleur qui est rejetée dans l'atmosphère dans plusieurs applications industrielles. Un système de générateur thermoélectrique peut transformer la chaleur inutilisée en énergie électrique[19].

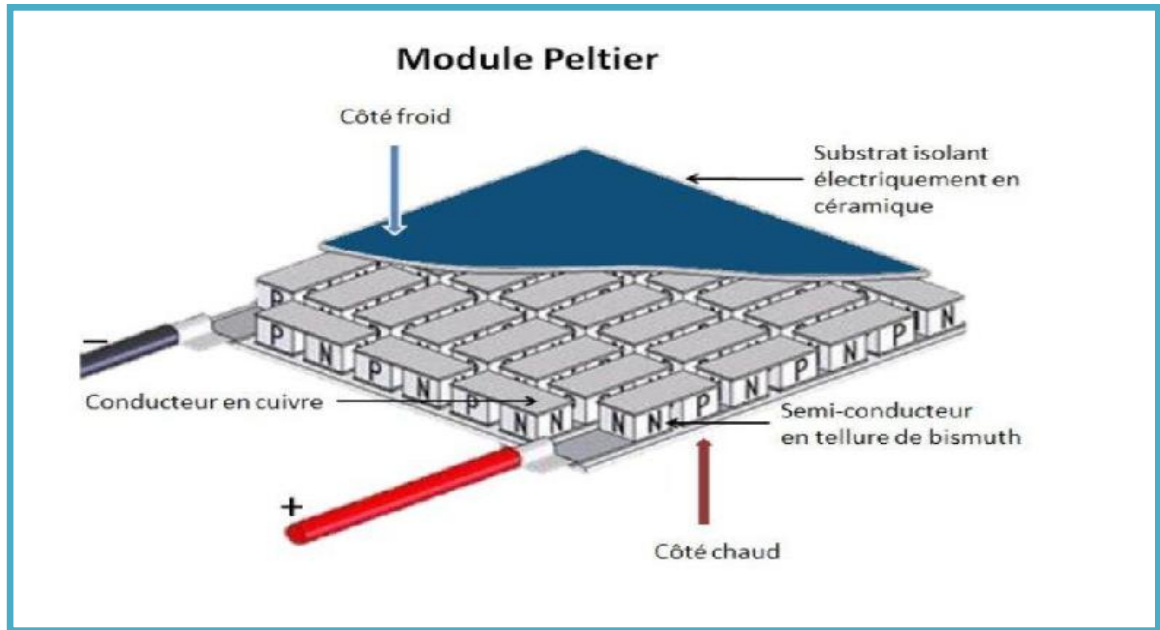


Figure(II.4) : Générateur (a) et refroidisseur (b) thermoélectrique[19].

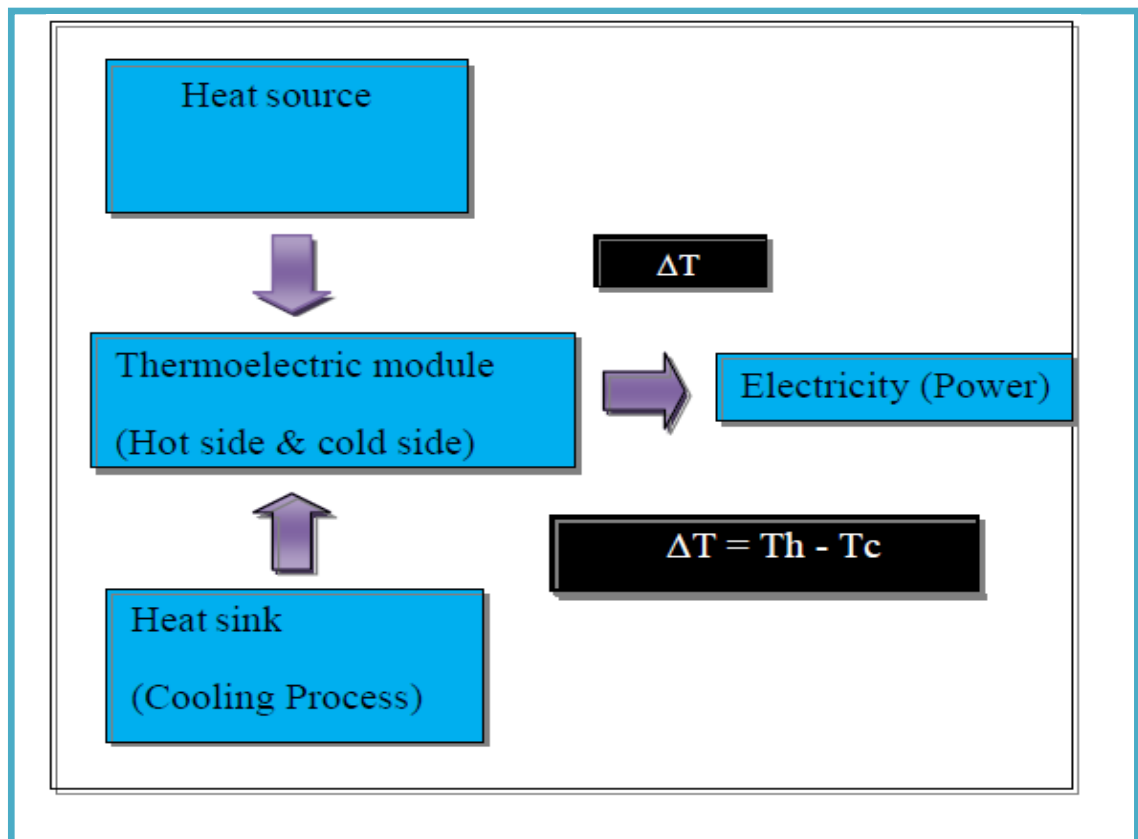
II.4. Module Peltier

II.4.1. Principe du module Peltier

Une cellule à effet Peltier peut se définir rapidement comme une plaque en céramique. Celle-ci fait du chaud et du froid, quand du courant électrique est introduit. Un coté absorbe les calories et l'autre face les dissipe[20].

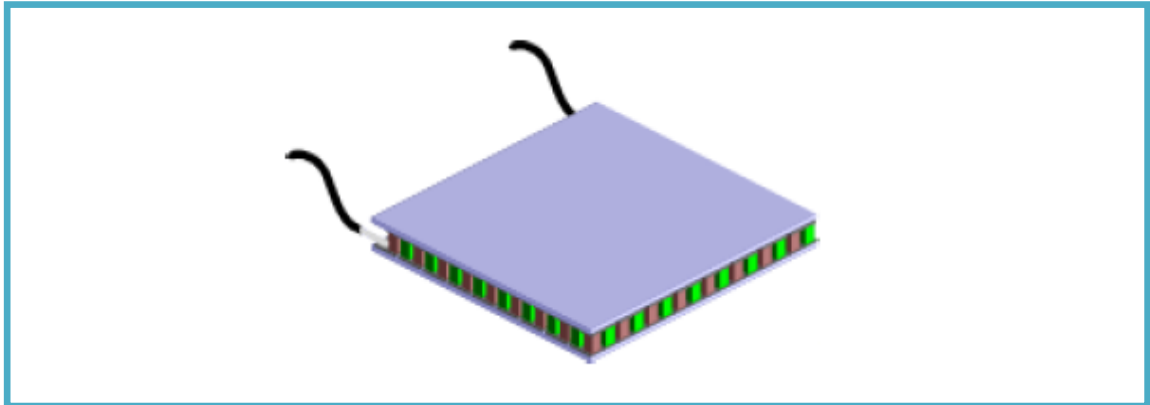


Figure(II.5) : schéma représente la construction d'un module peltier[20].



Figure(II.6) Schéma bloc duPrincipe du Générateur Thermo-Electrique [21].

II.4.2. Applications dédiées au module Peltier



Figure(II.7) Schéma d'une cellule à effet Peltier

L'effet Peltier est utilisé comme technique de réfrigération. Elle est utilisée dans des domaines où une grande précision et fiabilité sont demandés : recherche, médical, spatial, militaire, etc....[22].

II.5. Capteurs thermoélectriques

La fonction capteur des matériaux thermoélectriques est la fonction la plus connue. En effet toutes les mesures thermocouples sont basées sur la thermoélectricité avec l'effet Seebeck. Mais l'utilisation des couches minces comme capteur n'est pas la plus répandue. Une architecture permettant de détecter un échauffement dû à des radiations a été réalisée telle qu'indiquée sur la figure suivante :

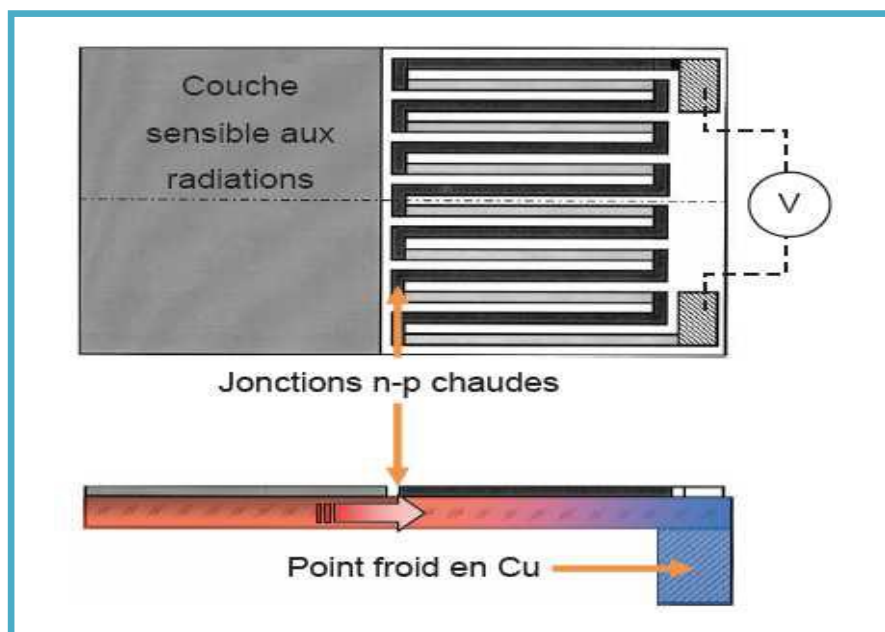


Figure (II.8) : exemple de capteur thermoélectrique [23].

Dans ce système une couche sensible aux radiations est déposée proche d'une jonction n-p. Cette couche échauffée par les radiations va échauffer à son tour la jonction n-p par conduction dans le substrat. A l'autre extrémité, un bloc de cuivre permet de maintenir une température constante sur les jonctions n-p servant ainsi de point froid et entraînant alors une génération de tension[23].

II.5.1. Types de Thermocouple

II.5.1.1. Définition

Un thermocouple est un capteur de température qui est utilisé pour évaluer les températures dans la fabrication, l'usinage et les applications scientifiques, ainsi que les appareils de tous les jours. Un thermocouple peut être utile pour s'assurer que les surfaces, comme l'acier ou d'autres métaux ou alliages métalliques, sont chauffées de façon appropriée pour l'usinage, ou pour évaluer lorsqu'un conteneur ou un emplacement est trop chaud et que des liquides de refroidissement doivent être introduits.

Un thermocouple est basé sur des calculs différentiels à partir d'un point de température connu, appelé une jonction de froid ou de référence, et une sonde, reliée à l'appareil à mesurer. Les conditions de laboratoire permettent une jonction froide naturelle, mais les conditions de thermocouple appliquées nécessitent souvent l'utilisation d'une constante de température générée artificiellement. Étant donné que les tensions générées par la connexion de métaux différents sont connues et constantes, elles sont utilisées comme points de référence en fonction de leur relation avec la jonction de mesure. Lorsque la machine détermine cette différence, elle calcule la température et envoie le message au dispositif de mesure.

Étant donné que différentes combinaisons de métaux produiront des températures différentes, et que ces différents métaux ont des niveaux de durabilité et de résistance différents, les chercheurs ont produit des combinaisons normalisées pour exploiter le potentiel de résultats maximum dans un ensemble normalisé de combinaisons.

Il existe quatre classifications différentes d'appariements thermocouple, la plupart se distinguent par un titre de lettre majuscule. Il s'agit de la classe du corps à la maison, la classe supérieure de la croûte, la classe rarifiée et la classe exotique. La classe du corps à la maison se compose de métaux « standard » ou couramment utilisés, tandis que la classe supérieure de croûte représente toutes les combinaisons de platine. La classe rarifiée se compose de métaux réfractaires et la classe exotique est beaucoup plus spécifique dans la

nature, généralement des combinaisons spéciales de métaux rares utilisés pour des applications spécifiées.

Habituellement des combinaisons spéciales de métaux rares utilisés pour des applications spécifiées [24,25].

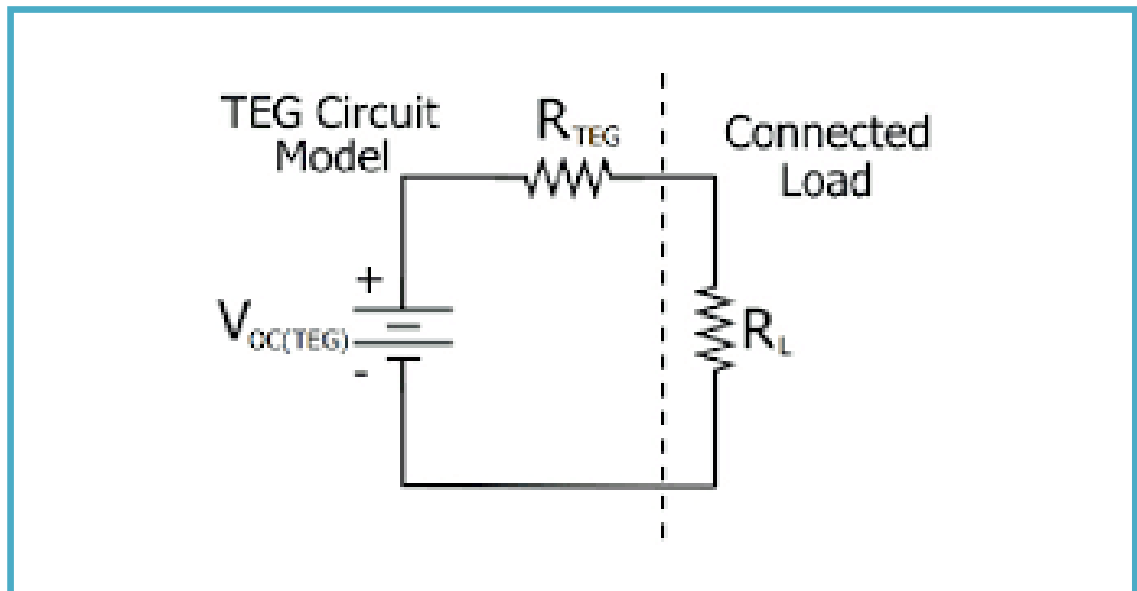


Figure (II.9) : Circuit électrique thermoélectrique [25].

Étant donné qu'un thermocouple mesure de larges plages de température et peut être relativement accidenté, les thermocouples sont très souvent utilisés dans l'industrie. Les critères suivants sont utilisés dans la sélection d'un thermocouple :

- Gamme de température
- Résistance chimique du matériau thermocouple ou gaine
- Résistance à l'abrasion et aux vibrations
- Exigences d'installation

Tableau(II.1) :Types de générateurs de thermocouple[26].

Type du Thermocouple	Composition	Temperature Range
B	Platinum 30% Rhodium (+)	1370-1700 degrees C
	Platinum 6% Rhodium (-)	
C	W5Re Tungsten 5% Rhenium (+)	1650-2315 degrees C
	W26Re Tungsten 26% Rhenium(-)	
E	Chromel (+)	95-900 degrees C
	Constantan (-)	
J	Iron (+)	95-760 degrees C
	Constantan (-)	
K	Chromel (+)	95-1260 degrees C
	Alumel (-)	
M	Nickel (+)	0-1287 degrees C
	Nickel (-)	
N	Nicrosil (+)	650 -1260 degrees C
	Nisil (-)	
R	Platinum 13% Rhodium (+)	870-1450 degrees C
	Platinum (-)	
S	Platinum 10% Rhodium (+)	980-1450 degrees C
	Platinum (-)	
T	Copper (+)	negative 200-350 degrees C
	Constantan (-)	

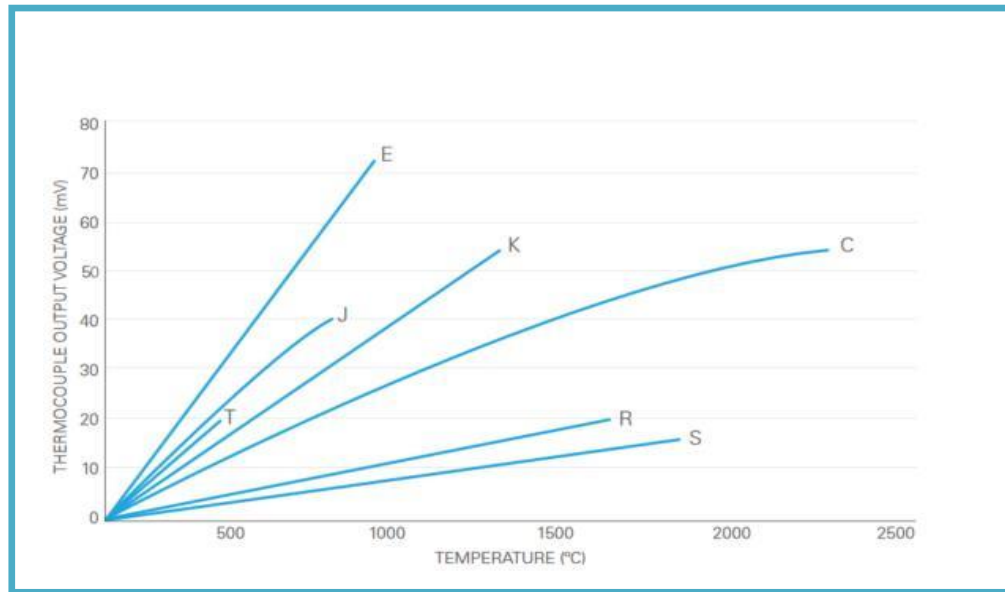


Figure (II.10): Réponse à la température de différents types de thermocouple [26].

Les matériaux thermoélectriques génèrent de l'énergie directement à partir de la chaleur en convertissant les différences de température en tension électrique. Ces matériaux doivent avoir une conductivité électrique élevée et une faible conductivité thermique pour être de bons matériaux thermoélectriques. Ayant une faible conductivité thermique garantit que lorsqu'un côté est fait chaud, l'autre côté reste froid, ce qui aide à générer une grande tension tandis que dans un gradient de température. La mesure de l'ampleur du flux d'électrons en réponse à une différence de température entre ce matériau est donnée par le coefficient Seebeck (S). L'efficacité d'un matériau donné pour produire une puissance thermoélectrique est régie par sa « figure de mérite ».

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{k} \dots \dots \dots (II.7)$$

Pendant de nombreuses années, les trois principaux semi-conducteurs connus pour avoir à la fois une faible conductivité thermique et un facteur de puissance élevée étaient le Bimuth Telluride (Bi₂Te₃), le Telluride de Plomb (PbTe) et le Germanium de Silicium (SiGe). Ces matériaux ont des éléments très rares qui en font des composés très coûteux.

II.6.1. Alimentation photovoltaïque des modules thermoélectriques

La recherche sur l'utilisation de l'effet Peltier à partir d'énergie solaire a connu une forte expansion. Les coûts des cellules photovoltaïques diminuent, leur utilisation est désormais

favorisée. Il existe ainsi des études concernant les réfrigérateurs connectés à des panneaux photovoltaïques.

II.6.1.1. Modules à effet Peltier

Les systèmes thermoélectriques fonctionnent à partir de courant continu, ils peuvent ainsi être couplés à des panneaux solaires photovoltaïques. La Figure (II.12) représente un prototype de casquette thermoélectrique alimenté par énergie solaire photovoltaïque pour fonctionner en mode Peltier.

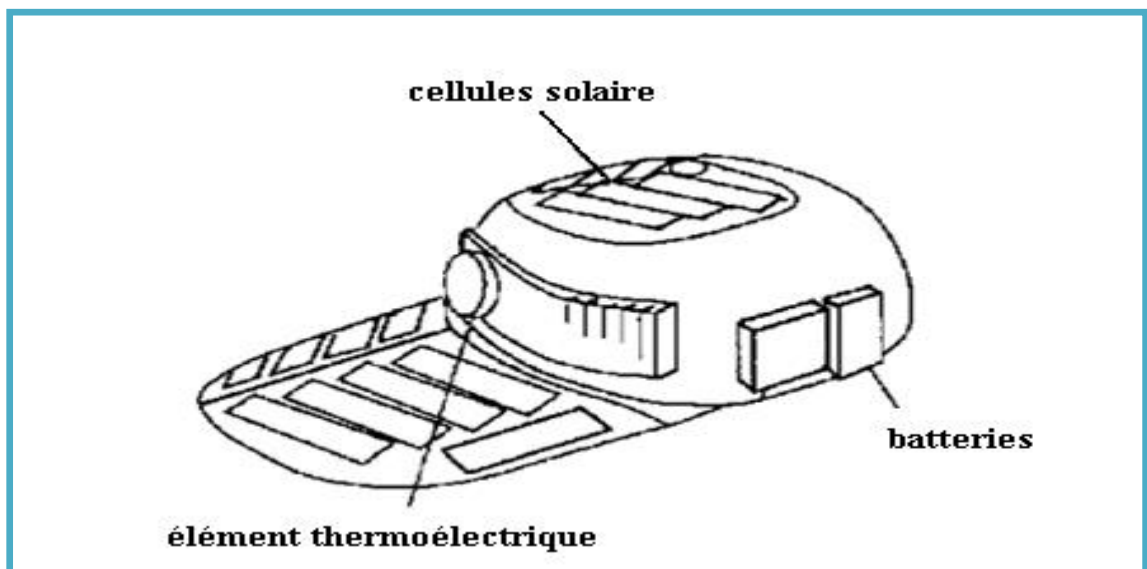


Figure (II.11): Prototype d'une casquette avec éléments thermoélectriques alimenté par Énergie solaire.

La casquette est recouverte de matériaux photovoltaïques souples qui alimentent un module thermoélectrique placé sous la visière [1].

II.6.1.2. Réfrigération thermoélectrique alimentée par énergie solaire

La réfrigération à base de matériaux thermoélectriques par effet Peltier a connu un grand essor et ceci grâce à la découverte de nouveaux matériaux qui ont de grandes performances notamment un facteur de mérite ZT élevé. De nouvelles recherches sur le refroidissement généré par les matériaux thermoélectriques (effet Peltier) ont conduit à l'intégration de panneaux solaires comme source de courant pour alimenter les modules à effet Peltier .

La figure (II-13) représente un dispositif thermoélectrique en mode refroidissement alimenté par un petit panneau solaire.

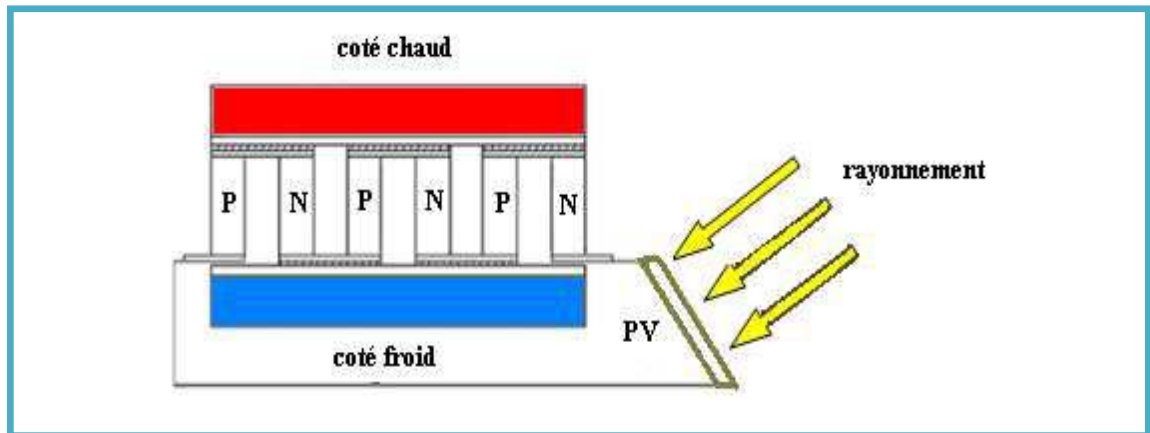


Figure (II.12): Dispositif thermoélectrique de refroidissement alimenté par un système Photovoltaïque.

Le principe de fonctionnement est simple, le panneau solaire génère un courant I qui va traverser le dispositif thermoélectrique. Par définition de l'effet Peltier, lors du passage d'un courant à travers deux matériaux thermoélectriques de nature différente (type n, type p), il y'a refroidissement de la jonction si les porteurs de charges passent d'un niveau basse énergie vers un niveau de haute énergie (p vers n) ou un échauffement de la jonction si les porteurs passent d'un niveau haute énergie vers un niveau basse énergie (n vers p).

Pendant les journées ensoleillées le dispositif Peltier est alimenté directement par le panneau solaire qui produit un courant continu. L'excès de courant produit par le panneau sera stocké et qui va être utilisé pendant la nuit.

Nous pouvons écrire le rendement de tout le système comme étant le produit du rendement photovoltaïque η_{pv} par le coefficient de performance en mode de réfrigération COP ou Φ :

[1] :

$$\eta_{\text{système}} = \eta_{pv} * COP \dots \dots \dots (II.8)$$

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre on a parlé sur le phénomène thermoélectrique en décrivant ses différents modules. En suit, on a détaillé le module Peltier qu'on va utiliser dans le chapitre suivant pour la génération du courant électrique.

Chapitre III

Génération de courant à base du module Peltier

Chapitre III

Génération de courant à base du module Peltier

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle de simulation réalisé dans le programme informatique Matlab. Ce programme nous permet de faire des simulations, de créer des graphiques et des packages entiers de données de calcul. De nombreux modules inclus dans Matlab permettent à l'utilisateur d'utiliser de nombreux langages de programmation et le rendent simultanément facile

Le modèle fonctionne comme une boîte qui prend les paramètres d'entrée et produit des caractéristiques de sortie. Son rôle est de produire des caractéristiques de charge qui dépendent des paramètres d'entrée comme la différence de température entre les côtés du TEG, la conductance thermique, etc. Le modèle de simulation est capable de produire des caractéristiques de tension de sortie, de courant maximal dans le circuit et de puissance maximale générée à partir de la chaleur fournie au module TEG.

III.2. Modèles théoriques

Nous examinerons tous les modèles de température et les validerons par rapport aux données réelles des tests PV extérieurs.

Les données métrologiques comprenant l'irradiance solaire, la température ambiante et la vitesse du vent sont utilisées comme paramètres d'entrée pour les modèles mathématiques.

III.3. Simulation de module photovoltaïque-thermoélectrique dans Matlab

Les données d'entrée dans le modèle sont les suivantes: température, fonction de coefficient Seebeck, fonction de résistance, fonction de conductivité thermique, fonction **FOM** Tension maximale et courant maximal. Les valeurs de sortie de ce sous-système sont utilisées pour calculer le courant, la tension et la puissance.

Étaient :

Le coefficient Seebeck **S** également connu sous le nom de puissance thermoélectrique, et la sensibilité thermoélectrique d'un matériau est une mesure de l'amplitude d'une tension thermoélectrique induite en réponse à une différence de

Chapitre III

température à travers ce matériau, l'utilisation de matériaux avec un coefficient Seebeck élevé est l'un des nombreux facteurs importants pour le comportement efficace des générateurs thermoélectriques et des refroidisseurs thermoélectriques.

La résistance interne **R** est appelée résistance interne de la source. Lorsque la source d'alimentation fournit du courant, la tension de sortie mesurée est inférieure à la tension à vide; la différence est la chute de tension (le produit du courant et de la résistance) provoquée par la résistance interne.

La conductivité thermique **Kth** est une propriété matérielle décrivant la capacité de conduire la chaleur. fait référence à la quantité / vitesse de chaleur transmise à travers un matériau. Le transfert de chaleur se produit à un taux plus élevé entre les matériaux à haute conductivité thermique que ceux à faible conductivité thermique. Les matériaux à haute conductivité thermique sont largement utilisés dans les applications de dissipateur thermique et les matériaux à faible conductivité thermique sont utilisés comme isolation thermique. **FOM** ou résistance de charge est une impédance de charge **Z**, nous l'avons utilisée afin de comprendre le comportement du circuit dans différentes conditions s'il représentait la charge sur le circuit.

III.3.1. Modèles utilisés dans l'estimation de la température de la cellule PV

Dans la littérature, Il trouve plusieurs modèles de simulation de température de la cellule PV, parmi lesquels, on va choisir Onze modèle et faire la comparaison entre eux afin de sélectionner ceux donnant des résultats proche à la température mesurée, puis on va utiliser ces derniers dans la production de l'électricité à base du module Peltier.

Tableau(III.1) : Equation des Modèles utilisés dans l'estimation de la température de la cellule PV.

MODELE	Equation mathématique
STANDARD	$T_c = T_a + \frac{(I * T_{noct} - T_{anoct})}{I_{noct}}$
KOHL	$T_c = T_a + \frac{I}{U_0 + U_1 * V_w}$
LASNIER	$T_c = 30 + (0.0175 * I - 300) + (1.14 * (T_a - 25))$
MOZATHIK	$T_c = (0.943 * T_a) + (0.0195 * I) - (1.528 * V_w) + 0.3529$

FAIMAN	$T_c = T_a + \frac{(\tau a * I)}{U_0 + U_1 * V_w}$
PVSYS	$T_c = T_a + \frac{(\tau a * I)(1 - \eta_{PV_{sys}})}{U_0 + U_1 * V_w}$
KURTZ	$T_c = T_a + I * e^{-3,473 - 0,0594 * v_w}$
SERVANT	$T_c = T_a + (0.0138 * I) * (1 + 0.031 * T_a) * (1 - 0.042 * V_w)$
SKOPLAKI	$T_c = T_a + \left(\frac{I}{I_{noct}}\right) * (45 - T_{anoct}) * \left(\frac{h_{wnoct}}{h_w}\right) * \left(1 - \left(\frac{r_{stc}}{t_{alpha}}\right) * (1 + \beta_{tstc} * T_{stc})\right)$
CHENNI	$T_c = 0.943 * T_a + 0.028 * I - 1.528 * V_w + 4.3$
METTEI	$T_c = \frac{U_{PV} T_a + I * [\tau_{fg} * \alpha_c - \eta_{STC}(1 - \beta_{STC} T_{STC})]}{U_{PV}(v) + \beta_{STC} * \eta_{STC} * I}$

III.3.2. Modélisation de la température de la cellule PV

On a programmé dans Matlab les 10 modèles cités précédemment pour la journée du 20/07/2020 dont les données météorologiques ainsi que les paramètres mesurés sont représentés dans le tableau (III.2).

Tableau(III.2) : Données météorologiques et paramètres mesurés Ouargla le 20/07/2020.

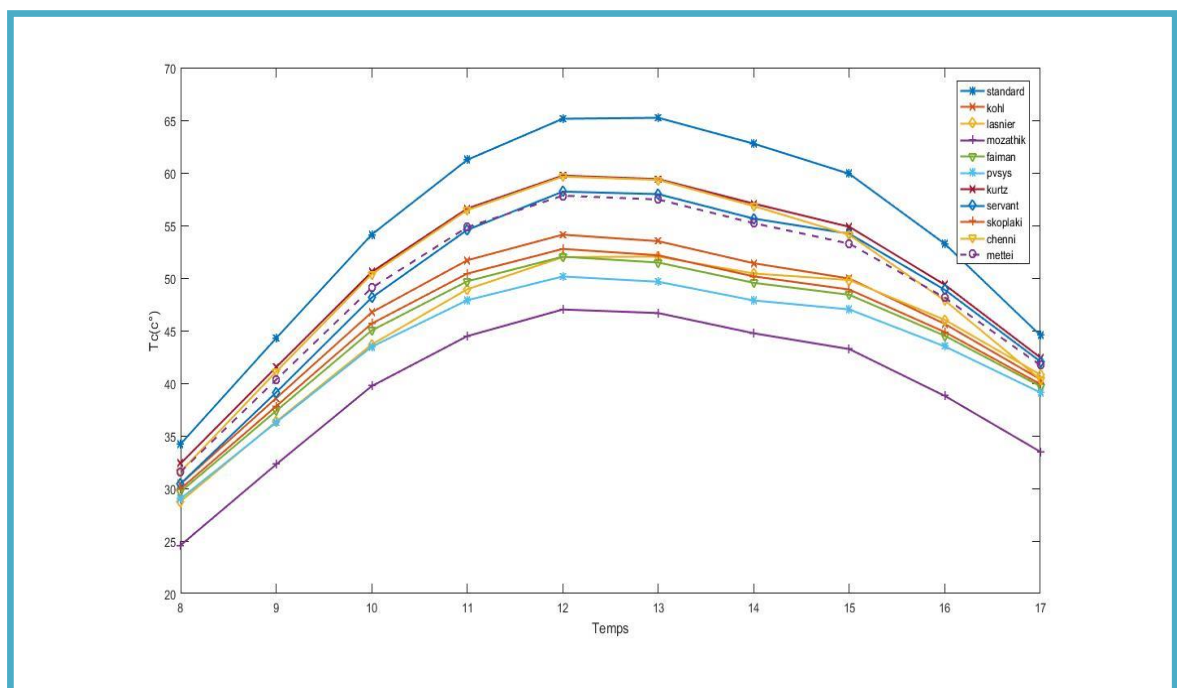
Ouargla le 20/07/2020				
heures	I(W/m ²)	Ta(C°)	Vw(Km/s)	TcMesuré(C°)
8	359	23	2.91	32.6
9	572	26.4	2.7	38.4
10	788	29.5	2.5	48.2
11	945	31.7	2.75	54.8
12	1022	33.2	3	60
13	1025	33.2	3.26	60.2
14	959	32.8	3.43	57.3
15	813	34.5	3.6	54.7
16	603	34.4	3.77	52.1
17	344	33.8	3.57	41.5

Chapitre III

Les résultats de simulation obtenus sont représentés dans le tableau (III.3) et tracés dans la figure (III.1).

Tableau (III.3) : Température de la cellule PV simulée.

	Standard	Kohl	Lasnier	Mozathik	Faiman	Pvsys	Skoplaki	Kurtz	Servant	Chenni	Mettei
8h	34.22	30.43	28.75	24.60	29.69	29.02	29.96	32.37	30.45	31.59	31.57
9h	44.28	38.58	36.36	32.28	37.36	36.26	37.81	41.52	39.13	41.09	40.33
10h	54.13	46.74	43.67	39.72	45.01	43.46	45.67	50.57	48.13	50.36	49.06
11h	61.23	51.68	48.93	44.47	49.68	47.89	50.41	56.60	54.57	56.45	54.83
12h	65.14	54.12	51.98	47.01	52.03	50.14	52.76	59.73	58.21	59.64	57.83
13h	65.23	53.50	52.04	46.67	51.47	49.64	52.16	59.40	57.97	59.33	57.46
14h	62.77	51.40	50.42	44.74	49.54	47.87	50.15	57.07	55.65	56.84	55.21
15h	59.91	49.95	49.81	43.24	48.40	47.01	48.90	54.87	54.21	54.10	53.27
16h	53.24	45.63	46.02	38.79	44.51	43.50	44.86	49.35	48.87	47.86	48.12
17h	44.55	40.36	40.80	33.48	39.70	39.11	39.92	42.43	42.06	40.35	41.70



Figure(III.1) : Tc simulées par différents modèles.

- On observe que les courbes sont similaires et ont le même comportement.
- La température la plus élevée est celle du modèle standard et la plus petite est celle du modèle de Mozalthik.

III.3.3. Calcul statistique

Les indicateurs statistiques ont été utilisés pour déterminer les performances de ces modèles afin de choisir les meilleurs.

- **Le coefficient de détermination (R^2)**

L'indicateur R^2 varie entre 0 et 1, une valeur de 1 ou proche de 1 indique un parfait accord entre la valeur mesurée et calculée, par contre une valeur proche de 0 indique un total désaccord.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (\mathbf{Tcmes} - \mathbf{Tcsim})^2}{\sum_{i=1}^k (\mathbf{Tcmes} - \mathbf{Tcmes}_{moy})^2} \dots \dots \dots (III.1)$$

- **Erreur quadratique moyenne (RMSE)**

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\mathbf{Tcmes} - \mathbf{Tcsim})^2} \dots \dots \dots (III.2)$$

La RMSE est une mesure de la variation des valeurs simulées, selon chaque modèle autour des valeurs mesurées. Plus sa valeur est petite, plus le modèle est meilleur.

- **Erreur moyenne**

$$MBE = \sum_{i=1}^k (\mathbf{Tcmes} - \mathbf{Tcsim})^2 \dots \dots \dots (III.3)$$

La MBE donne une indication sur la déviation moyenne des valeurs calculées par rapport aux valeurs mesurées. Une valeur positive indique une sur-estimation par contre une valeur négative indique une sous-estimation.

- **Erreur absolue moyenne (MABE)**

$$MABE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (|\mathbf{Tcmes} - \mathbf{Tcsim}|) \dots \dots \dots (III.4)$$

- **Pourcentage de l'erreur moyenne (MPE)**

$$MPE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(\mathbf{Tcmes} - \mathbf{Tcsim})^2}{\mathbf{Tcmes}} \dots \dots \dots (III.5)$$

- Pourcentage de l'erreur absolue moyenne (MAPE)

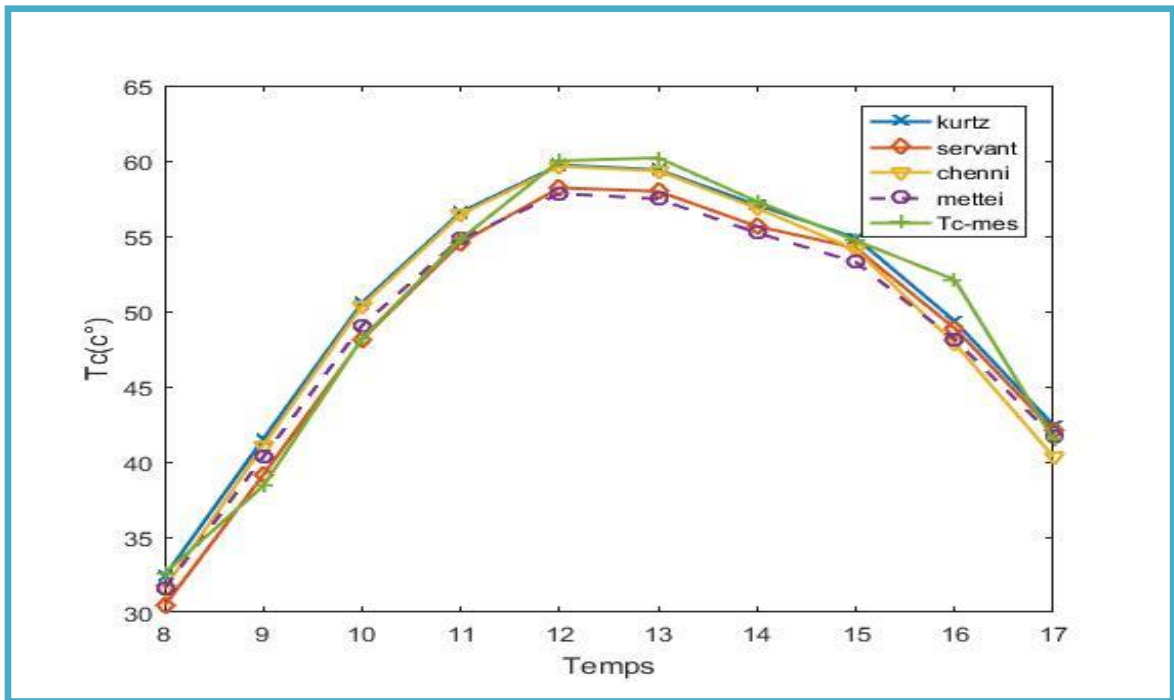
$$MAPE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(|T_{cmes} - T_{csim}|)}{T_{cmes}} \dots \dots \dots (III.6)$$

Tableau(III.4) :Performances des modèles utilisés.

	R_squared	RMSE	MAPE(%)	MSE	MAD	REMQP(%)
Standard	0.97	4.83	8.98	23.29	4.49	9.65
Kohl	0.96	4.43	7.09	19.66	3.78	8.06
lasnier	0.97	5.60	9.85	31.36	5.10	10.47
mozathik	0.97	10.78	20.88	116.27	10.48	21.08
faiman	0.96	5.89	9.93	34.64	5.24	10.73
pvsys	0.96	7.24	12.57	52.41	6.59	13.26
skoplaki	0.96	5.38	8.91	28.97	4.72	9.79
kurtz	0.97	1.67	2.70	2.78	1.27	3.69
servant	0.98	1.65	2.71	2.71	1.31	3.45
chenni	0.96	1.91	3.24	3.64	1.52	4.07
Mettei	0.97	2.00	3.26	4.00	1.65	3.88

D'après les résultats du calcul statistiques, il est bien remarquable que les modèles donnant des résultats très proches de la valeur mesurée sont : Kurts, Servant, Chenni et Mettei.

Ces modèles seront utiliser par la suite dans la génération du courant, tension et puissance électrique.



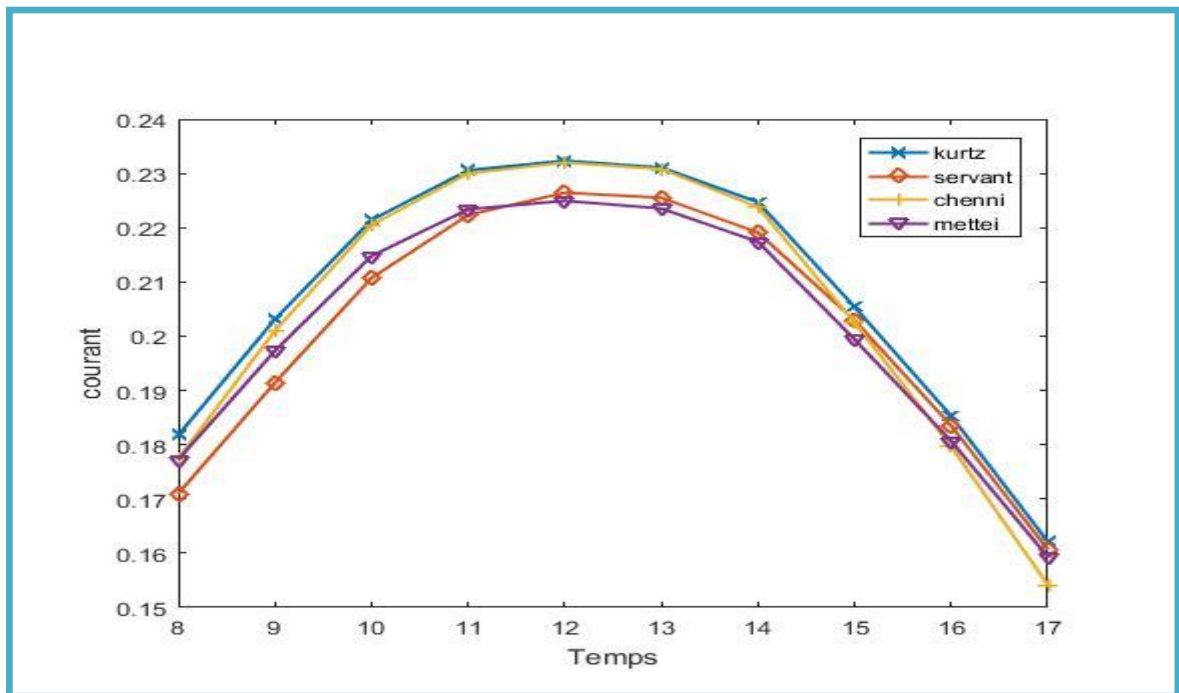
Figure(III.2) : Comparaison entre la valeur mesurée de Tc et celles simulées à base des modèles les plus performants.

III.3.4. Génération de courant, tension et puissance à base du module Peltier

La différence entre la température simulée de cellule PV (la plus chaude) et la température ambiante (la plus froide) sera injecter dans le module Peltier afin de générer un courant, une tension et une puissance électrique. Les résultats des différents modèles sont représentés dans les tableaux (III.4,5,6) puis tracés dans les figures (III.2,3,4).

Tableau(III.5) : Courant obtenu pour les 4 modèles.

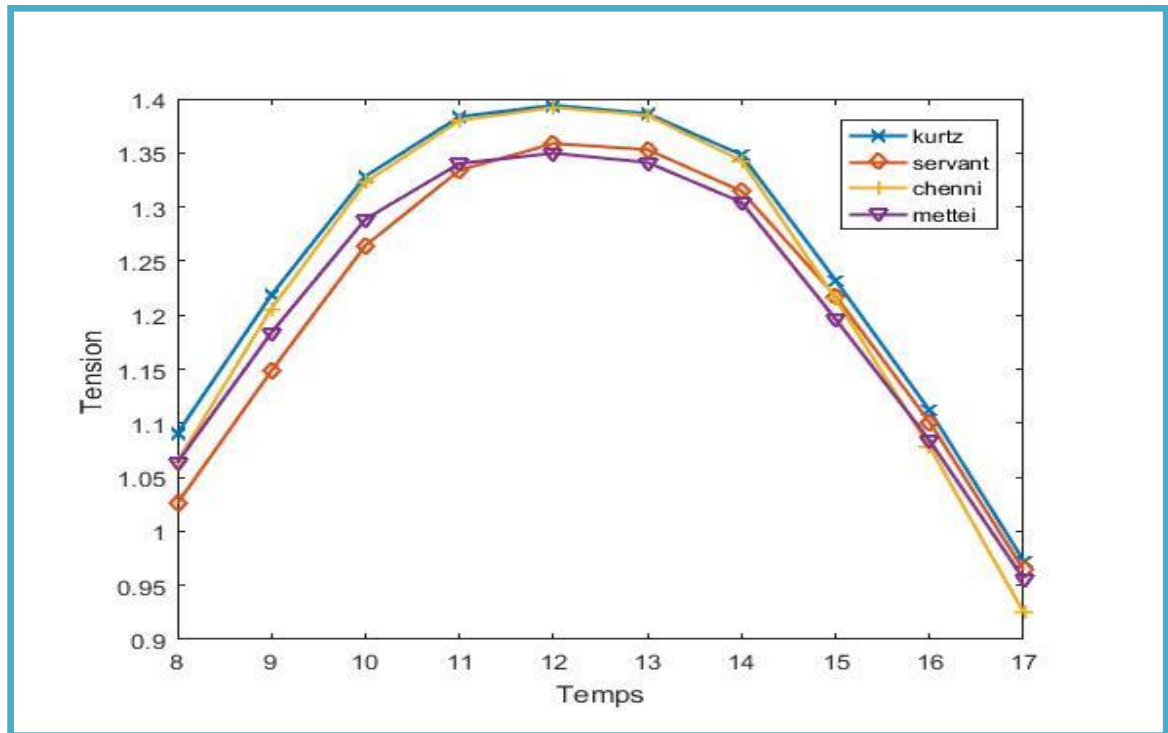
	$I_{pv}(A)$ Kurtz	$I_{pv}(A)$ Servant	$I_{pv}(A)$ Chenni	$I_{pv}(A)$ Mettei
8h	0.171	0.182	0.177	0.177
9h	0.189	0.203	0.201	0.195
10h	0.205	0.221	0.22	0.211
11h	0.211	0.231	0.23	0.219
12h	0.211	0.232	0.232	0.22
13h	0.208	0.231	0.231	0.219
14h	0.202	0.225	0.224	0.213
15h	0.187	0.205	0.203	0.198
16h	0.171	0.185	0.18	0.181
17h	0.154	0.162	0.154	0.161



Figure(III.3) : Représentation du courant généré.

Tableau(III.6) : Tension obtenue pour les 4 modèles.

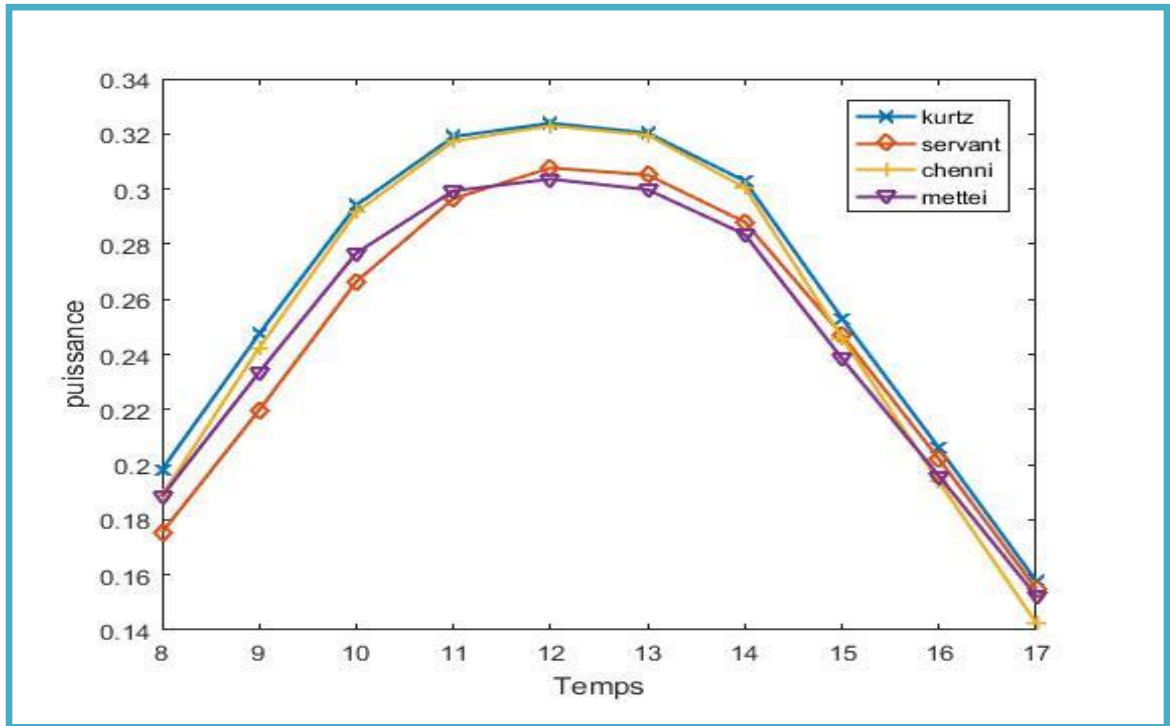
	$V_{pv}(V)$ Kurtz	$V_{pv}(V)$ Servant	$V_{pv}(V)$ Chenni	$V_{pv}(V)$ Mettei
8h	1.026	1.026	1.064	1.063
9h	1.148	1.148	1.206	1.172
10h	1.264	1.264	1.323	1.267
11h	1.334	1.334	1.380	1.313
12h	1.359	1.359	1.392	1.320
13h	1.353	1.353	1.385	1.311
14h	1.315	1.315	1.343	1.279
15h	1.218	1.218	1.215	1.186
16h	1.101	1.101	1.078	1.086
17h	0.964	0.964	0.925	0.964



Figure(III.4) : Représentation de la tension générée.

Tableau(III.7) : Puissance obtenue pour les 4 modèles.

	$P_{pv(w)}$ Kurtz	$P_{pv(w)}$ Servant	$P_{pv(w)}$ Chenni	$P_{pv(w)}$ Mettei
8h	0.198	0.175	0.189	0.188
9h	0.247	0.220	0.242	0.229
10h	0.294	0.266	0.292	0.268
11h	0.319	0.297	0.317	0.287
12h	0.324	0.308	0.323	0.290
13h	0.320	0.305	0.320	0.286
14h	0.303	0.288	0.301	0.273
15h	0.253	0.247	0.246	0.235
16h	0.206	0.202	0.194	0.197
17h	0.158	0.155	0.143	0.155



Figure(III.5) : Représentation de la puissance générée.

D'après les résultats obtenus, on voit bien que le module Peltier génère un petit courant continu (tension et puissance) à base de la différence de température de la cellule ainsi que celle ambiante. Plus cette différence est grande, plus la production d'électricité est élevée.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié et calculé la température de la cellule PV par des nombreux modèles (11), puis nous y avons introduit un module thermo-électrique (module Peltier) pour produire d'électricité à partir de la différence de température entre celle de la cellule et l'ambiante.

Conclusion Générale

Dans ce travail, on a généré de l'électricité continue à partir de la différence de température entre celle de la cellule PV et l'ambiante en utilisant un module thermo-électrique dite Module Peltier.

L'inconvénient majeur des cellules photovoltaïques est lié à leur rendement. En effet, seule une partie du rayonnement incident peut être convertie en électricité, de plus les radiations non converties échauffent le panneau ce qui réduit encore le rendement. Une solution à ce problème a été étudiée dans le cadre de notre travail, il s'agit du module hybride thermoélectrique- photovoltaïque permettant d'obtenir un bon rendement.

Dans un premier lieu, on a simulé la température de la cellule PV par 11 modèles mathématiques différents, puis sélectionné les plus performants a base du calcul statistique, où on a trouvé que ces modèles sont Kurtz, Servant, Chenni et Mettei.

L'introduction de la différence de température dans le module thermo-électrique de Peltier produisant de sa part de l'électricité continue peut être utilisé ou stocké dans des piles.

En perspective, nous souhaiterons réaliser pratiquement ce travail et faire une comparaison entre les résultats de simulation et ceux de la réalisation pratique.

ملخص

يعالج موضوع المذكرة توليد الكهرباء عن طريق حساس (نموذج بلتير) الذي يقوم بلقط درجة الحرارة الضائعة من ألواح الخلية الشمسية ومن ثم يقوم بتحويلها لكهرباء (مبدأ سيبيك). بسبب اوضاع البلاد من وباء كورونا-19 لم نتسنا لنا تجربتها علي ارض واقع قمنا بي نمدجتها عن طريق برنامج الماتلاب لأجل المقارنة و استخراج النتائج الأقرب جدا للحقيقة قمنا بمحاكاة درجة حرارة الخلية الكهروضوئية بواسطة 11 نموذجًا رياضيًا مختلفًا أدخلنا معهم وحدة كهروحرارية (وحدة بلتير) لإنتاج الكهرباء من اختلاف درجة الحرارة بين الخلية ودرجة الحرارة المحيطة اخترنا الأكثر كفاءة بناءً على الحساب الإحصائي ، حيث وجدنا أن هذه النماذج هي Kurtz و Servant و Chenni و Mettei.

تتميز هذه الخلايا الكهروحرارية بي انها تمد التيار بشكل مستمر دون استعمال بطاريات لي تخزين يتم استخدام مثل هذه تكنولوجيا في مركبات فضاء و الاجهزة جديدة لي انها تستعمل في تبريد ايضا لقدرتها علي تحمل درجات حرارة عالية جدا.

Résumé

Le sujet du mémorandum traite de la production d'électricité au moyen d'un capteur (MODELE PELTIER) qui capte la température gaspillée des panneaux de cellules solaires puis la convertit en électricité (PRINCIPE SEEBECK).

En raison des conditions du pays liées à l'épidémie de Corona-19, il ne nous a pas été possible de l'expérimenter sur le terrain. Nous l'avons intégré via le programme Matlab à des fins de comparaison et d'extraire des résultats très proches de la vérité. Nous avons simulé la température de la cellule photovoltaïque à l'aide de 11 modèles mathématiques différents. Électricité à partir de la différence de température entre la cellule et la température ambiante.

Nous avons choisi le plus efficace sur la base du calcul statistique, car nous avons trouvé que ces modèles étaient Kurtz, Servant, Chenni et Mettei.

Ces cellules thermoélectriques se caractérisent par le fait qu'elles fournissent du courant en continu sans utiliser de batteries pour les stocker. Cette technologie est utilisée dans les véhicules spatiaux et de nouveaux appareils sont pour moi utilisés dans le refroidissement également pour leur capacité à résister à des températures très élevées.

Summary

The subject of the memorandum deals with the production of electricity by means of a sensor (MODEL PELTIER) which captures the wasted temperature of the solar cell panels and then converts it into electricity (PRINCIPLE SEEBECK).

Chapitre III

Due to the conditions in the country linked to the Corona-19 epidemic, it was not possible for us to experience it in the field. We integrated it through the Matlab program for comparison purposes and to extract results very close to the truth. We simulated the temperature of the photovoltaic cell using 11 different mathematical models. Electricity from the temperature difference between the cell and the ambient temperature.

We chose the most efficient based on the statistical calculation, because we found that these models were Kurtz, Servant, Chenni and Mettei.

These thermoelectric cells are characterized by the fact that they provide direct current without using batteries to store them. This technology is used in space vehicles and new devices are for me used in cooling also for their ability to withstand very high temperatures.

Bibliographie

[1] ZOUAK BELKACEM, « Etude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité ».mémoire de magister ,2012.

[2] BENAHMED BENADBALLAH NADIA,« Propriétés physique des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et simulation des cellules a base de Si», Thèse de Magister, 2006, Université Abou BekrBelkaïd de Tlemcen.

[3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_photovolta%C3%AFque ,(consulter le 07/03/2020)

[4] www.grenobleisere.com/etudesetterritoires/pdf_filiere/Photovoltaique_Etude2010_V14-fr/,(consulter le 10/03/2020)

[5] A.TCHAPO, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ». Thèse de doctorat à l'université Nancy I, France,2010.

[6] A.LABOURET, P.CUMUNEL, J-P.Braun, B.Faraggi,« Cellule solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque » 3eme édition 2001.

[7] R.BETTIGNIES, « Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués ». Thèse de doctorat, à l'école doctorale d'Angers, France, 2003.

[8] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-solaire-6679/>, (consulter le 07/03/2020)

[9] <https://www.lenergiesoutcompris.fr/actualites-et-informations/photovoltaique-solaire/c-est-quoi-l-energie-solaire-48577> ,(consulter le 07/03/2020)

- [10] <http://unblogsurlaterre.com/actualites-environnement-sur-la-terre/avantages-et-inconvenients-energie-solaire-011/>,(consulter le 10/03/2020)
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Panneau_photovolta%C3%AFque_thermique,(consulter le 07/03/2020)
- [12] FRISO HUIZINGA, « Combined Photovoltaic and Solar Thermal (PV-T)Systems. »Master Thesis 2010
- [13] BAKKER, ZONDAG, ELSWIJK, STROOTMAN,«heat pump with ates»(Jong, 2005)
Fang, Hu, - Liu, 2010
- [14] <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/aerovoltaique/panneau-solaire-hybride>,(consulter le 07/03/2020)
- [15] J.G.STOCKHOLM, « La thermoélectricité applications et perspectives », matériaux 2006,13-17 novembre, Dijon, France, 2008.
- [16] A.LINDER,« *la Thermoélectricité* » presse universitaire de France n°1381, 1970.
- [17] V.RICHOUX,« Elaboration électrochimique en mode pulse de Tellure de Bismuth Bi₂Te₃ et de l'alliage ternaire (Bi_{1-x}Sb_x)₂Te₃». Thèse de doctorat à l'université de PAUL VERLINE-METZ, France, 2008.
- [18] P.PICHANUSAKORM,« The optimal Seebeck coefficient for obtaining the maximum power factor in thermoelectric », Applied Physics letters 94, 2009.
- [19] D.BOUDEMAGH,«Synthèse et Etude de Matériaux Thermoélectriques du Système Mg₂Si_{1-x}Sn_x ». Thèse de Doctorat, université de Grenoble, France, 2010.
- [20] <https://pitch-technologies.fr/produits/laird-principe-module-peltier-agent-en-france/> ,09/03/2020
- [21] <http://parisinnovationreview.com/articles-en/the-financial-crisis-and-its-impact-on-european-energy-security-of-suppl>,(consulter le 09/03/2020)

[22] https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Peltier ,(consulter le 09/03/2020)

[23] H. Y. CHEN, « Procédés de microfabrication des modules thermoélectriques à base des alliages (Bi, Sb) 2 (Te, Se) 3 », mémoire pour l'obtention du diplôme de maîtrise des sciences appliquées à l'université de Montréal, Canada, 2010.

[24] <https://www.thomasnet.com/articles/automation-electronics/Thermocouples-Types> , (consulter le 08/03/2020)

[25] G. RALPH STROHLJOSEPH W. HARPSTER, «EncyclopaediaBritannica Thermoelectric power generator »

[26] FILIP KUČHTA, KAMIL LUBIKOWSKI,«TEG MODEL IN MATLAB SIMULINK.»PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE OF VEHICLES 4(113)/2017.