



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université Amar Thelidji- Laghouat
Faculté de Technologie
Département Électrotechnique



MÉMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologie

FILIERE : Electrotechnique

OPTION : Energie renouvelable En Electrotechnique

Présenté par : Ghozlane Mohamed Zin Elabidine
Rahmoune Badreddine

Thème

Etude par Simulation d'une Cellule Thermo-Photo-Voltaïque

Jury de soutenance :

- | | |
|-----------------------|--------------|
| • Dr. BIRANE Mouhoub | Président |
| • Dr. SEGHIR Taher | Examineur |
| • Dr. BOUDRA Saliha | Examinatrice |
| • Dr. YOUSFI Belkacem | Rapporteur |

Année Universitaire 2023-2024

REMERCIEMENT

Louange à Dieu qui nous a enseigné cela, et nous n'y serions pas parvenus sans la grâce de Dieu.

Nous tenons également à remercier notre superviseur, le prof **Yousfi Belkacem**, pour son soutien et ses conseils dans la conduite de cette recherche. Nous demandons à Dieu de le vêtir de santé et de piété et de lui apporter la bonne nouvelle.

Nous remercions également les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de participer à l'évaluation de ce travail.

DÉDICACE

Je dédie ce travail à mes chers parents, sans eux qui je ne serai pas ce que je suis.
Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance. Leur soutien et leur encouragement
.m'a été d'un grand apport

Je dédie aussi ce modeste travail à tous mes frères et sœurs et tous mes amis

Ghozlane Mohamed Zin Elabidine

Je dédie À ma mère, qui était une bougie qui fondait pour moi, à mon père, mon
modèle et mon soutien, à mes frères et sœurs, et à tous ceux qui nous ont aidés,
.même avec un mot gentil, que Dieu vous bénisse et prolonge votre vie

Rahmoune Badreddine

Sommaire

Sommaire

Liste des figures	I
Liste des tableaux	II
Nomenclature	III
Introduction Générale	1
Chapitre I : Cellules thermo-photo-voltaïques (TPV)	
Introduction	3
I.1. Les cellules Thermo-photo-voltaïques.....	3
I.1.1. Historique	3
I.1.2. Définition du principe de conversion d'énergie TPV.....	4
I.1.3. Comparaison entre la conversion thermo-photovoltaïque et la conversion PV.....	5
I.1.4. Les composants d'un système thermophotovoltaïque.....	5
I.1.4.1. Source de chaleur	6
I.1.4.2. Emetteur sélective	6
I.1.4.3. Filtre.....	7
I.1.4.4. Les Cellules thermo-photovoltaïque.....	8
Les cellules TPV á base de Germanium.....	8
Les cellules TPV basées de Silicium.....	8
Les Cellules en GaSb	9
I.1.5 Les applications TPV.....	9
I.1.5.1 Systèmes TPV solaires (STPV).....	10
I.1.5.2 TPV système alimenté par radio-isotope decay (RTPV).....	10
I.1.5.3 Système TPV à combustion.....	10
I.2 Rappel sur les transferts de chaleur.....	10
I.2.1 La Conduction.....	11
I.2.2 La Convection	12
I.2.3 Le rayonnement	13
I.3 Transfert de Chaleur par Rayonnement	14
I.3.1 Le Spectre électromagnétiques	14
I.3.2 Grandeurs relatives aux surfaces émettant un rayonnement	16
I.3.2.1 Flux d'une source	16

I.3.2.2 Emittance d'une source	16
I.3.2.3 Intensité d'une source dans une direction << Ox >>	17
I.3.2.4 Luminance d'une source dans une direction << Ox >>	18
I.3.3 Grandeurs relatives aux surfaces recevant un rayonnement	19
I.3.3.1 Eclairage	19
I.3.3.2 Radiosité et Flux nette perdue	19
I.3.4. Loi de Stefan Boltzmann	20
I.4. Conclusion	21

Chapitre II : Simulation Résultats et Discussion

II.1 Introduction	22
II.2 Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS	22
II.3.1 Modélisation le problème physique	24
II.3.2 Les paramètres et les variables.....	25
II.3.3 Géométrie du model	26
II.3.4 Maillage	26
II.3.5 Résultats	27
II.4 Conclusion	32
Conclusion générale	33
Bibliographie	34

Liste des figures

Figure.I.1 : Le concept de conversion d'énergie Thermo-photovoltaïque.....	4
Figure.I.2 : Petit TPV prototype	6
Figure.I.3 : Système TPV avec un émetteur sélectif	7
Figure.I.4 : Système TPV avec un émetteur corps noir filtré.....	7
Figure.I.5 : Le générateur de Cellule photovoltaïque pour le petit prototype (à gauche) et le système de démonstration (à droite).....	8
Figure.I.6 : Les applications TPV	9
Figure.I.7 : Schéma du transfert de chaleur par conduction	11
Figure.I.8 : Schéma du transfert de chaleur convectif	13
Figure.I.9 : Schéma du transfert de chaleur radiative	14
Figure.I.10 : le Spectre électromagnétique	15
Figure.I.11 : Emittance d'une source	16
Figure.I.12 : Intensité de la source dans la direction Ox	17
Figure.I.13 : Luminance d'une source dans une direction Ox	18
Figure.I.14 : Schématique des flux de rayonnement sur une surface	19
Figure. II.1: La version COMSOL 3.5a	22
Figure. II.2 : Présentation de géomètre étudié dans COMSOL Multiphysics 3.5a.....	24
Figure. II.3 : Un Système prototype	24
Figure. II.4 : La géométrie du système TPV modélisé.....	25
Figure. II.5 : Maillage	26
Figure II.6 : distribution stationnaire de la température de cellule TPV.....	27
Figure II.8: Flux de chaleur total de cellule TPV	29
Figure II.8: Flux de chaleur total de cellule TPV pour $T_{source}=1500K$	30
Figure II.9 : la distribution radiale de la temprature pour différentes valeurs de température de l'émetteur	32
Figure II.10 : le rendement de la cellule TPV en fonction de température de l'émetteur	32

Liste des tableaux

Tableau II.1 : les propriétés du matériau et les paramètres utilisés	25
Tableau II.2 : La Géométrie de cellule TPV	26

Nomenclature

Lettres normales

C_p : La chaleur spécifique à pression constante(J/kg. K).

$d^2\varphi$ =flux total émis par la source (W)

E : Eclairement (W/m²)

G : Le flux d'irradiation (W/m²)

h : Le coefficient de transfert convectif (W/(m². K)).

I : Intensité de la source (W/sr)

J : La radiosité de surface (W/m²)

k : Le coefficient de conductivité thermique (W/(m. K))

L : Luminance d'une source (W/m².sr)

M : Emittance (W/m²)

n : Le vecteur normal à la surface

Q : Quantité de chaleur (W/m³)

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m²)

T : température (K)

V : tension (Volt)

x : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

Lettres grecques

ρ : La densité (kg. m⁻³)

η : Le rendement

φ : Flux de chaleur (W. m⁻³)

λ : la longueur d'onde (μm)

ε : L'émissivité de la surface

Ω : angle solide (sr)

β : L'angle (radian)

Les constants

c : la vitesse de la lumière (299 792 458 m / s)

h : La constante de Planck ($6,6255 \cdot 10^{-34}$ J.s)

k : la constante de Boltzmann, $k = 1,3805 \cdot 10^{-23}$ J/K.

σ : La constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴)

Les indices

con : conectif

cov : convectif

is : isolant

m : miroir

ox : direction suivant l'axe x

pv: cellule PV

p : paroi (surface)

ray : rayonnement

réf : refroidissement

source : source de chaleur

∞ : Loin de surface

Les abréviations

EM : spectre électromagnétique

ES : émetteur sélectif

GaSb : le gallium antimonide

Ge : germanium

InGaAsSb : antimoniure et arséniure mixte
de gallium et d'indium

PV : photovoltaïque

Si : Silicium

STPV : concentration la lumière du soleil

TPV: thermophotovoltaïque

1D : une dimension

2D : deux dimension

3D : trois dimensions

Introduction
Générale

Introduction

En raison du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication, une croissance de la consommation mondiale d'électricité a été observée pendant les dernières années. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables (carbone, pétrole, gaz, nucléaire) dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. Le développement des sources d'énergies renouvelables non polluantes est donc d'actualité [1].

Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, hydraulique, la géothermie, le solaire PV et le solaire TPV, etc... Ce dernier est une source d'énergie très puissante.

Les cellules solaires et modules photovoltaïques sont des composants de conversion d'énergie qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. On parle généralement d'énergie solaire photovoltaïque, car le soleil est la source lumineuse la plus intense de notre planète, et la plupart des applications sont en plein air. Mais certains préfèrent l'expression énergie lumière, pour insister sur le fait que toute source de lumière, même artificielle (ampoules, tubes fluorescents...), peut générer de l'électricité à travers une cellule solaire.

Les travaux sur la conversion photovoltaïque du rayonnement, qu'il soit solaire ou thermique, cristallisent remarquablement ces deux tendances. D'une part, la conversion photovoltaïque a connu depuis la mise au point de la jonction p-n, élément principal des convertisseurs actuels, des progrès continus qui ont fait passer les rendements des cellules mono-jonction en silicium sous rayonnement solaire direct de 5% en 1954 à plus de 25% en 2012. D'autre part, une déclinaison de la conversion photovoltaïque activement développée depuis une vingtaine d'années, le thermo-photovoltaïque en l'occurrence, permet d'exploiter des gisements énergétiques inédits. En effet, la conversion du rayonnement thermique de sources quelconques, nombreuses dans les applications industrielles et domestiques, ouvre la voie à l'exploitation de ressources abondantes et largement ignorées jusqu'à présent. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail étudié système thermo-photovoltaïque.

Dans le premier chapitre nous avons concentrés sur le système thermo-photovoltaïque (TPV) et la différence entre TPV et le système photovoltaïque classique, et ses principales composants (source de chaleur, émetteur, filtre et cellules photovoltaïques) et ces applications, Ensuite, nous d'abord commencé par une brève présentation des différents modes de transfert de chaleur avec une insistance particulière sur les transferts radiatifs qui sont au centre du présent travail. et nous avons présenté les outils théoriques nécessaires pour calculer les grandeurs qui nous seront utilisés par la suite, notamment le flux radiatif échangé entre la cellule photovoltaïque et l'émetteur sélectif.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du logiciel COMSOL et exposé les résultats de la simulation pour la visualisation de la compréhension du comportement thermique du système. Ensuite nous avons exposé une synthèse bibliographique sur les travaux effectués dans le domaine.

Enfin, nous avons résumé en conclusion les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I

Cellules

Thermo-photo-voltaïques

(TPV)

Introduction

Le système thermo-photovoltaïque, une technologie qui convertit directement la chaleur en électricité en utilisant l'effet photovoltaïque. Cette technologie innovante combine les principes de la thermodynamique et de l'électromagnétisme pour maximiser l'efficacité de la conversion énergétique.

Dans chapitre présente, nous explorerons la définition et le fonctionnement du système thermo-photovoltaïque, ainsi que les applications et le Transfert de Chaleur de cette système.

I.1.Les cellules Thermo-photovoltaïques

Les cellules thermo-photovoltaïques (TPV) sont des dispositifs qui convertissent directement la chaleur en électricité. Elles fonctionnent en utilisant un émetteur pour générer un rayonnement infrarouge à haute température. Ce rayonnement est ensuite absorbé par une cellule photovoltaïque, qui le convertit en électricité.

Les cellules TPV ont le potentiel d'être une source d'énergie propre et efficace.

I.1.1. Historique

L'origine de la technologie TPV revient à la fin d'année 1950 et le début de 1960. La plupart des références citent l'inventeur de la technologie TPV, le Dr. Pierre Aigrain. Pendant une série de conférences, il a proposé un processus de la conversion d'énergie direct qui consiste en un émetteur radiant réchauffé par une flamme et un semi-conducteur photo-convertisseur. Dr. Henry H. Kolm a utilisé une lanterne de camping et une cellule solaire de silicium pour créer un dispositif TPV simple. Il a aussi suggéré des améliorations au système et il a estimé un rendement de la conversion de 5-10% pour cette nouvelle technologie. [2][3]

L'Armée américaine à fort Monmouth a joué un rôle important dans le développement de la technologie TPV en 1960. Un de ses objectifs a été de réaliser une source de puissance portable sans bruit et la TPV était une des meilleurs candidats pour ce but. L'activité de la recherche à Fort Monmouth a contribué au développement de la technologie TPV. Pour la première fois, les propriétés de l'émittance d'oxyde de terre rare à haute température ont été rapportées. Ce matériau est utilisé comme un émetteur dans la TPV. [2][3]

Dans la même période, l'intérêt industriel de cette nouvelle technologie a grandi aussi: General Motors (GM) en particulier a été très actif dans la recherche et le développement du dispositif TPV. Dans le cadre d'un programme de développement de TPV; le concept d'une surface arrière réflecteur a été appliqué pour la première fois.[3]

Au milieu de 1970 la recherche TPV a subi un ralentissement considérable. GM a arrêté le développement de TPV à cause de la crise d'énergie et le besoin d'amélioration du rendement de la consommation du carburant. [3]

La situation a changé quand les dispositifs III-V de petite bande interdite sont devenus disponibles. Les cellules utilisées sont basées sur ces matières (GaSb, InGaSb...). Depuis 1990, plusieurs programmes des recherches TPV ont commencées au USA et les NREL (National Renewable Energy Laboratory) ont joué un rôle important dans des séries de conférences de TPV. [3]

Aussi en Europe les recherches sont renouvelées par plusieurs instituts (Fraunhofer ISE à Fribourg, Paul Scherrer Institut dans Viligen et ISET à Kassel) impliqués dans le développement des systèmes TPV. Les conférences internationales de l'activité TPV en Europe ont été organisées à Rome (2002), Fribourg (2004) et Madrid (2006).[3]

En 2006 le développement TPV a connu un ralentissement au USA et en Europe, principalement à cause du manque de financement, ce qui a augmenté l'intérêt des autres sources de l'énergie renouvelables et d'autres technologies de conversion de l'énergie. [3]

I.1.2. Définition du principe de conversion d'énergie TPV

La conversion thermo-photovoltaïque (TPV) est similaire à la conversion d'énergie solaire à partir de cellules photovoltaïque (PV). La cellule PV composé à partir de matériaux semiconducteurs est commune aux deux technologies (bien sûr, les gammes de conversion diffèrent). Dans le cas de la conversion TPV la source est un émetteur thermique terrestre dont la température est de l'ordre de 1000 K à 2000 K [4]. Comparé au soleil la plupart de l'énergie de ce corps chaud est émise dans une gamme de longueur d'onde plus grande.

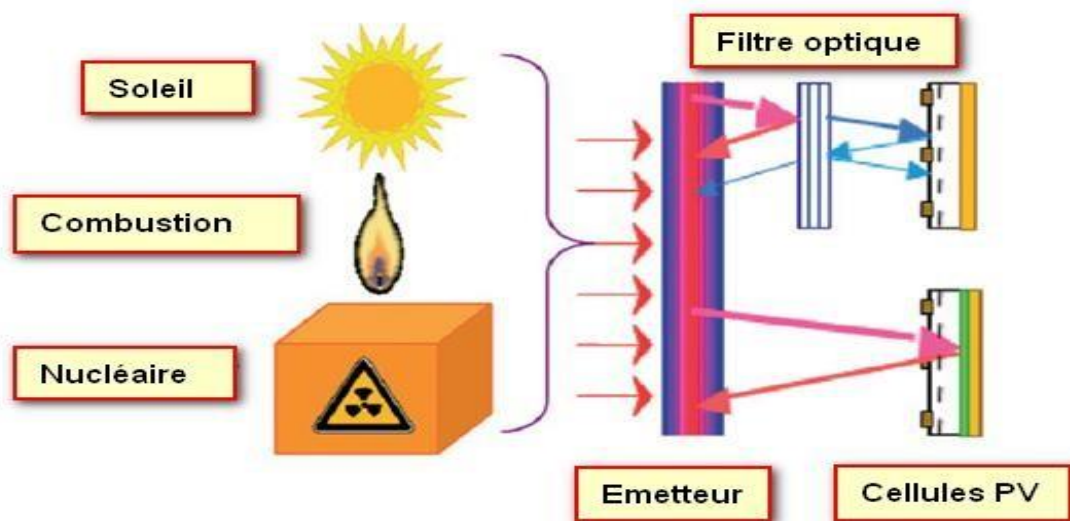


Figure.I.1 : Le concept de conversion d'énergie Thermo-photovoltaïque (TPV) [4]

La difficulté du processus de conversion est d'accorder la cellule PV, l'émetteur est la température de la source chaude. D'une part la cellule doit fonctionner avec des photons de longueur d'onde correspondant à la température de la source. D'autre part, la cellule ne convertit que les photons dépassant une certaine énergie et le reste du rayonnement chauffe la cellule dont les qualités se dégradent. Une solution à ce problème est d'utiliser un filtre qui laisse passer la partie d'énergie qui correspond au gap et qui renvoie les photons inutiles vers l'émetteur; ou utiliser un système de refroidissement externe pour les cellules photovoltaïques. Ainsi un minimum de rayonnement est perdu car le rayonnement réfléchi sert à maintenir la température de l'émetteur ou de la cellule. Une bonne partie du problème est donc concentrée dans le dimensionnement des matériaux, celui de l'émetteur d'une part et celui de la cellule d'autre part. [4]

I.1.3. Comparaison entre la conversion thermo-photovoltaïque et la conversion photovoltaïque

Le principe de la conversion TPV des radiations est le même que celui de la conversion PV. Dans le système PV la source de radiation est le soleil qui peut être supposé comme un corps noir avec une température autour de 6000K loin de la terre (approximativement 150×10^6 km). Dans la TPV la température de l'émetteur est très inférieure, mais la cellule photovoltaïque est placée beaucoup plus proche à ce dernier de quelques centimètres. [3]

Le système optique de TPV est un des aspects clés pour le succès de cette technologie, un autre aspect clé qui caractérise et rend la technologie TPV différente de PV, est la haute densité de la radiation. À cause de la grande distance entre la terre et le soleil et malgré la haute température du dernier, la radiation solaire incidente sur la limite de l'atmosphère externe de la terre a une densité de 0.135 W cm^{-2} qui devient 0.1 W cm^{-2} sur la surface de la terre à cause de l'absorption de la radiation par la vapeur d'eau, CO_2 et d'autres gaz.

Dans le dispositif TPV, cette valeur peut être de centaine de fois plus importante, puisque l'émetteur et la cellule sont séparés seulement par quelques centimètres. Selon la température de l'émetteur, la densité de la radiation de 30 W cm^{-2} peut être atteinte. Par conséquent la puissance produit par le convertisseur TPV est supposée plus importante que celle d'un convertisseur PV normal.

I.1.4. Les composants d'un système thermo-photovoltaïque

La génération TPV d'électricité est une technologie très interdisciplinaire. Le processus de conversion de la radiation thermique venant de la source de chaleur en l'électricité inclut les phénomènes thermo-physiques reliant avec les différentes parties du système TPV.

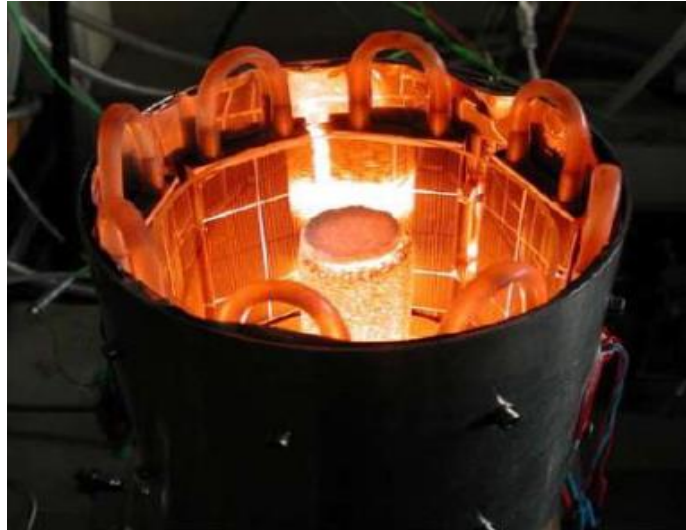


Figure.I.2 : Petit TPV prototype [5]

I.1.4.1. Source de chaleur

Une particularité importante de la technologie TPV est la possibilité d'utiliser différentes sources de chaleur pour réchauffer l'émetteur. La seule condition requise est que la température soit assez haute pour la conversion TPV ; Cela fait que la TPV est une technologie flexible.. De ce fait, beaucoup de différents types de sources de chaleur peut être utilisé en systèmes TPV variant de flammes de combustion par exemple gaz combustible (le méthane, le propane...) ou combustible liquide (le diesel, l'hydrocarbure), forçage radiatif isotopes (RTPV), et concentre la lumière du soleil par un système optique(STPV) La plupart sources de chaleur utilisée dans TPV systèmes sont basés sur la combustion systèmes pour atteindre une température suffisamment élevée. La majorité des systèmes TPV sont conçus et réalisés pour s'adapter cette a catégorie.

I.1.4.2. Emetteur sélective

Comme décrit dans la section précédente, le spectre d'émission d'une source de chaleur est fortement dépendant de la température. Depuis les sources de chaleur ont une température dans la gamme de 1000 °C et 1500 °C et parce que les cellules PV sera seulement absorber les photons qui ont l'énergie au-dessus de l'écart de bande, seule une petite partie du rayonnement émis peut être convertie en électricité. Afin d'améliorer l'efficacité du système, l'utilisation d'un émetteur sélectif est très importante. Le rôle de l'émetteur sélective est d'absorber la chaleur entrant et émettent un spectre d'émission adaptés à la sensibilité du cellule PV [6], ce qui signifie que des émissions sélective est nécessaire avec l'énergie du photon sur une bande étroite juste au-dessus de l'écart de bande de la cellule.

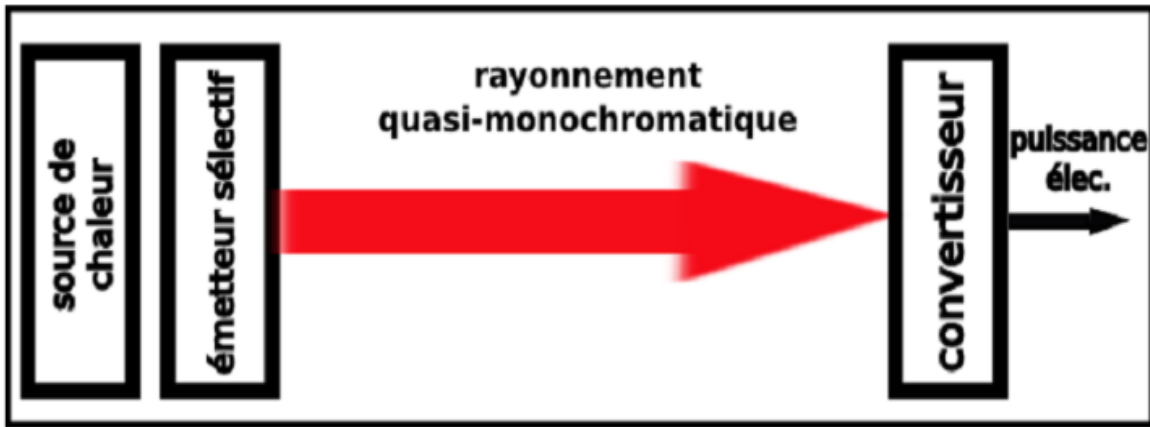


Figure.I.3 : Système TPV avec un émetteur sélectif. [6]

I.1.4.3. Filtre

Le principal phénomène limitant le rendement d'une cellule PV est la discordance entre le spectre solaire et le spectre de sensibilité maximale du convertisseur. Une solution pour pallier ce problème consiste à filtrer le rayonnement incident pour ne laisser parvenir à la cellule PV que la partie qui sera convertie avec un rendement maximal. Il est primordial, pour augmenter le rendement global du système, de récupérer l'énergie du rayonnement non transmis, par exemple en la renvoyant à L'émetteur d'un système TPV pour augmenter sa température et par conséquent, l'intensité de son rayonnement thermique. On présente sur la figure 3.8 une illustration schématique d'un système TPV.

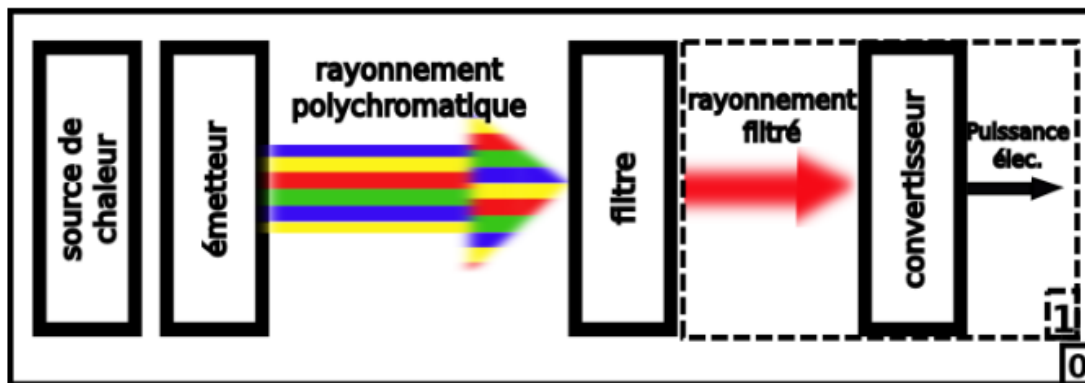


Figure.I.4 :Système TPV avec un émetteur corps noir filtré. [6]

Une grande variété de filtres peut être utilisée, tels que les filtres interférométriques à une ou plusieurs couches, des filtres plasma, des combinaisons des deux, ou encore des filtres à réseaux résonnants. Des réflecteurs au dos de la cellule PV peuvent également être utilisés pour récupérer l'énergie du rayonnement non absorbé. [6]

I.1.4.4. Les Cellules thermo-photovoltaïques

Les cellules thermo-photovoltaïques (TPV) sont à l'état solide des dispositifs semi-conducteurs de jonction p-n qui font directement convertir la chaleur en énergie électrique. Sa structure est légèrement différente de la cellule PV normal à cause de la haute densité de radiation. Sa température est baissée par un système de refroidissement pour éviter son endommagement.

Afin d'être efficace dans une application thermo-photovoltaïque, un matériau semi-conducteur doit avant tout être caractérisé par une largeur de bande interdite aussi faible que possible. La modélisation théorique et semi-empiriques ont montré que la bande interdite des matériaux des cellules TPV d'une simple jonction optimale doit être de l'ordre de 0,4-0,6 eV. [5]

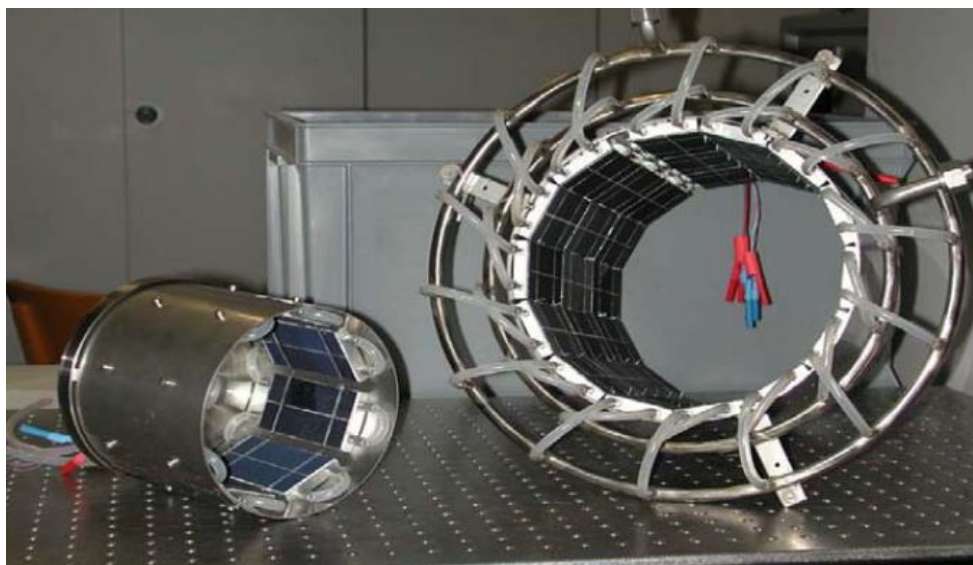


Figure.I.5 : Le générateur de Cellule photovoltaïque pour le petit prototype (à gauche) et le système de démonstration (à droite). [5]

➤ Les cellules TPV à base de Germanium

Le germanium présente une largeur de bande interdite de seulement 0,66 eV, de sorte qu'il a très tôt été étudié quant à ses possibles applications thermo-photovoltaïques. Pourtant, les générateurs TPV basés sur les cellules photovoltaïques de Ge ne sont pas efficaces à cause de mauvaise performance obtenus par ces cellules. De plus, il s'est avéré très difficile de passiver la surface du germanium, ce qui compromet fortement la possibilité de réaliser un jour industriellement des cellules thermo-photovoltaïques dans ce matériau.[5][7]

➤ Les cellules TPV basées de Silicium

Les systèmes TPV basées sur les cellules photovoltaïques de silicium rencontrent des problèmes liés à la nécessité d'opérer à très haute température de l'émetteur, à laquelle tous matériaux connus ne sont pas fiables.

Les cellules solaires de silicium commercial peuvent être appliquées dans les systèmes TPV après avoir résolu le problème de la perte ohmique. La Cellules Si avec une grille supérieure peut être utilisé pour un niveau d'éclairement modéré. Une cellule de ce type a été fabriquée en utilisant n+-p-p+ structures. Le silicium dopé au bore à faible résistivité (0,1- 0,2 Ω cm) et la durée de vie élevée des porteurs minoritaires a été utilisé. Un rendement de 25% a été obtenu sous 100 soleils et une température de 28 0C. [5]

➤ **Les Cellules en GaSb**

L'antimoniure de gallium GaSb a été utilisé dès 1989 pour réaliser des cellules thermo-photovoltaïques et demeure aujourd'hui encore la référence en la matière. GaSb est un semiconducteur III-V de structure cristalline zinc-blende très utilisé dans le domaine thermo-photovoltaïque en raison de sa largeur de bande interdite de seulement 0,72 eV, ce qui lui permet de capter des photons sensiblement moins énergétiques que les composants photovoltaïques usuels. Ceci a permis de réaliser dès 1989 une cellule solaire GaAs/GaSb ayant un rendement de 35 %, ce qui constitua un record en la matière.

Les rendements actuels de ce type de cellules thermo-photovoltaïques avec un corps noir à 1000 °C sont estimés autour de 20 %, pour un rendement limite théorique de 52 % dans cette configuration, ce qui signifie que des progrès sont encore réalisables.[8]

I.1.5 Les applications TPV

Outre le développement de nouvelles cellules PV et la technologie de l'émetteur, les nombreuses applications TPV pour la conversion de l'énergie sont également une force motrice dans la résurgence du TPV intérêt. L'application de la TPV peut être classée en fonction des types de réaction chimique ou de réaction de fusion nucléaire de la source de chaleur thermique. Ces sources de chaleur sont classées en chaleur solaire, combustion de combustibles, sources nucléaires et chaleur résiduelle. La figure 8 présente les applications de la technologie TPV.[9]

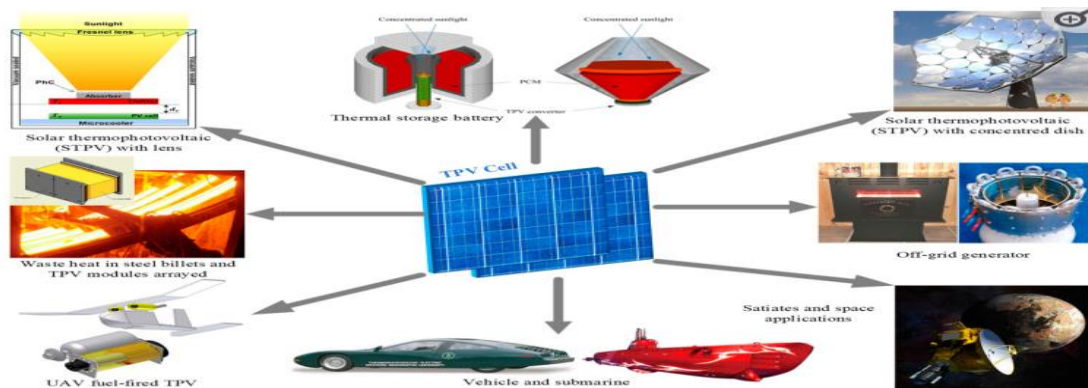


Figure.I.6 : Les applications TPV_[8]

I.1.5.1 Systèmes TPV solaires (STPV)

Les demandes de TPV existent où la source thermique peut être l'énergie solaire, l'énergie nucléaire, ou la combustion. À première vue, il semblerait que l'énergie solaire un TPV (STPV) système n'aurait aucun avantage sur un système classique solaire PV. L'ajout d'un émetteur sélectif ou émetteur thermique plus filtre, le spectre solaire, ce qui correspond approximativement à un 6000 K émetteur corps gris, peut être déplacé en fonction de la bande écart l'énergie des cellules PV. En conséquence, le système STPV permettra d'accroître l'efficacité de système classique d'énergie solaire PV. Outre l'efficacité, une même raison, plus importante à l'intérêt pour STPV l'énergie conversion est la- capacité de stockage de l'énergie thermique et l'énergie de combustion d'entrée pour que le système puisse fonctionner lorsque le soleil n'est pas disponible. Avec une capacité de 24 heures sur 24 de fonctionnement, STPV est viable pour utilitaire électrique utilisé.[2]

I.1.5.2 TPV système alimenté par radio-isotope decay (RTPV)

Un TPV système alimenté par radio-isotope decay (RTPV) est l'une des possibilités du système d'alimentation de missions dans l'espace lointain où le rayonnement solaire densité d'énergie est trop faible pour un PV classiques système de pouvoir être utilisé. Le premier radio-isotope alimentation décroissance systèmes thermoélectriques utilisés convertisseurs d'énergie (RTG).

Toutefois, TPV a le potentiel pour plus d'efficacité thermoélectriques de ; par conséquent, il est considéré comme étant un remplacement.[2]

I.1.5.3 Système TPV à combustion

La TPV conduite par les matières combustibles a beaucoup d'applications commerciales. Ex : en ajoute un système TPV à un appareil de gaz naturels tels que la chaudière pour générer l'électricité. Dans ce système, la TPV n'est pas essentiel d'atteindre la haute efficacité, puisque la chaleur perdu est utilisé dans le processus de la conversion TPV. Blocs d'alimentation pour ordinateurs portables pour les secteurs commercial et militaire est un autre important la combustion TPV application. Un important avantage TPV existantes de combustion interne-Driven applications est fonctionnement silencieux. Cela est particulièrement vrai en missions militaires qui exigent que la mission d'être inaperçues. Un autre combustion-Driven TPV application présentant un potentiel commercial est l'alimentation de véhicules électriques hybrides.[2]

I.2 Rappel sur les transferts de chaleur

Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froids. Le flux de chaleur dont la densité locale est noté ϕ est une

grandeur vectorielle, ce qui signifie qu'un flux de chaleur est caractérisé non seulement par son intensité mais aussi par sa direction. Il est défini en chaque point de l'espace et à l'unité d'une densité surfacique de puissance (W/m²) .

Il y existe trois modes de transfert de chaleur :

I.2.1 La Conduction

La Conduction représente le processus de propagation de la chaleur par le contact direct entre les particules du corps dont les différentes parties ne sont pas isothermes. Dans les solides diélectriques la conduction se fait par les ondes élastiques (les photons) et dans les solides conducteurs électriques par la diffusion des électrons ou porteurs de charge mobiles en parallèle avec les ondes élastiques. Dans les liquides en l'absence de convection, la conduction de la chaleur se fait également par l'intermédiaires des ondes élastiques. Dans les gaz en l'absence de convection, la conduction s'effectue par la diffusion moléculaire. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier [10] : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température (fig.I.9) :

$$\vec{\varphi}_{con} = -k_{con} \cdot S \cdot \overrightarrow{grad}(T) \quad I.1$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi_{con} = -k_{con} \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad I.2$$

Avec :

- φ_{con} : flux de chaleur transmis par conduction (W)
- k_{con} : conductivité thermique du milieu (W/mK)
- x : variable d'espace dans la direction du flux (m)
- S : aire de la section de passage du flux de chaleur (m²)

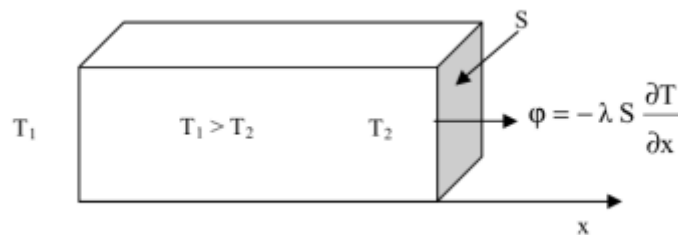


Figure.I.7 : Schéma du transfert de chaleur par conduction

I.2.2 La Convection

La Convection se réfère aux transferts thermiques qui ont lieu dans les fluides en mouvement macroscopique. Le transfert thermique est déterminé par le mouvement des particules élémentaires de fluide entre les zones ayant des températures différentes. Ce mouvement entraîne un mélange intense des particules fluides qui échangent de l'énergie sous forme de chaleur et de quantité de mouvement entre elles.

On distingue :

- **La convection naturelle :** qui a comme origine le mouvement produit par les différences de densité entre les particules chaudes et celles qui sont froides dans un fluide situé dans un champ de pesanteur. En général le fluide chaud est moins dense et a tendance à s'élever dans le champ de pesanteur.
- **La convection forcée :** pour laquelle le mouvement de fluide est causé par l'action des forces extérieures (pompes, ventilateurs). La convection forcée est en général accompagnée par de la convection libre.
- Dans tous les fluides visqueux, il existe une couche de fluide limitée adhérente à la paroi et le transfert de chaleur à travers cette couche se fait par conduction.

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide (fig. I.10), l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton [10,11] :

$$\varphi_{con} = h_{cov} \cdot S(T_p - T_{\infty}) \quad I.3$$

Avec :

- φ_{con} : flux de chaleur transmis par convection (W)
- h_{cov} : coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m²K)
- T_p : température de surface de solide (K)
- T_{∞} : température de fluide loin de la surface (K)
- S : aire de surface de contact solide / fluide (m²)

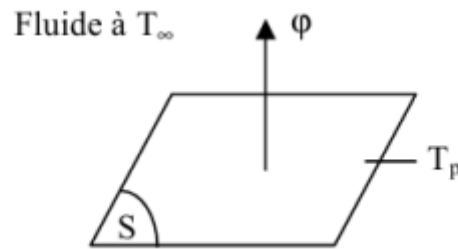


Figure.I.8 : Schéma du transfert de chaleur convectif

Remarque : La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide / fluide.

I.2.3 Le rayonnement

Tous les matériaux rayonnent sans arrêt de l'énergie dans toutes les directions à la suite du mouvement continu de vibration de leurs molécules situées en surface. Alors que le rayonnement solaire comporte essentiellement des radiations de courte longueur d'onde émises à très hautes températures le rayonnement thermique terrestre que nous ressentons comme échange radiatifs de chaleur est principalement constitué de grandes longueurs d'onde et de l'infrarouge lointain émises à une température bien inférieure.

Lorsque le feu est mourant, les flammes disparaissent, les braises encore rouges se ternissent, s'assombrissent et finalement ne rougeoient plus du tout. Les braises tièdes n'émettent plus de clarté, mais elles continuent à rayonner de la chaleur. On ressent la douce tiédeur du feu mourant pendant des heures, alors qu'il n'éclaire plus et émet de la chaleur seulement sous forme de radiation infrarouges [11].

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation (fig. I.11)

$$\varphi_{ray} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T_p^4 - T_\infty^4) \quad I.4$$

Avec :

- φ_{ray} : Flux de Chaleur transmis par rayonnement (W)
- σ : Constante de Stefan ($5.67 \cdot 10^{-34}$ J.s)
- ε : Facteur d'émission de la surface
- T_p : Température de la surface

- T_{∞} : Température du milieu environnant la surface (K)
- S : Aire de la surface (m^2)

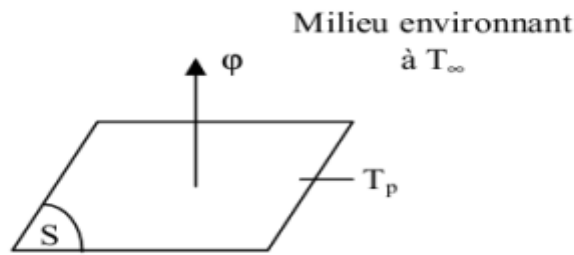


Figure.I.9 : Schéma du transfert de chaleur radiative

I.3 Transfert de Chaleur par Rayonnement

Tous les corps solides, liquides ou gazeux émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission provient de l'agitation thermique des électrons et noyaux des particules qui composent le corps. Il n'est pas mono chromatique et son spectre peut être continu dans le cas des solides et à bande dans le cas de certains gaz. Son intensité dépend de la température du corps. On distingue les corps transparents ou semi – transparents qui émettent un rayonnement uniquement à leur surface. Lorsqu'un rayonnement est incident sur un corps, il peut être réfléchi et absorbé sous forme de chaleur.

I.3.1 Le Spectre électromagnétiques

Dans la transmission de chaleur par rayonnement, le transfert thermique s'effectue par des vibrations électromagnétiques qui se propagent en ligne droite sans aucun support de matière. Le rayonnement thermique concerne les ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde couvre le spectre ultraviolet et le spectre infrarouge (0,1 à 100) en passant le spectre visible (0.38 à 0.76). Le rayonnement peut être décomposé en radiations mono chromatiques qui concernent une longueur d'onde déterminée. Aux températures des applications industrielles, le rayonnement est surtout constitué par de l'infrarouge. Lorsqu'un flux d'énergie rayonnée rencontre un corps, une partie de l'énergie est appelée corps noir ou radiateur intégral. Si une partie de l'énergie est absorbée, mais que cette partie est constante quelle que soit la longueur d'onde de l'énergie incidente, on dit que l'on a affaire à un corps gris (dans le cas contraire à un corps coloré). Si la proportion d'énergie absorbée est indépendante de l'angle d'incidence du rayonnement reçu, on dit que le corps est mat (dans le cas contraire, on dit qu'il est poli). Si aucune énergie ne traverse le corps, on dit que ce dernier est opaque (le contraire de transparent). Contrairement à l'œil humain qui n'est capable de capter le rayonnement que dans une fenêtre très étroite du spectre électromagnétique, celle correspondante au domaine du

visible (longueurs d'onde comprises entre 0.4 et 0.7), les capteurs satellitaires utilisent une fraction beaucoup plus étendue du spectre.

Le Spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence (figure ci- dessous).

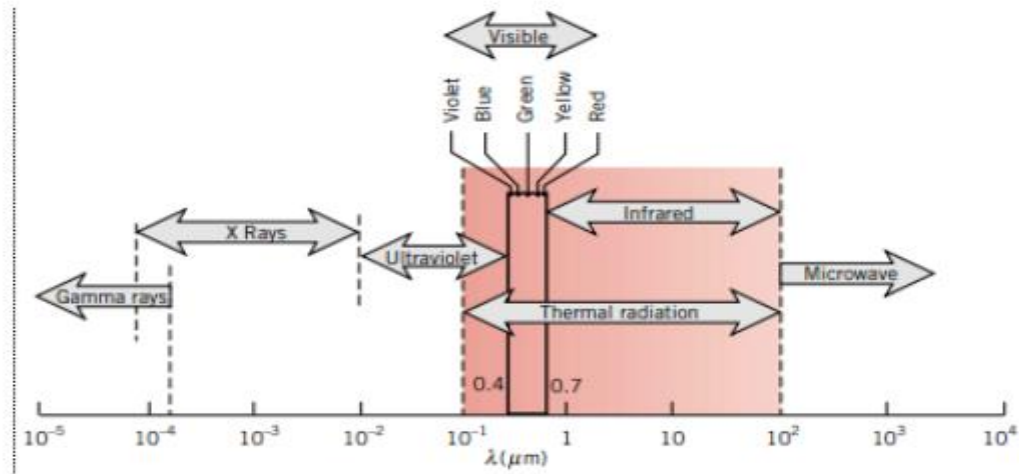


Figure.I.10 : le Spectre électromagnétique [13]

En partant des ondes les plus énergétiques, on distingue successivement :

- **Les Rayons gamma (γ)** : ils sont dus aux radiations émises par les éléments radioactifs. Très énergétiques, ils traversent facilement la matière et sont très dangereux pour les cellules vivantes. Leurs longueurs d'onde s'étendent d'un centième de milliardième (10^{-14} m) à un milliardième (10^{-12} m) de millimètre.
- **Les rayons X** : rayonnements très énergétiques traversant plus ou moins facilement les corps matériels et un peu moins nocifs que les rayons gamma, ils sont utilisés notamment en médecine pour les radiographies, dans l'industrie (contrôle des bagages dans le transport aérien), et dans la recherche pour l'étude de la matière. Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre un milliardième (10^{-12} m) et un cent millième (10^{-8} m) de millimètre.
- **L'infrarouge** : rayonnement émis par tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu (-273°C). En télédétection, on utilise certaines bandes spectrales de l'infrarouge pour mesurer la température des surfaces terrestres et océaniques, ainsi que celle des nuages. La gamme des infrarouges couvre les longueurs d'onde allant de huit dixièmes de millième de millimètre ($8 \cdot 10^{-7}$ m) à un millimètre (10^{-3} m).
- **Les ondes radar ou hyperfréquences** : Cette région du spectre est utilisée pour mesurer le rayonnement émis par la surface terrestre et s'apparente dans ce cas à la télédétection dans l'infrarouge thermique, mais également par les capteurs actifs comme les systèmes radar. Un capteur radar émet son propre rayonnement électromagnétique et en analysant le signal

rétrodiffusé, il permet de localiser et d'identifier les objets, et de calculer leur vitesse de déplacement s'ils sont en mouvement. Et ceci, quel que soit la couverture nuageuse, de jour comme de nuit. Le domaine des hyperfréquences s'étend des longueurs d'onde de l'ordre du centimètre jusqu'au mètre.

- **Les ondes radio :** Ce domaine de longueurs d'onde est le plus vaste du spectre électromagnétique et concerne les ondes qui ont les plus basses fréquences. Il s'étend des longueurs d'onde de quelques cm à plusieurs km. Relativement faciles à émettre et à recevoir, les ondes radio sont utilisées pour la transmission de l'information (radio, télévision et téléphone). La bande FM des postes de radio correspond à des longueurs d'onde de l'ordre du mètre. Celles utilisées pour les téléphones cellulaires sont de l'ordre de 10 cm environ.

I.3.2 Grandeurs relatives aux surfaces émettant un rayonnement

I.3.2.1 Flux d'une source

Désigne la puissance émise par une source dans tout l'espace où elle peut rayonner. Il est noté « ϕ » et s'exprime en Watts. Si une source est de dimensions faibles par rapport à la distance la séparant du point d'où on l'observe, elle sera considérée comme ponctuelle, et pourra rayonner dans toutes les directions de l'espace sphérique qui l'entoure, c'est-à-dire dans un angle solide de 4 stéradians. Si au contraire, la source est de grandes dimensions, un élément ds de la surface de cette source pourra rayonner dans un espace hémisphérique limité par le plan tangent à la source, soit donc dans un angle solide de 2π stéradians.

I.3.2.2 Emittance d'une source

C'est le flux total émis par unité de surface de la source :

$$M = \frac{d\phi}{dS} \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad I.5$$

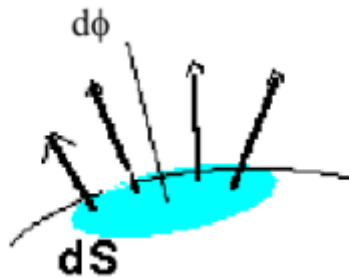


Figure.I.11 : Emittance d'une source [14]

Cette émittance peut aussi être définie en fonction de la longueur d'onde, il s'agit alors de l'émittance monochromatique $\ll M_\lambda \gg$ telle que :

$$M = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda \quad I.6$$

Nous verrons ultérieurement l'importance de cette grandeur dans la loi fondamentale du rayonnement.

I.3.2.3 Intensité d'une source dans une direction $\ll O_x \gg$

Considérons de nouveau un élément de surface $\ll dS \gg$ d'une source $\ll S \gg$, et une direction quelconque $\ll O_x \gg$ par rapport à cet élément $\ll dS \gg$, l'axe $\ll O_x \gg$ étant repéré par l'angle $\ll \beta \gg$ qu'il fait avec la normale $\ll On \gg$ à $\ll dS \gg$. Considérons également un angle solide élémentaire $\ll d\Omega \gg$ entourant la direction $\ll O_x \gg$. Si le flux de la source dans tout l'espace hémisphérique où elle rayonne est $\ll \varphi \gg$, on notera $\ll d\varphi_x \gg$ la portion de ce flux rayonnée dans l'angle solide $\ll d\Omega \gg$.

Par définition, on appellera intensité de la source dans la direction O_x la quantité :

$$I_{Ox} = \frac{d\varphi_{Ox}}{d\Omega} \quad \left(\frac{W}{sr} \right) \quad I.7$$

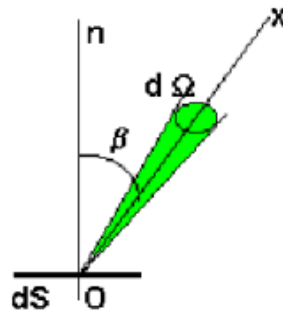


Figure.I.12 : Intensité de la source dans la direction O_x [14]

Cette grandeur est intéressante pour caractériser dans l'espace comment cette surface émet, L'ensemble des vecteurs $\ll I_{Ox} \gg$ définit une surface appelée indicatrice d'émission. Nous pouvons aussi définir l'intensité monochromatique $\ll I_{Ox,\lambda} \gg$ telle que :

$$I_{Ox} = \int_0^\infty I_{Ox,\lambda} d\lambda \quad I.8$$

I.3.2.4 Luminance d'une source dans une direction « Ox »

On définit la luminance « L_{Ox} » d'une source d'aire « dS », dans la direction « Ox », comme le quotient de l'intensité « I_{Ox} » de la source dans cette direction, par l'aire apparente « dS' » de la source dans la même direction :

$$L_{Ox} = \frac{I_{Ox}}{dS'} \quad I.9$$

Avec :

$$dS' = dS \cos\beta$$

Et :

$$I_{Ox} = \frac{d\varphi_{Ox}}{d}$$

On Trouve :

$$L_{Ox} = \frac{d^2\varphi_{Ox}}{d\Omega dS \cos\beta} \quad I.10$$

Remarque:

$d^2 \varphi_{Ox}$ = flux total émis par la source « ds » dans un angle solide « $d\Omega$ » entourant la direction « Ox », donc cette notion n'est pas la 2^{ème} dérivée.

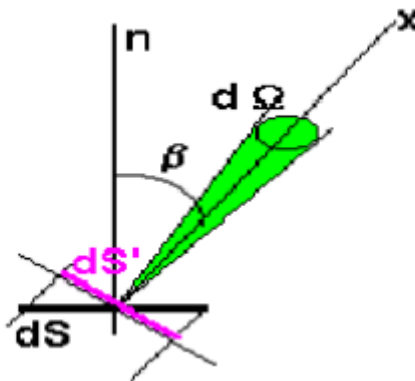


Figure.I.13 : Luminance d'une source dans une direction Ox

Le flux élémentaire émis par un élément de surface « dS » dans un angle solide « $d\Omega$ » entourant une direction « Ox », inclinée d'un angle « β » sur la normale à cette surface, a donc pour expression :

$$d^2\varphi_{Ox} = L_{Ox} dS \cos\beta d\Omega \quad I.11$$

I.3.3 Grandeurs relatives aux surfaces recevant un rayonnement

Les notions de flux, d'intensité et de luminance s'appliquent auasi bien au rayonnement incident sur une surface qu'un rayonnement émis par celle-ci. Par contre, la notion d'émittance est remplacée dans le cas d'un rayonnement incident, par l'éclairement de la surface.

I.3.3.1Eclairement

On désigne ainsi le flux total reçu par l'unité de surface réceptrice

$$E = \frac{d\varphi}{dS} \quad \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad I.12$$

C'est donc la densité de flux de chaleur arrivant sur l'unité de surface réceptrice «dS », en provenance du demi-espace visible depuis cette surface.

I.3.3.2Radiosité et Flux nette perdue

Le Rayonnement qui quitte une surface S_i est la somme de son émission propre et de la réflexion d'une partie du rayonnement incident sur cette surface. On appelle radiosité, que l'on note J_i , l'émittance apparente de la surface S_i [34] donc :

$$J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) E_i \quad I.13$$

Avec : E_i : Eclairement de la surface S_i ($W.m^{-2}$)

Considérons maintenant la surface S_i choisie parmi n surfaces isothermes et homogènes qui délimitent un volume :



Figure.I.14 : Schématique des flux de rayonnement sur une surface

La densité d'énergie nette perdue par rayonnement par S_i s'écrit :

$$\varphi_{i_{net}} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \varepsilon_i E_i \quad I.14$$

En Introduisant, d'après (3.14), la radiosité par :

$$E_i = \frac{1}{1 - \varepsilon_i} (J_i - \varepsilon_i \sigma T^4) \quad I.15$$

I.3.4. Loi de Stefan Boltzmann

Cette loi fournit l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans le vide, en fonction de sa température absolue. Le calcul donne, après intégration sur λ , l'émittance totale, c'est-à-dire la puissance totale rayonnée dans le demi-espace supérieur par unité de surface du corps noir :

$$M^o = \sigma T^4 \quad (I.16)$$

Avec
$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15C^2h}$$

C'est la loi de Stefan Boltzmann où :

σ est la constante de Stefan : $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

- L'équation de l'énergie bidimensionnelle et instationnaire, qui décrit les flux radiatifs et conductif est la suivante :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k\nabla T) = Q \quad I.17$$

Avec :

ρ : La densité (kgm^{-3})

k : Le coefficient de conductivité thermique (W/m.K)

Q : le volume de source de chaleur (W/m^3)

C_p : La chaleur spécifique à pression constante (J /k.g.K).

Pour les conditions aux limites, la conduction est toujours supposée, dans ces conditions, équation (I.17) donne :

$$-n(-k\nabla T) = h(T_{inf} - T) + \left(\frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)}\right) (J_0 - \sigma T^4) + q \quad I.18$$

n : Le vecteur normal à la surface

h_{cov} : Le coefficient de transfert convectif ($\text{W/m}^2.\text{k}$)

T_{inf} : La Température du liquide de refroidissement par convection (k)

ε : L'émissivité de la surface

J_0 : La radiosité de surface (W/m^2)

σ : La constante de Stefan Boltzman

La conduction est toujours présente sur la différente frontière. Le modèle simule l'émetteur à une température donne T_{source} sur la limite intérieure. A la limite externe d'émetteur, il y a rayonnement (surface – surface) en compte lors de la condition limite. Il simule les miroirs en prenant en compte le rayonnement sur toutes les frontières et en appliquant une faible émissivité. Les frontières intérieures des cellules PV et de l'isolation d'une faible émissivité. De plus, les cellules photovoltaïques convertir une fraction de l'irradiation de l'électricité à la place de la chaleur. Dissipateurs de chaleur. Dissipateur de chaleur sur leurs frontières intérieures simuler cet effet selon :

$$q = G \eta_{pv} \quad I.19$$

Avec :

G : Le flux d'irradiation (W/m²)

η_{pv} : le rendement de la cellule photovoltaïque (PV)

Celui-ci (η_{pv}) dépend de la température locale , avec un maximum de 0.2 à ($T_{pv-cell} = 800$ K) et ($T_{source} = 1300$ K) [14]

$$\eta_{pv} \begin{cases} = 0.2 \left\{ 1 - \left(\frac{T_{pv}}{800 K} - 1 \right)^2 \right\} & T_{pv} \leq 1600 K \text{ c. - à } T_{source} \leq 1900 K \\ = 0 & T_{pv} > 1600 K \text{ c - à } T_{source} > 1900 K \end{cases}$$

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parlé en général du système photovoltaïque thermique. Nous avons présenté des concepts importants sur le système, tels que son principe de fonctionnement, ses applications, ses composants et la différence entre celui-ci et le système photovoltaïque traditionnel. Ensuite, nous avons présenté les transferts de chaleur du système. Tous ces concepts peuvent nous aider à simuler une cellule TPV dans le chapitre suivant

CHAPITRE II

Simulation *Résultats et Discussion*

II.1 Introduction

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis. La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. C'est dans cette philosophie la que COMSOL MULTIPHYSICS a été développé.

II.2 Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS



Figure. II.1: La version COMSOL 3.5a

L'objectif de ce travail est d'établir un modèle numérique permettant de étudié un système thermo-photovoltaïque (TPV).

Le logiciel Comsol, anciennement appelé FEMLab, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, comme l'électrostatique, l'écoulement de fluides ou encore la déformation des matériaux.

Développé initialement comme une toolbox de Matlab, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement.

Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes multiphysiques. Il est ainsi possible d'étudier un système thermo-photovoltaïque (TPV) comme notre étude (Figure.II.2).

Des fonctions avancées permettent d'entrer manuellement des EDP spécifiques. De plus, les données des logiciels sont accessibles depuis Matlab, ce qui permet la réalisation de scripts.

Il possède de plus un environnement graphique permettant de réaliser rapidement des figures relativement complexes (en 1D, 1D-axisymétrique, 2D, 2D-axisymétrique ou 3D). Par ailleurs, COMSOL Multiphysics possède un environnement de programmation dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du problème. Par défaut le maillage est automatique et se compose de triangle en 2D et de tétraèdre en 3D. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits « solvers », pouvant être linéaires ou non, paramétriques ou encore dépendant du temps [16].

En effet, les différentes étapes proposées par de outil sont :

- 1- La Construction de la géométrie,
- 2- Définition de la physique : les paramètres et les variables
- 3- Définition des propriétés des matériaux : une bibliothèque de matériaux est à disposition dans COMSOL Multiphysics,
- 4- Les conditions aux limites : on impose des conditions sur certaines frontières,
- 5- Le Maillage de la géométrie : le maillage des domaines est automatique. Il est possible de le raffiner globalement ou de manière localisée,
- 6- Exploitation des résultats post-traitement : lorsque le programme est convergé vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de postprocessing, qui permet d'analyser les résultats.

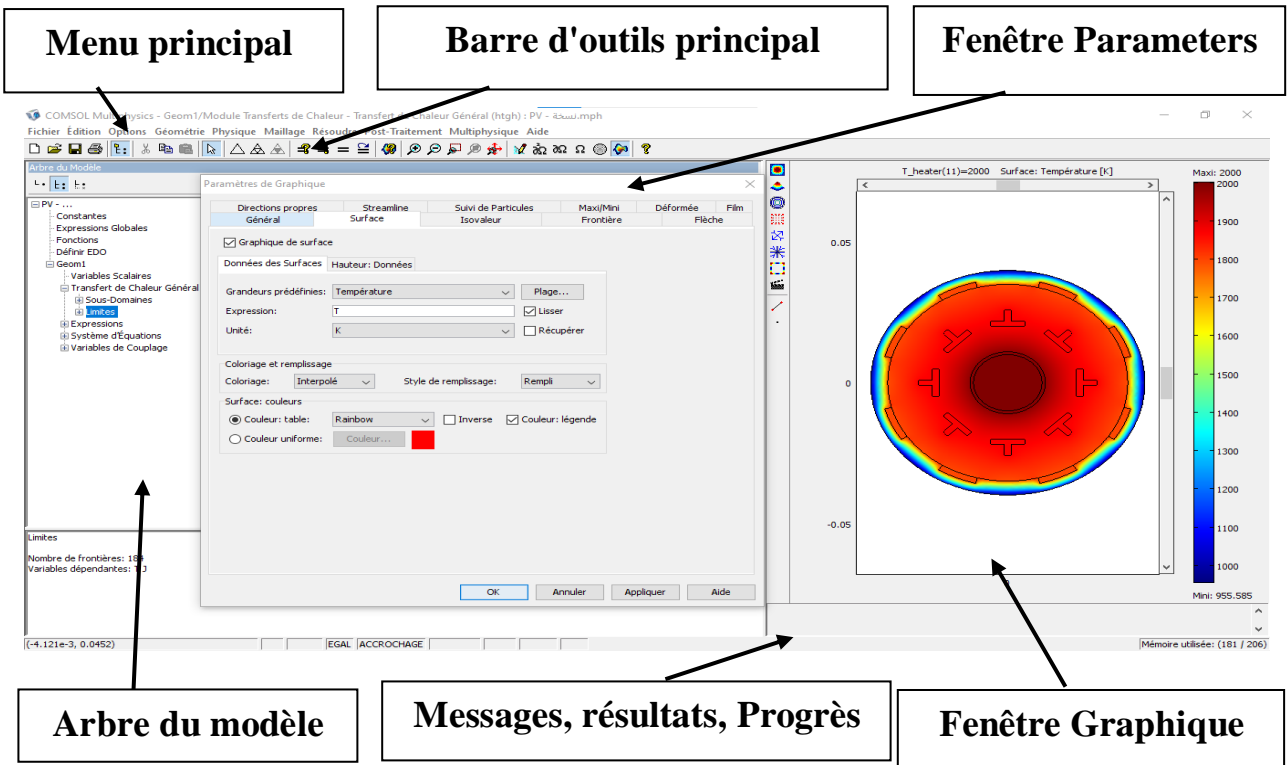


Figure. II.2 : Présentation de géomètre étudié dans COMSOL Multiphysics 3.5a.

II.3.1 Modélisation le problème physique :

La géométrie du système étudié est représentée en figure II.4 Ce Système se compose de 8 miroirs pour concentrer le rayonnement du faisceau sur 8 cellules PV. Le combustible brule à l'intérieur d'un dispositif émetteur qui émane intensément. Pour réduire la température des cellules TPV sont refroidies entre le coté arrière et la surface de l'isolant.

Pour comprendre bien le système qui nous sommes étudié dans ce travail, la figure II.3 donne un aperçu sur système en réalité.

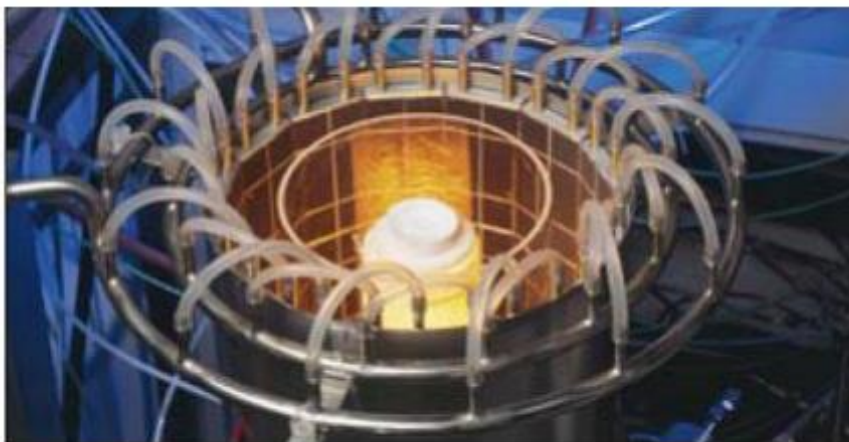


Figure. II.3 : Un Système prototype [17]

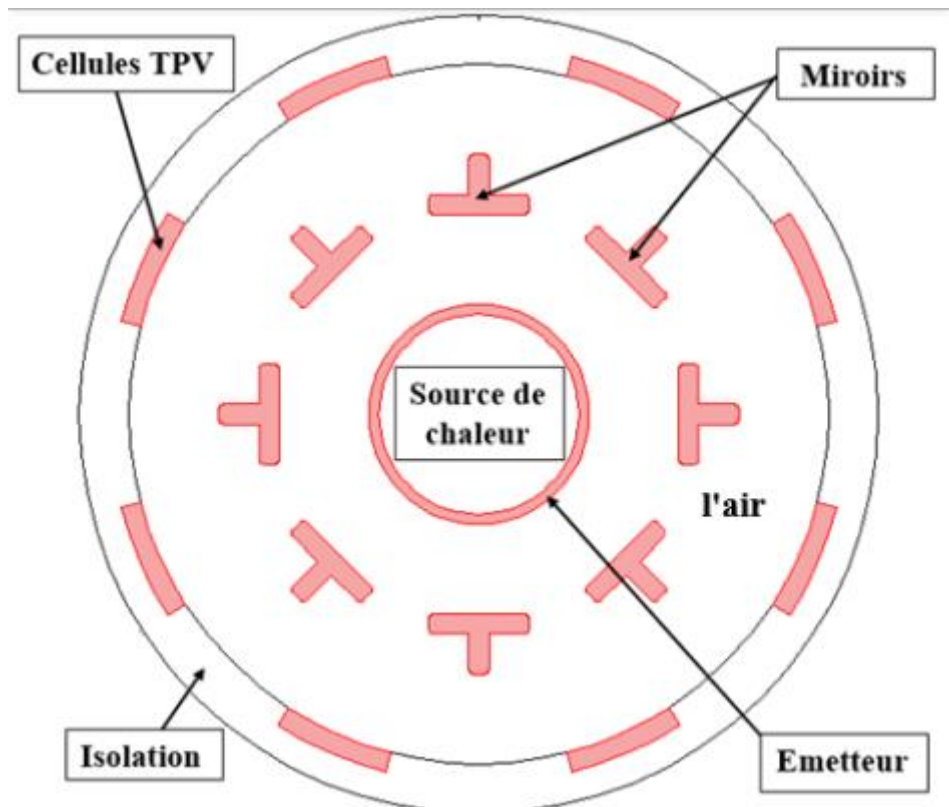


Figure. II.4 : La géométrie du système TPV modélisé

II.3.2 Les paramètres et les variables:

Le tableau résume les propriétés des matériaux et les paramètres utilisés :

Tableau II.1 : les propriétés du matériau et les paramètres utilisés

<i>Paramètre</i>	<i>Expression</i>	<i>Description</i>
T_{source}	1000 (K)	Température de l'émetteur
C_{p-air}	1100(Jkg ⁻¹ k ⁻¹)	Capacité thermique spécifique de l'air
h_{air}	5 (W/m ² K)	Coefficient de transfert de chaleur de l'air
T_{air}	293 (K)	Température de l'air
k_{ins}	0.05 (W/m. K)	Conductivité thermique de l'isolant
ρ_{is}	700 (kg/m ³)	Densité de l'isolant
C_{p-is}	100 (J/(kg.k))	Capacité thermique spécifique de l'isolant
e_{is}	0.1	Surface emissivité de l'isolant
k_m	10(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Conductivité thermique du miroir
ρ_m	5000 (kg. m ⁻³)	Densité du miroir
C_{p-m}	840 (J/kg. K)	Capacité thermique spécifique du miroir
e_m	0.01	Emissivité du miroir
k_{emet}	10(W/m. K)	Conductivité thermique de l'émetteur
ρ_{emet}	2000 (kgm ⁻³)	Densité de l'émetteur

C_{p-emet}	900 (J/kg.K)	Capacité thermique spécifique de l'émetteur
e_{emet}	entre (0.79 – 0.99)	Surface Emissivité de l'émetteur
k_{pv}	93 (W/kg.K)	Conductivité thermique de cellule PV
ρ_{pv}	2000 (kg /m ³)	Densité de la cellule PV
C_{p-pv}	840 (J/kg.K)	Capacité thermique spécifique de la cellule PV
e_{pv}	0.99	Emissivité de la cellule PV
h_{ref}	50 (W/m ² K)	Coefficient de transfert de chaleur, l'eau de refroidissement
T_{ref}	273 K	Température de l'eau de refroidissement

II.3.3 Géométrie du model cellule TPV :

Tableau II.2 : La Géométrie de cellule TPV

	L'épaisseur cellule TPV	Longueur cellule TPV
x1	-0.0108578448310932	-0.015637270106653
y1	0.0391421551689067	0.0283171963913152
x2	-0.00918095759849197	-0.0108578448310932
y2	0.0380521784677159	0.0391421551689068

II.3.4 Maillage

le maillage généré de la structure est présenté dans la figure II.5. On a adopté un maillage non-uniforme. La maille à 3019 nœuds et 5964 éléments. La qualité minimale des éléments est 0,6179 et le triangulaire 5964.

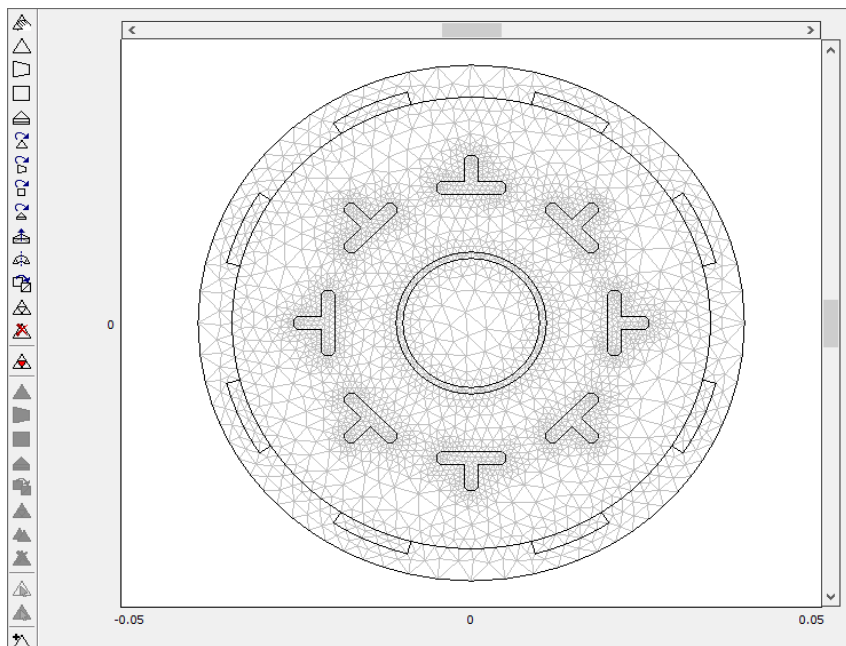
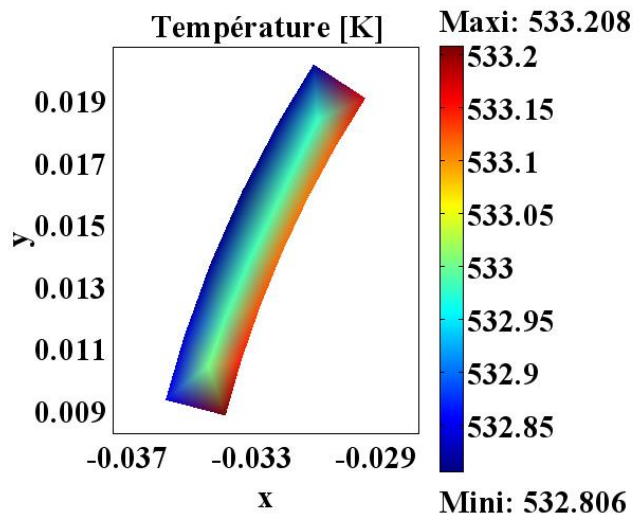


Figure. II.5 : Maillage

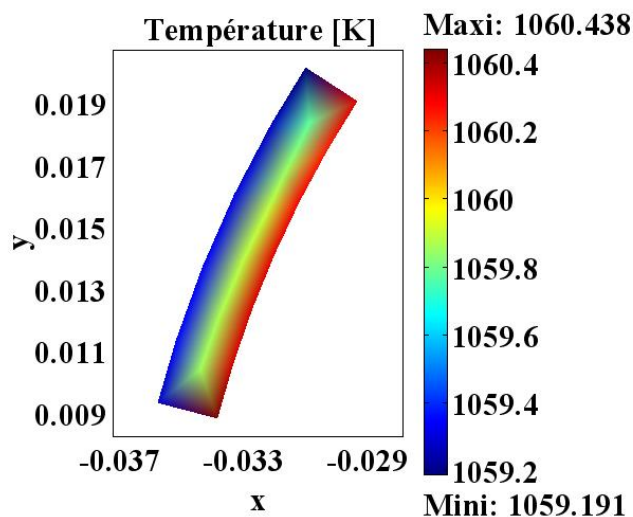
II.3.5 Résultats :

➤ **Température des cellules TPV [K]:**

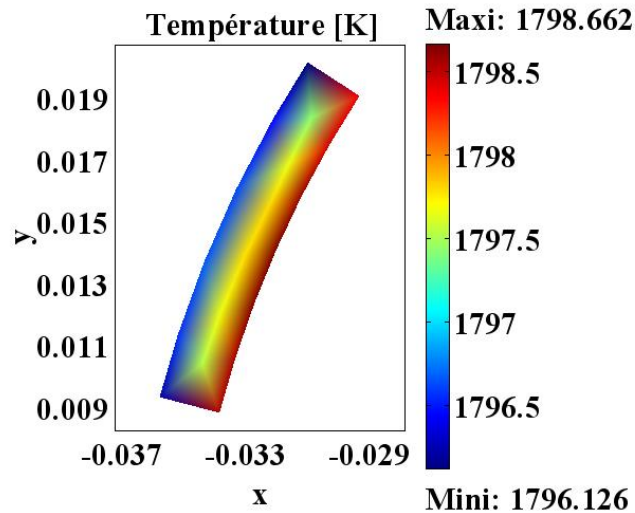
La figure (a, b et c) représente la distribution de la température de cellule TPV pour différentes températures de source : 1000K, 1500K et 2000K respectivement. On peut voir que la cellule est soumise à une distribution de température stationnaire et sa température augmente par en augmentant de la température de source Cela reflète l'augmentation attendue de la production d'énergie. Cependant l'augmentation de la température des cellules peut entraîner des problèmes tels qu'une perte de chaleur accrue et une dégradation des performances des cellules.



(a)



(b)



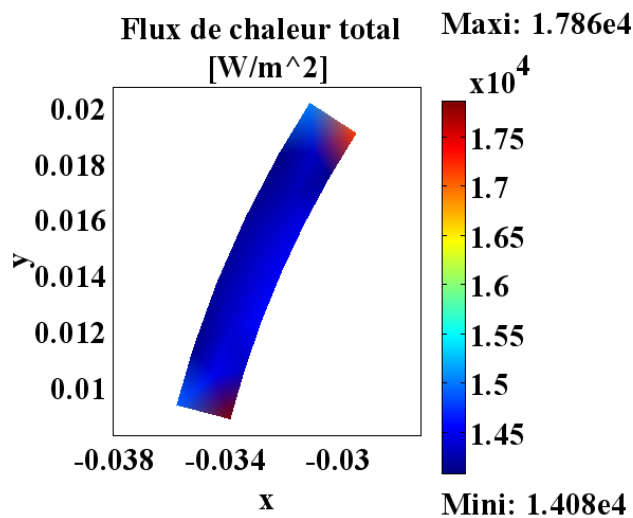
(c)

Figure II.6 : distribution stationnaire de la température de cellule TPV. (a) : $T_{source}= 1000K$, (b) : $T_{source}= 1500K$ et (c) : $T_{source}=2000K$.

➤ **Flux de chaleur total des cellules TPV [W/m²] :**

La figure (a, b et c) montre le Flux de chaleur total de cellule TPV pour différentes températures de source : 1000K, 1500K et 2000K respectivement. On peut voir que les valeurs de flux augmentent avec l'augmentation de la température d'émetteur Ceci est dû à la forte réflectivité (du miroir) et émissivité (de l'émetteur).

La Relation avec la température de la source : La figure montre clairement que le flux de chaleur total de la cellule TPV augmente avec l'augmentation de la température de la source. Cela est conforme à la loi de Stefan-Boltzmann, qui stipule que le flux de chaleur émis par un corps noir (ou une surface similaire) est proportionnel à la quatrième puissance de sa température.



(a)

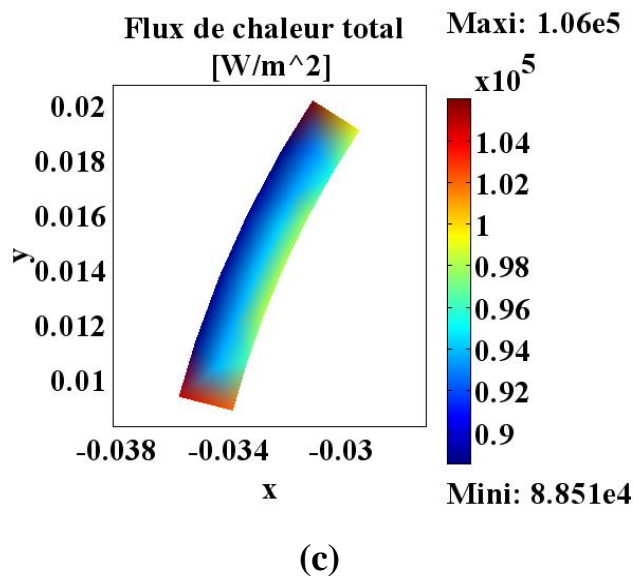
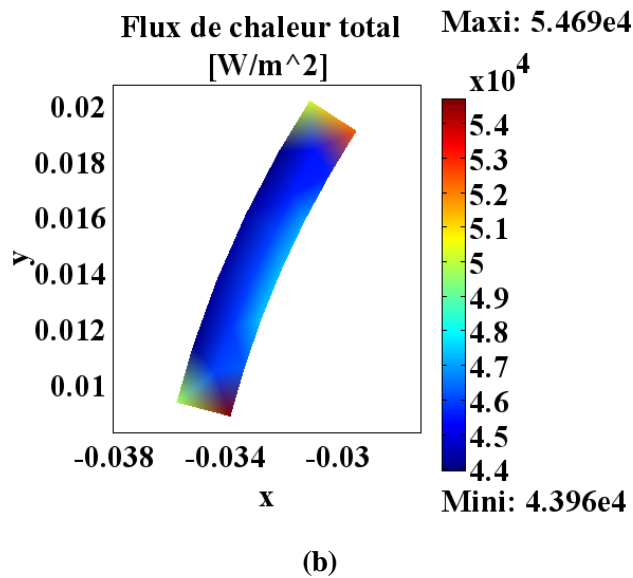


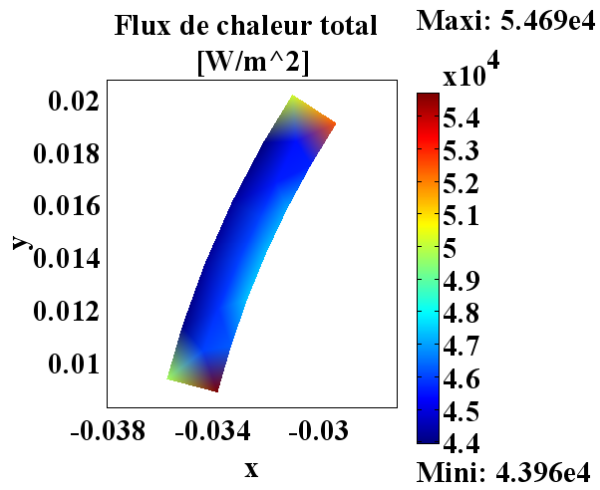
Figure II.7 : Flux de chaleur total de cellule TPV pour (a) : $T_{source}= 1000K$, (b) : $T_{source}=1500K$ et (c) : $T_{source}= 2000K$.

➤ Flux de chaleur total des cellules TPV [W/m^2]

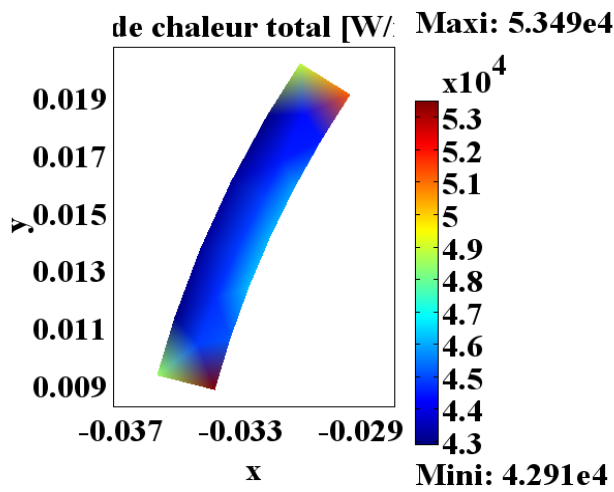
❖ Influence de l'émissivité e_{emit}

La figure (a, b et c) montre le Flux de chaleur total de cellule TPV pour $T_{source}=1500K$ et différentes valeurs de l'émissivité (e_{emit}) 0.99, 0.98, 0.79.

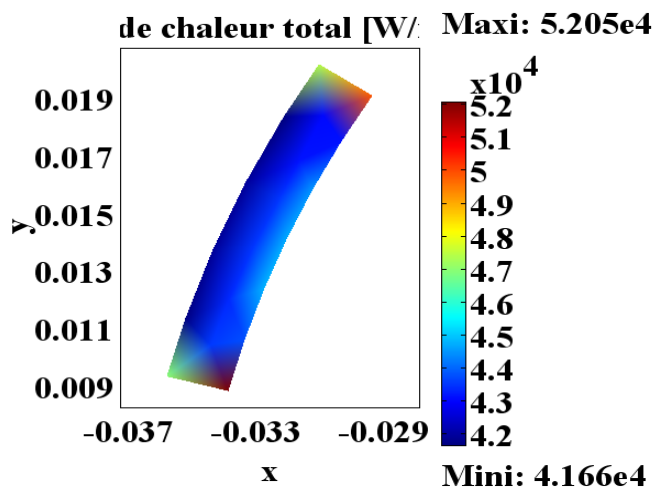
Le flux de chaleur total varie de façon significative le long de la surface de la cellule TPV. L'effet d'ombrage causé par la position des miroirs joue un rôle crucial dans cette variation. Les zones de la cellule PV qui reçoivent moins de rayonnement direct en raison de l'ombrage auront un flux de chaleur total réduit, tandis que les zones exposées directement à rayonnement de source auront un flux de chaleur total plus élevé. De plus, l'augmentation de l'émissivité (e_{emit}) contribue également à cette variation, Une plus grande émissivité signifie que le émetteur peut libérer plus de chaleur, ce qui se traduit par un flux de chaleur total plus élevé pour une même position le long de la surface de la cellule PV.



(a)



(b)



(c)

Figure II.8: Flux de chaleur total de cellule TPV pour $T_{source}=1500K$

et pour (a) : $e_{emit} = 0.99$, (b) : $e_{emit} = 0.89$ et (c) : $e_{emit} = 0.79$

➤ **La distribution radiale de la temprature**

La figure représente la distribution radiale de la temprature pour diffrentes valeurs de temprature de l'émetteur, à savoir : 1000 K, 1500 K et 2000 K . Les cellules TPV atteignent les tempratures suivantes:

$$T_{pv} = \begin{cases} 500 \text{ K pour } & T_{source} = 1000 \text{ K} \\ 1100 \text{ K pour } & T_{source} = 1500 \text{ K} \\ 1800 \text{ K pour } & T_{source} = 2000 \text{ K} \end{cases}$$

Les résultats montrent qu'il y a une diminution progressive de la chaleur de l'émetteur vers la cellule. C'est-à-dire que la temprature de la cellule diminue au fur et à mesure que la source s'éloigne d'elle, mais le point intéressant est qu'il y a une augmentation significative de la temprature de la cellule lorsque la temprature de la source augmente.

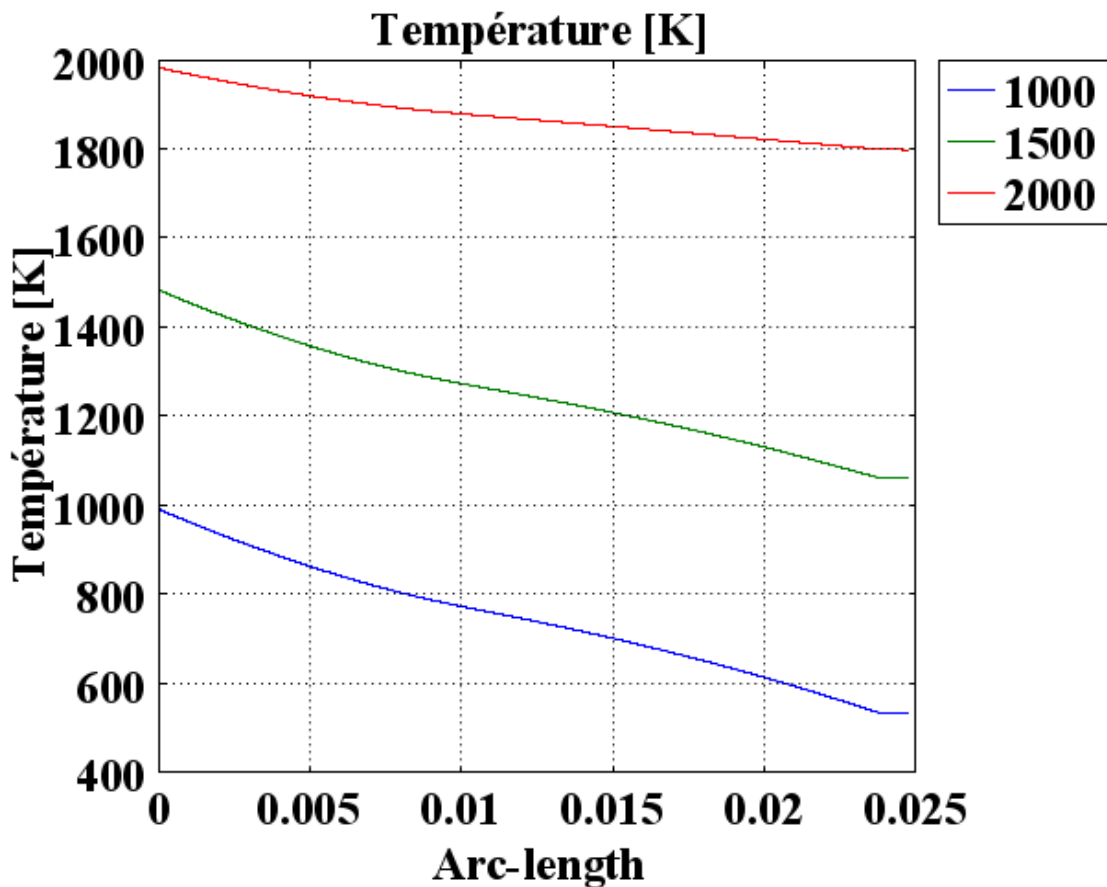


Figure II.9 ::la distribution radiale de la temprature pour diffrentes valeurs de temprature de l'émetteur : 1000 K, 1500 K et 2000 K

➤ le rendement de la cellule TPV

L'efficacité de la cellule augmente avec l'augmentation de la température de l'émetteur, comme le montrent les figures 4.10. mais l'augmentation des températures élevées affecte négativement les cellules

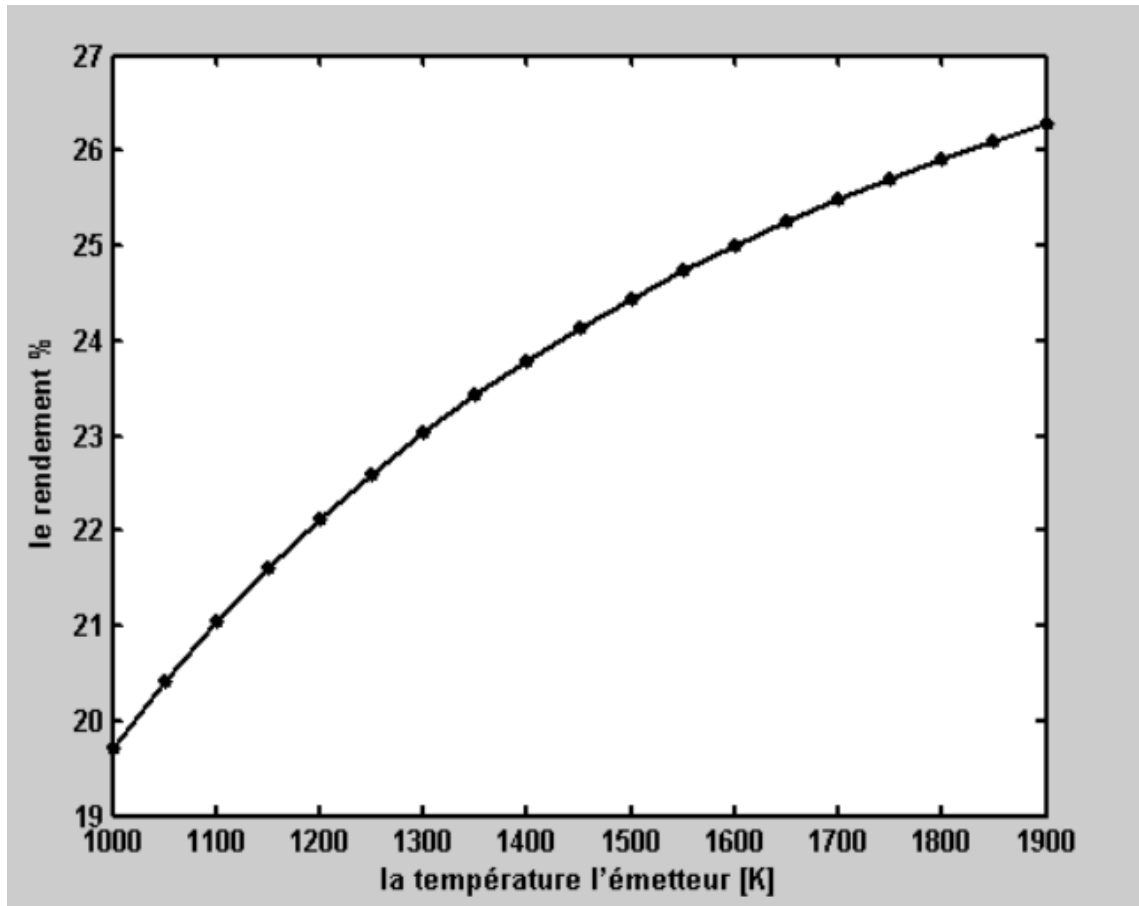


Figure II.10 : le rendement de la cellule TPV en fonction de température de l'émetteur

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel de simulation Comsol Multiphysics (définition, différentes fenêtres) qui servira à simuler la cellule solaire. Ensuite nous avons présenté la structure de notre simulation (choix du modèle numérique de la géométrie, des conditions aux limites du modèle et maillage de la structure) et présenté et discuté les résultats obtenus par cette simulation.

*Conclusion
Générale*

Conclusion générale :

L'objectif de notre étude était de simuler une cellule thermo-photovoltaïque. L'effet des conditions de fonctionnement sur l'efficacité et la température des cellules du système a été étudié.

Les résultats sont affichés pour différentes températures d'émetteur. Les observations les plus importantes contenues dans la présente étude peuvent être résumées comme suit :

La température de fonctionnement idéale pour une efficacité maximale se situe entre 1600 et 1800 degrés Kelvin.

Le flux radiatif varie considérablement le long de la surface de la cellule TPV en raison de la position des miroirs.

Les cellules TPV atteignent une température d'environ 1800°K lorsque la température de l'émetteur est de 2000°K, ce qui est supérieur à la température maximale de fonctionnement de 1600°K.

L'augmentation de l'émissivité de l'émetteur augmente l'éclairage des cellules photovoltaïques, ce qui entraîne une efficacité accrue.

Le système de refroidissement affecte le fonctionnement du système TPV.

Malgré le rendement bas de ces cellules, elles sont très utiles pour recyclage d'énergie thermique perdue et plus particulièrement lorsque la température des sources est élevée tel que les cheminées industrielles, réacteur nucléaire,

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **Nichiporuk Oleksiy** Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigtés, institut national des sciences appliquées de Lyon,2005
- [2] **Donald L. Chubb**: Fundamentals of THERMOPHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION. ELSEVIER, NASA Glenn Research Center 21000 Brookpark Road, USA,2007
- [3] **Giovanni Mattarolo**, Development and Modelling of a Thermophotovoltaic System, University of Kassel, Germany, 2007.
- [4] **Philippe Ben-Abdallah et Gilberto Domingues** : Matériaux nanostructurés pour laconversion thermophotovoltaïque. Laboratoire de thermocinétique de Nantes-UMR 6607. 2008
- [5] **Antonio Marti and Antonio Luque**, Next Generation Photovoltaics High efficiency through full spectrum utilization, IOP, London, 2004, p 246-273
- [6] **Elyes Nefzaoui** : Conception et optimisation de sources thermiques cohérentes pour applications thermo-photovoltaïques. Thèse Doctorat, École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, 8 mars 2013.
- [7] **A. Krier**, Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics, Springer, New York, 2007, p 673-738.
- [8] **Jvan der Heide** : Thermophotovoltaic. imec vzw, Leuven, Belgium, pp:600-617. 2007.
- [9] **Gamel MMA, Lee HJ, Rashid WESWA, Ker PJ, Yau LK, Hannan MA, Jamaludin MZ**. A Review on Thermophotovoltaic Cell and Its Applications in Energy Conversion: Issues and Recommendations. Materials (Basel). 2021 Aug 30;14(17):4944. doi: 10.3390/ma14174944. PMID: 34501032; PMCID: PMC8434541.
- [10] **Holman.J.P**: Heat transfer. Kin Keong Printing Co, PTE,LTD, Singapore, 1986(6), pp: 2-3.
- [11] **DONALD R. et al**: THEORY AND PROBLEMS OF HEAT TRANSFER. SCHAUM'S OUTLINE SERIES, 1997(2), pp: 184-232.
- [12] **DONALD R. et al**: THEORY AND PROBLEMS OF HEAT TRANSFER. SCHAUM'S OUTLINE SERIES, 1997(2), pp: 289-309.
- [13] **William S.Janna**: Engineering heat transfer. CRC Press LLC, United States of America, 2000 (2), pp: 547-578.
- [14] **J.Brau** : Rayonnement. INSA de Lyon, 2006, pp : 9-25.
- [15] **Ali Kianifar** : Optimizing TPV System for Maximize Surface to Surface Radiation and Minimize Cells Temperature. The First TSME International Conference on Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani, 20-22 October, 2010.
- [16] **Henry.M et Franet.H** : Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques. Dunod, Paris, 2009.
- [17] Courtesy of Dr. D. Wilhelm, Paul Scherrer Institute, Switzerland by [Cathy Fairclough](#) 31 January 2018

Résumé :

Le photovoltaïque thermique (TPV) génère de l'électricité à partir de la combustion de combustibles et du rayonnement. Le carburant brûle à l'intérieur d'un appareil appelé émetteur, qui rayonne intensément. Les cellules TPV captent le rayonnement et le convertissent en électricité. Les systèmes TPV, contrairement aux systèmes électroniques classiques, doivent maximiser le transfert de chaleur radiante pour améliorer l'efficacité. Pour améliorer l'efficacité du système et réduire les coûts du système, les ingénieurs doivent travailler avec des cellules TPV dans des zones plus petites, puis utiliser des miroirs pour concentrer le rayonnement sur elles. Cependant, il existe une limite à la quantité de rayonnement pouvant être délivrée aux cellules TPV. Si l'intensité du rayonnement devient trop élevée, la température des cellules peut augmenter. Par conséquent, il est nécessaire d'optimiser la géométrie du système et les conditions de fonctionnement pour obtenir des performances maximales au moindre coût de matériaux. Dans ce travail, nous avons étudié l'effet des conditions de fonctionnement sur l'efficacité et la température des cellules TPV. Les résultats ont montré que les cellules TPV subissent une large distribution de température. Il explique également que la température de fonctionnement optimale se situe entre 1 600 K et 1 800 K, là où la production d'énergie électrique atteint son maximum.

Mots-clés : Thermo-photo-voltaïque ; simulation numérique ; Modélisation de rayonnement

Abstract:

Thermal photovoltaics (TPV) generate electricity from fuel combustion and radiation. The fuel burns inside a device called a transmitter, which radiates intensely. TPV cells capture radiation and convert it into electricity. TPV systems, unlike typical electronic systems, must maximize radiant heat transfer to improve efficiency. To improve system efficiency and reduce system costs, engineers must work with TPV cells in smaller areas and then use mirrors to focus radiation onto them. However, there is a limit to the amount of radiation that can be delivered to TPV cells. If the radiation intensity becomes too high, the temperature of the cells can rise. Therefore, it is necessary to optimize the system geometry and operating conditions to achieve maximum performance at the lowest material cost. In this work, we studied the effect of operating conditions on the efficiency and temperature of TPV cells. The results showed that TPV cells experience a large temperature distribution. It also explains that the optimal operating temperature ranges between 1600 K and 1800 K, where electrical energy production reaches its maximum.

Keywords: Thermophotovoltaics; Numerical simulation; Radiation modeling

ملخص

تقوم الخلايا الكهروضوئية الحرارية بتوليد الكهرباء من احتراق الوقود والإشعاع. يحترق الوقود داخل جهاز الإرسال والذي يشع بشكل مكثف. تلتقط الخلايا الكهروضوئية الحرارية الإشعاع وتحوله إلى كهرباء. تعمل الأنظمة الكهروضوئية الحرارية على عكس الأنظمة الكهروضوئية التقليدية، تعمل على زيادة نقل الحرارة الإشعاعية إلى أقصى حد لتحسين كفاءة النظام وتقليل تكاليف النظام، يجب على المهندسين العمل على خلايا أصغر ثم استخدام المرايا لتركيز الإشعاع عليها. ومع ذلك، هناك حد لكمية الإشعاع التي يمكن تسليمها إلى الخلايا الكهروضوئية الحرارية. إذا أصبحت شدة الإشعاع مرتفعة للغاية، فقد ترتفع درجة حرارة الخلايا. ولذلك، فمن الضروري تحسين هندسة النظام وظروف التشغيل لتحقيق أقصى قدر من الأداء بأقل تكلفة مادية. في هذا العمل قمنا بدراسة تأثير ظروف التشغيل على كفاءة ودرجة حرارة الخلايا الكهروضوئية الحرارية. أظهرت النتائج أن الخلايا الكهروضوئية الحرارية تشهد توزيعًا واسعًا لدرجة الحرارة. ويوضح أيضًا أن درجة حرارة التشغيل المثالية تتراوح بين 1600 كلفن و1800 كلفن، حيث يبلغ إنتاج الطاقة الكهربائية ذروتها.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية الحرارية؛ محاكاة رقمية؛ النمذجة الإشعاع

