



Mémoire présenté à la

FACULTE DES SCIENCES-DEPARTEMENT DE PHYSIQUE.

Pour l'obtention du diplôme de
Master en Physique.

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables.

Par :

RABHINE Houssameddine.

Sur le thème :

Modélisation, simulation numérique et optimisation d'un système thermophotovoltaïque à base de cellules en GaSb.

Soutenu le 11/06/2023 devant le jury composé de :

✚ Mr. BAGHDADLI Tewfik	MCA	Univ-de Tlemcen	President
✚ Mr. AMARA Sofiane	Professeur	Univ-de Tlemcen	Examineur
✚ Mr. CHABANE Sari Nasr-Eddine	Professeur	Univ-de Tlemcen	Encadreur
✚ Mme. BELABBACI Cherifa		Univ-de Tlemcen	Co-encadreur
✚ Mr. VIROL Ionescu	Professeur	Univ-de Constanta	Invité
		o (Roumanie)	

Année universitaire :2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Je dédie ce modeste travail

À mes **Chers Parents** et à mes **Chères frères** pour leur soutien et leurs encouragements constants.

“IT’S IMPOSSIBLE TO WORK HARD FOR SOMETHING YOU DON’T ENJOY.”

KEIKO AYANO « SILICA »

Remerciements

Je souhaite avant tout remercier mon encadreur de mémoire, Pr. Chabane Sari Nasr-Eddine, pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence m'a grandement stimulé.

Je remercie Mr. BAGHDADLI Tewfik, Maître de conférences classe « A » au département de physique de la faculté des sciences, Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence de ce jury.

Je remercie sincèrement Mr. AMARA Sofiane, professeur au département de physique de la faculté des sciences, Université de Tlemcen, qui a accepté de faire partie de mon jury.

Je remercie aussi Mme BELABBACI Cherifa, doctorante à l'Unité de Recherche de Matériaux et Energies Renouvelables (URMER) pour m'avoir donné l'occasion extraordinaire de réaliser mon travail.

Un grand merci également à Mr. VIROL Ionescu, professeur de Université Ovidius Constanta-Roumanie pour sa collaboration et pour avoir eu la patience de répondre à mes innombrables questions.

Je remercie tous les membres de l'unité de recherche matériaux et énergie renouvelable (URMER).

J'aimerais exprimer ma gratitude à tous les chercheurs et spécialistes, trop nombreux pour les citer, qui ont pris le temps de discuter de mon sujet. Chacun de ces échanges m'a aidé à faire avancer mon analyse.

Enfin, merci à tous mes camarades et mes amis ; Nourelhouda, Bachir, Youssef, Yacine, Ihab, Mohammed Benaissa.

Table de matière :

Remerciements.....	III
Table de matière.....	IV
Liste des tableaux.....	VI
Liste des figures.....	VII
Abréviation.....	IX
1. Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur la thermophotovoltaïque.	
1.1. Introduction.....	4
1.2. Histoire de la thermophotovoltaïque.....	5
1.3. Fonctionnement physique des système TPV.....	6
1.4. L'efficacité des système TPV.....	7
1.5. Facteur de forme (FF) pour les cellules thermophotovoltaïques.....	9
1.6. Composante des systèmes TPV.....	10
1.6.1. Les sources thermique.....	10
1.6.2. Les systèmes optiques.....	10
1.6.3. Cellule thermo photovoltaïque.....	12
1.6.3.1. Généralités sur la cellule photovoltaïque.....	13
1.6.3.2. Systèmes de refroidissement des cellules.....	13
Chapitre 2 :la cellule thermophotovoltaïque et ses applications en conversion de l'énergie.	
2.1. Récupération de chaleur perdue par les systèmes thermophotovoltaïque.....	15
2.1.1. La chaleur fatale.....	15
2.1.2. Applications TPV dans l'industrie du fer et de l'acier.....	15
2.1.3. Applications TPV à base de cellules GaSb dans les systèmes de récupération de chaleur perdue.....	16
2.2. Description générale et illustration du système TPV cylindrique.....	21
2.2.1. Les composants des sources thermique.....	21

2.2.2. Les composantes des systèmes optiques.....	22
2.2.3. Les composantes des systèmes électrique.....	23
2.3. Défis et recommandations pour la mise en œuvre du système TPV sur le marché général.....	25
2.3.1. Non-concordance spectrale avec la bande interdite du matériau cellulaire TPV.....	25
2.3.2. L'effet de la température de la cellule photoélectrique.....	27
2.3.3. Rentabilité de la commercialisation des cellules TPV.....	28
2.3.4. Faible efficacité de conversion des cellules TPV.....	29
 Chapitre 3 : Modélisation et simulation de système TPV sur logiciel	
3.1. Conception et modalisation de système TPV.....	31
3.2. Etude de Modélisation et étape de Simulation des système TPV sur logiciel.....	31
3.2.1. Présentation de logiciel d'étude.....	31
3.2.2. Modélisation de la conception TPV.....	32
3.2.3. La géométrie et les dimensions des système d'étude.....	36
3.2.4. Les modèles mathématiques utilisés.....	37
 Chapitre 4 : Résultats et discussion	
4.1. Etude d'indépendance du maillage.....	40
4.2. Gestion thermique du système TPV avec refroidissement conductif – convectif.....	41
Conclusion et perspectives.....	47
Références bibliographiques.....	48

Liste des tableaux :

➤ **Chapitre 3 :**

Tableau 3.1. Les propriétés des matériels utilisés dans la simulation.....35

Tableau 3.2. Les paramètres utilisés dans la simulation.....35

➤ **Chapitre 4 :**

Tableau 4.1. Résultats de l'étude de sensibilité du maillage éléments finis.....40

Liste des figures :

➤ Chapitre 1 :

Fig.1.1. Schéma d'un système thermophotovoltaïque.....4

Fig.1.2. Schéma et principe de fonctionnement d'un système TPV7

Fig.1.3. (a) Historique de l'efficacité de certaines cellules TPV avec différents matériaux de cellule et **b)** principe de fonctionnement d'un système TPV de type plan.....8

Fig.1.4. Graphique du courant de sortie de la cellule (ligne rouge) et de la puissance (ligne bleue) en fonction de la tension.....9

Fig1.5. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....12

➤ Chapitre 2 :

Fig. 2.1. Image illustre la chaleur perdue des sites industrielle.....15

Fig. 2.2. Valorisation énergétique par application TPV dans la sidérurgie.....16

Fig.2.3. Etude expérimentale sur cellule GaSb TPV pour des applications de récupération de chaleur perdue.....17

Fig.2.4. Dépendance au débit de différentes températures de cellule photoélectrique GaSb pour une température de rayonnement de 1000 K - graphique de tension.....18

Fig.2.5. Effet du changement de température de la cellule GaSb sur le facteur de remplissage FF.....19

Fig.2.6. Effet du changement de température de la cellule sur l'efficacité de la photocellule GaSb.....20

fig.2.7. Échangeur de chaleur rotatif : principe de fonctionnement (a). Module brûleur avec échangeur de chaleur (b).....22

Fig.2.8. Image d'un émetteur thermique.....22

Fig.2.9. Système des cellules solaires en gallium antimonide GaSb.....23

Fig.2.10. Système thermophotovoltaïque complet alimenté par les combustibles fossiles.....	24
Fig.2.11. Les cellules TPV et la plage de température du corps noir de leurs performances optimales.....	26
Fig.2.12. Les pertes d'efficacité de conversion des cellules TPV.....	29
➤ <u>Chapitre 3 :</u>	
Fig. 3.1. Présentation de géométrie étudiée dans COMSOL Multiphysics.....	32
Fig.3.2. Caractéristiques géométriques du système TPV modélisé	36
Fig.3.3. Schéma d'un maillage triangulaire et grossier.....	39
➤ <u>Chapitre 4 :</u>	
Fig.4.1. Le réseau maillé aux éléments finis G4 sélectionné pour l'étude du modèle TPV à base de GaSb.....	41
Fig.4.2. Variations de la température, de l'efficacité et de la puissance de sortie maximale de la phot cellule GaSb à l'intérieur du système TPV en fonction du coefficient de transfert de chaleur convectif – conducteur.....	42
Fig.4.3. Distribution du gradient de l'amplitude du flux d'énergie total (W/m ²) le long d'un quart du système TPV à différentes valeurs $P_{max}/T_c/h_c$	44
Fig.4.4. Variations de la température de la cellule (a), de l'efficacité de la cellule (b), de la puissance de sortie de la cellule (c) et du facteur de forme (d) à différentes températures d'émetteur pour différents coefficients de transfert de chaleur.....	46

Nomenclature

Lettres normales :

P_{mp}, P_{max} : Puissance maximale (W/m^2)

P_{source} : Puissance de la source (W)

$P_{source,perte}$: Puissance perdue par de la source

$P_{radiant}$: Puissance de radiation

P_{gap} : Puissance du gap

$P_{gap,loss}$: Pertes de gap

P_{out} : Puissance de sortie

$P_{recuperat}$: Puissance récupérer

P_{ref} : Puissance réfléchie

P_{inc} : Puissance incident

Q_c : La chaleur totale absorbée et générée vers la cellule (W/m^3)

FF : Facteur de forme

V_{oc} : Tension en circuit ouvert (V)

I_{sc} : Intensité de courte circuit (A/m^2)

V_{mp} : Tension maximal (V)

I_{mp} : Intensité maximale (A/m^2)

E_g : Energie de la bande interdite (eV)

C_p : Chaleur spécifique (J/kg. K)

q : Flux de chaleur (W/m^2)

q_s : Flux de chaleur surfacique

k : Conductivité thermique ($W/(m.k)$)

n : L'indice de réfraction

h : Coefficient de transfert thermique (W/m^2K)

h_c : Coefficient de transfert thermique de l'eau de refroidissement

e_b : Puissance émissive du corps noir (W/m^2)

G : L'irradiance (W/m^2)

G_m : l'irradiation mutuelle de surface (W/m^2)

G_{amb} : L'irradiance ambient (W/m^2)

G_{ext} : L'irradiance extérieure (W/m^2)

T : Température (K)

T_{heater} : Température de l'émetteur

T_{cell} , **T_c** : Température de la cellule

T_{source} : Température de la source

T_{ref} : Température de l'eau de refroidissement

T_{ext} : Température extérieur

T_{amb} : Température ambient

J : La radiosité

F : Facteur de configuration

u : Le champ de vitesse (m/s)

Lettres grecques :

α : L'absorptivité

τ : La transmissivité

ρ : La densité ou la réflectivité (kg/m^3)

ε : L'émissivité

η_{TPV}, **η_{cell}** : Efficacité de la cellule TPV

λ_c : La longueur d'onde de la cellule photoélectrique (m)

λ_p : La longueur d'onde de photon (m)

Abréviation :

PV : Photovoltaïque

TPV : Thermophotovoltaïque

IR : Infra rouge

UV : Rayonnement UV-visible

Ge : Germanium

MIT : Laboratoire lincoln

NREL : Laboratoire national des énergies renouvelables

SiC : Carbure de silicium

TCO : Filtres à plasma à base d'oxydes conducteurs transparents

FSS : Filtres à surface sélective en fréquence

InAs : Arséniure d'indium

InAsPSb : Indium Arsenide Antimonide Phosphide

GaInAsSb : Gallium Indium Arsenide Antimonide

GaSb : Gallium Antimonide

MBE : L'épitaxie par faisceau moléculaire

ELOG : Croissance épitaxiale de dépassement latéral

2D : Deux dimension , **3D** : Trois dimension

Les constants :

σ : Constante de Stefan Boltzmann ($W/m^2 \cdot K^4$)

h : Constante de Planck (J. s)

Introduction générale :

Au cours des dernières décennies, la demande mondiale de l'énergie électrique augmente de façon rapide en raison de la croissance annuelle des secteurs de l'industrie, des transports du bâtiment et bien d'autres secteurs. Cependant les énergies non renouvelables comme la combustion des gaz, pétrole, charbon reste la principale source des énergies utilisés dans le monde. Panayiotou et al[1]. A estime qu'en 2017, l'industrie européenne a produit 370,41 TWh de chaleur perdue par an. Cette grande quantité de chaleur résiduelle a attiré l'attention mondiale sur l'impact environnemental et sur l'exploration d'une utilisation efficace de la chaleur résiduelle industrielle. Donc ces énergies non renouvelables à l'échelle de l'environnement restent comme un problème majeur. De plus, la communauté scientifique est confrontée au grand défi d'atteindre un équilibre durable entre la production économique d'énergie et la protection de l'environnement. Dans ce contexte, une nouvelle technologie qui convertit le rayonnement thermique en énergie électrique à l'aide de cellules photovoltaïques (TPV) a été étudiée et développée pour une production, une conversion et une conservation de l'énergie plus efficaces.

Ce système TPV est composé de quatre éléments principaux : un générateur offrant l'énergie thermique, un radiateur qui traduit l'énergie thermique en spectre d'émission, des filtres sélectifs optionnels et des réflecteurs (miroirs) pour la mise en forme appropriée du spectre de rayonnement et la réflexion des photons sous-bande et une phot cellule pour la conversion des photons en énergie électrique. Les cellules TPV représentent le cœur du système de conversion d'énergie, constitué de semi-conducteurs à faible bande passante capables de générer des paires électron-trou après avoir absorbé des photons de faible énergie avec des énergies supérieures à la bande interdite du semi-conducteur. Les cellules photovoltaïques GaSb avec une

faible bande interdite de 0,72 eV peuvent convertir efficacement la plupart du rayonnement filtré émis par les émetteurs à large bande. Les radiateurs TPV adaptés au photovoltaïque à bande étroite sont caractérisés par le carbure de silicium (SiC), qui a une bande interdite minimale de 2 eV et établit une émission spectrale dans la plage de longueurs d'onde longues à des températures de 1000 à 2000 K. Pour cela en va décrire tout ça dans les chapitres suivants :

Le premier chapitre donne un aperçu général sur la thermophotovoltaïque et le mécanisme de conversion des cellules TPV. A ce titre, nous avons insisté sur la définition de la cellule thermophotovoltaïque aussi que ses paramètres (efficacité, courant de court-circuit, tension en circuit ouvert, facteur de forme), et nous terminons par la définition du système de refroidissement.

Le deuxième chapitre est consacré à la description du système TPV cylindrique et son application dans les industries pour la récupération de l'énergie perdue sous forme chaleur. Aussi, nous avons abordé les défis et recommandations pour la mise en œuvre du système TPV sur le marché général.

Dans **le troisième chapitre** nous avons présenté le logiciel COMSOL Multiphysique et les méthodes d'optimisations et de simulation utilisées pour étudier ce système TPV. Et nous avons établi une corrélation entre l'efficacité et la température de la cellule en effectuant un ajustement polynomial de 3^{ème} ordre avec le logiciel OriginPro 8.

Le quatrième chapitre, est une présentation finale des résultats obtenus par la simulation et leurs interprétations. Une première partie est consacrée à l'étude l'indépendance de maillage pour un but d'établir une taille optimale du maillage d'éléments finis qui conduirait à des résultats suffisamment précis. Dans une deuxième partie de l'étude, nous avons étudié la gestion thermique du système TPV

avec refroidissement conductif-convectif. **Enfin**, le manuscrit se termine par une conclusion générale, avec un résumé des principaux résultats et des perspectives.

Chapitre 1 :

Généralités sur la thermophotovoltaïque.

1.1. Introduction :

Une cellule thermophotovoltaïque (TPV) est un dispositif à semi-conducteur qui fonctionne de la même manière que les cellules photovoltaïques solaires[2]. Ces dispositifs au lieu de capter les rayonnements solaires de la gamme spectrale UV, captent les rayonnements infrarouge IR émis par un émetteur thermique[3]. Cela permet aux TPV d'être alimentés par différentes sources de chaleur et d'être utilisé dans plusieurs domaines de la vie quotidienne comme :

- ✚ Dans les centrales nucléaires et les centrales pétrolière (récupérer la chaleur perdue par la combustion).
- ✚ Dans les procédés industriels à haute température.
- ✚ Dans le domaine des conversions thermiques (généralement dans la biomasse et l'énergie solaire)[4].

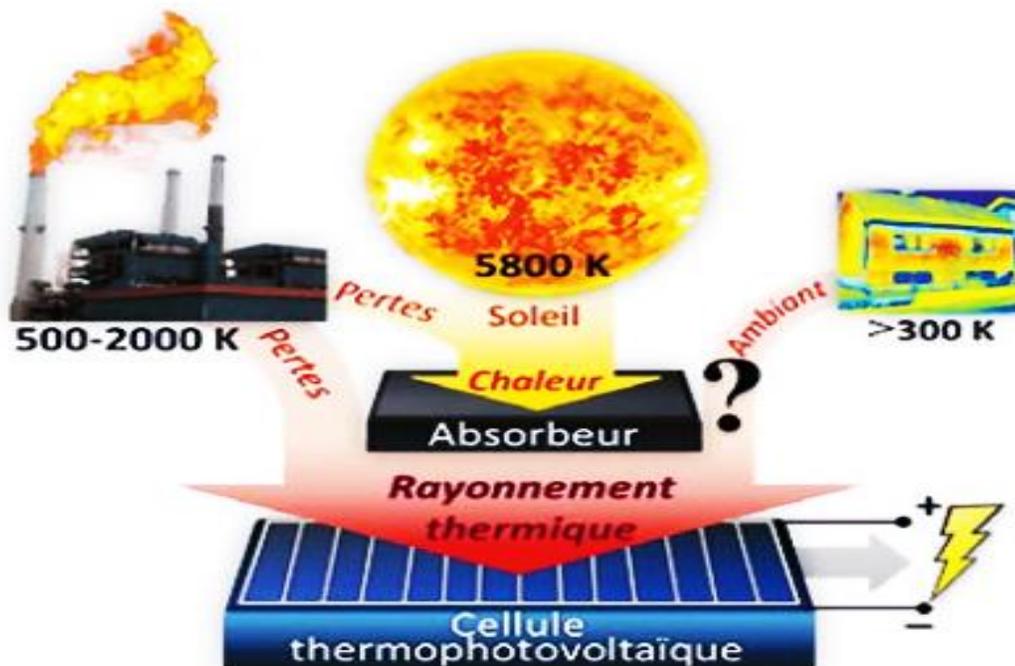


Fig.1.1. Schéma d'un système thermophotovoltaïque[5].

1.2. Histoire de la thermophotovoltaïque :

La découverte de la conversion thermophotovoltaïque est passé par diverses étapes :

- ✚ L'invention du TPV remonte environ à 1956 où Dr Henry H, Kolm du Lincoln MIT (Laboratory for Manufacturing and productivity) (Lexington, MA) a construit un système TPV élémentaire. Certaines références bibliographiques citent le Professeur Pierre Aigrain comme l'inventeur du TPV, qui a proposé le concept lors d'une série de conférences au MIT en 1956.
- ✚ Les professeurs Wedlock et Gray[7] ont avancé dans le domaine et basé sur le développement des cellules au Ge.
- ✚ Au début de 1960, Dr Emil Kittl et le Dr Guido Guazzoni [6] ont avancé dans l'étude de cette technologie. Le Dr Guazzoni [7]est le premier qui à signaler l'émetteur à haute température.
- ✚ Au milieu des années 1970 [6]. Le rythme de développement du TPV a été ralenti car l'armée américaine a choisi la technologie thermoélectrique pour satisfaire ses besoins énergétiques.
- ✚ Dans les années 1980, la recherche TPV était très lente. En raison du manque de financement[6].
- ✚ Depuis le début des années 1990, des programmes de recherche sur le TPV ont démarré aux États-Unis et particulièrement au NREL (National Renewable Energy Laboratory)[7].
- ✚ En Europe, les trois dernières conférences internationales sur les TPV ont eu lieu à Rome (2002), Fribourg (2004) et Madrid (2006).

Au cours des dernières années, le développement du TPV semble ralentir à la fois aux États-Unis et en Europe, à cause d'avancement des autres sources d'énergie et des technologies de conversion[7].

1.3. Fonctionnement physique des système TPV :

Le principe fondamental du fonctionnement du système thermophotovoltaïque est basé sur l'échauffement d'un corps solide jusqu'à sa longueur d'onde de la bande d'émission des rayonnements IR atteindra à la longueur d'onde de la bande de l'efficacité quantique maximale des cellule PV[8]. Généralement le système TPV doit convertir l'énergie thermique émis, par un générateur en électricité. Pour cela, ce système doit comprendre un générateur, un radiateur, un filtre et un réseau de cellules TPV (**Figure 1.2**). Le générateur doit produire de l'énergie à partir de différentes sources de chaleur (P_{source}) vers un radiateur avec une certaine perte de chaleur ($P_{\text{source,perde}}$). Autrement dit, le radiateur va émettre des rayonnements sous forme ($P_{\text{rayonnante}}$) vers les cellules PV via un système optique (filtre). L'énergie rayonnée sera filtrée et doit dépasser la bande interdite des cellules PV avec une puissance de la bande interdite (P_{gap}), certains pertes ($P_{\text{gap,perde}}$) sont induites par les photons avec des énergies inférieures à la bande interdite des cellules PV.

Ensuite le radiateur va récupérer ces photons ($P_{\text{récupérer}}$) pour conserver la chaleur et réduire la puissance de la source (P_{source}) à la température requise du radiateur. Finalement, la puissance de sortie (P_{sortie}) doit être mesurée et distribuée aux réseaux[9].

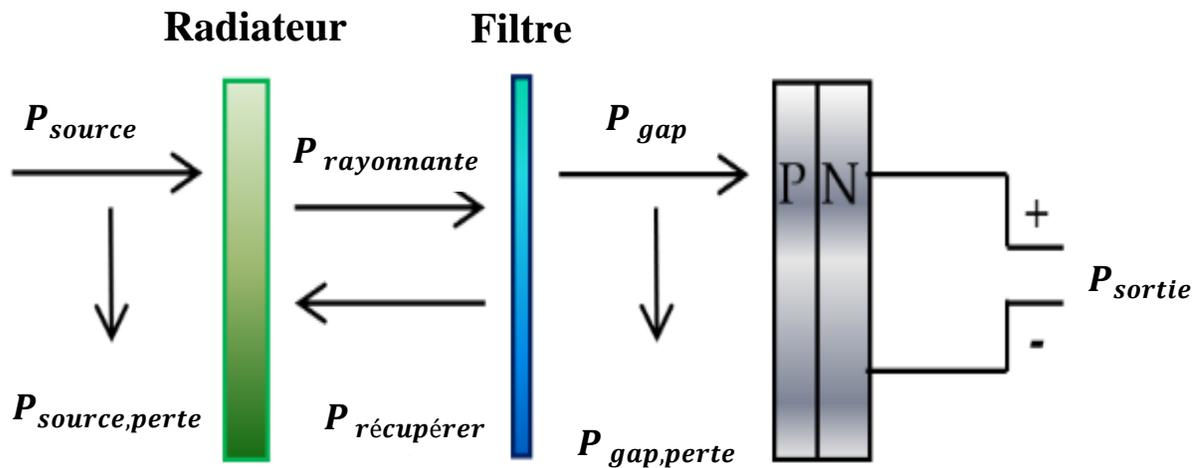


Fig.1.2. Schéma et principe de fonctionnement d'un système TPV[9].

1.4. L'efficacité des système TPV :

L'efficacité d'une cellule TPV est différente de celle d'une cellule solaire conventionnelle. Car, les systèmes TPV peuvent conserver et convertir directement l'énergie absorber en photons de sous-bande interdite. En effet, dans les cellules TPV envisagent d'être utilisé à un facteur de vue élevé vers l'émetteur. Qui signifie que les photons de sous-bande interdite peuvent être réfléchis par la cellule TPV vers l'émetteur (**Figure 1.3.b**), qui est différente d'une cellule solaire. En réfléchissant les photons non convertis, l'énergie lumineuse du sous-gap est réabsorbée par l'émetteur. Cette énergie lumineuse est réfléchi et réabsorbée, pour maintenir l'émetteur chaud, minimisant l'apport d'énergie nécessaire pour chauffer l'émetteur. En conséquence, l'efficacité est donnée par[10] :

$$\eta_{\text{TPV}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + Q_c} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{inc}} - P_{\text{ref}}} \quad (1.1)$$

Dans l'équation (1.1), P_{out} est la puissance électrique générée par la cellule TPV (c'est-à-dire $P_{\text{out}} = V_{\text{oc}} I_{\text{sc}} FF$), d'où V_{oc} est la tension de circuit ouvert, I_{sc} est

le courant de court-circuit et FF le facteur de forme du courant– courbe de tension $I(V)$. La chaleur totale absorbée et générée vers la cellule est notée Q_c , qui est constituée de la chaleur générée par l'absorption parasite dans le semi-conducteur ou le réflecteur métallique, des pertes de thermalisation dues à l'excès d'énergie photonique incidente, aussi des pertes d'échauffement Joule dues au passage du courant et non pertes de recombinaison radiative. L'énergie nette reçue par la cellule est équivalente à $P_{out} + Q_c$ et peut être exprimée sous la forme $P_{inc} - P_{ref}$, où P_{inc} est l'énergie incidente et P_{ref} est l'énergie réfléchiée. Dans l'équation (1.1), pour augmenter l'efficacité du TPV, il faut d'abord augmenter la puissance de sortie P_{out} et/ou réduire la quantité de chaleur absorbée et générée dans la cellule Q_c . L'efficacité d'un système complet impliquant des TPV sera inférieure à η_{TPV} en raison des pertes spécifiques au système.

La puissance électrique et la chaleur perdue sont deux paramètres qui doivent être mesurés [11] [12] [13].

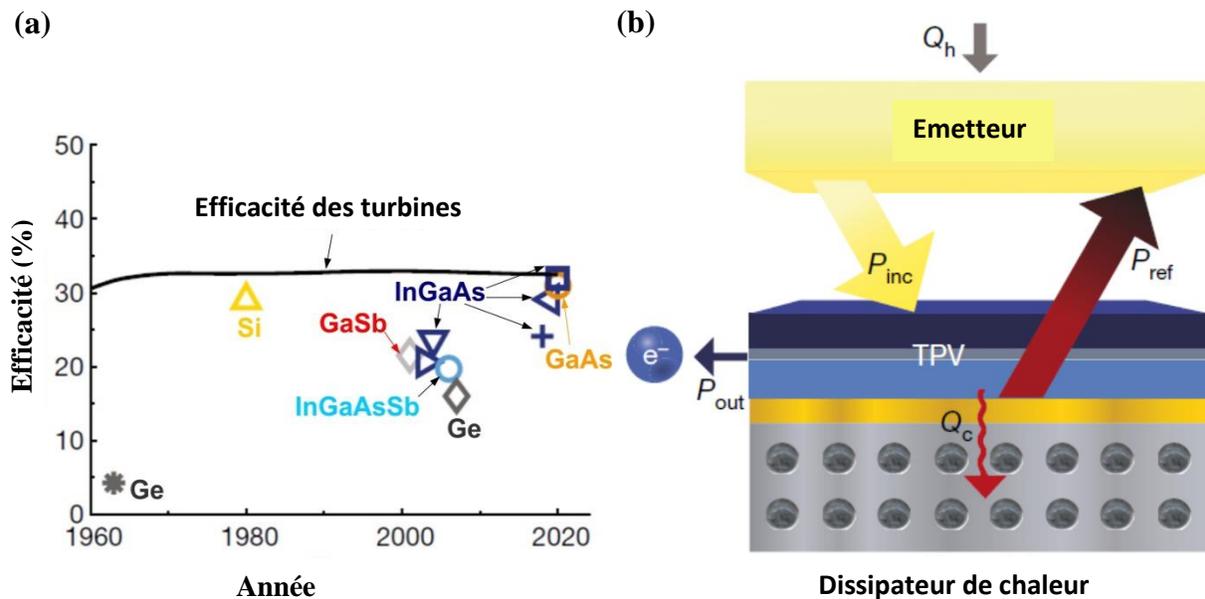


Fig.1.3. (a) Historique de l'efficacité de certaines cellules TPV avec différents matériaux de cellule, (b) principe de fonctionnement d'un système TPV de type

plan, tel que l'énergie incidente sur les TPV (P_{inc}) doit être convertie en électricité (P_{out}). (P_{ref}) est l'énergie réfléchiée vers l'émetteur ou thermalisée à cause des inefficacités de la cellule et du réflecteur arrière (Q_c)[10].

1.5. Facteur de forme (FF) pour les cellules thermophotovoltaïques :

Le "facteur de forme", plus communément appelé par son abréviation "FF", est un paramètre qui, associé à V_{oc} et I_{sc} , détermine la puissance maximale d'une cellule solaire. Le FF est défini comme le rapport de la puissance maximale de la cellule solaire au produit de V_{oc} et I_{sc} de sorte que[11]:

$$FF = \frac{P_{mp}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (1.2)$$

Graphiquement, le FF est une mesure de "l'équerrage" de la cellule solaire et est également l'aire du plus grand rectangle qui s'adaptera à la courbe I(V). Le FF est illustré ci-dessous dans **la Figure 1.4**.

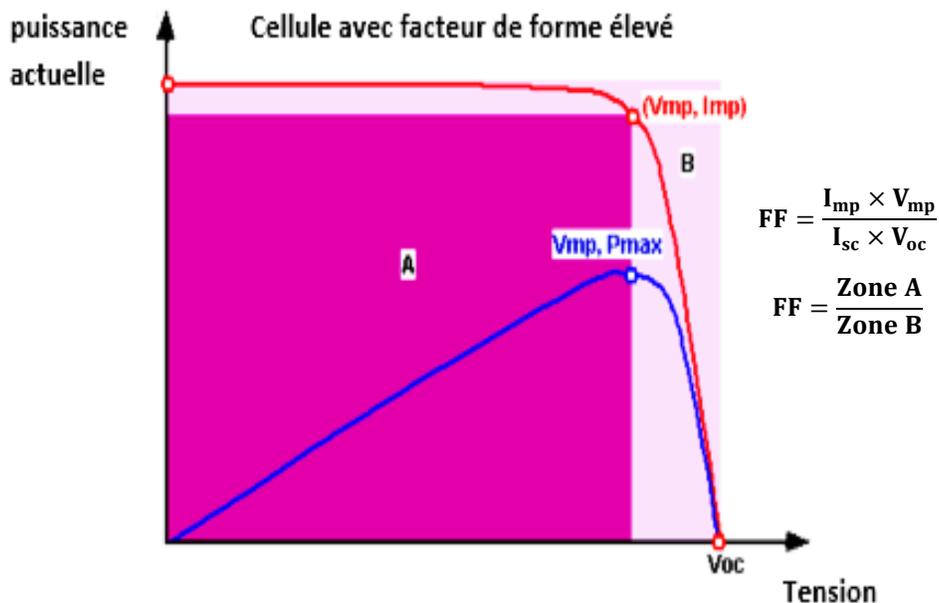


Fig.1.4. Graphique du courant de sortie de la cellule (ligne rouge) et de la puissance (ligne bleue) en fonction de la tension. Sont également indiqués les points de

courant de court-circuit (I_{sc}) et de tension de circuit ouvert (V_{oc}) de la cellule, ainsi que le point de puissance maximale (V_{mp}, I_{mp})[11] .

1.6. Composante des systèmes TPV :

Les différentes parties des systèmes TPV sont :

1.6.1. Les sources thermiques :

La technologie TPV a la possibilité d'utiliser différentes sources de chaleur pour chauffer l'émetteur. L'essentiel est que la température soit suffisamment élevée entre 1000 K et 2000 K pour la conversion TPV. Pour cela plusieurs études sont proposées et basées sur différentes sources de chauffage conventionnelles et non conventionnelles, parmi les sources de chauffage non conventionnelles citons :

- ✚ TPV des combustibles nucléaires[14],
- ✚ TPV biocarburants[15],
- ✚ TPV solaire[16],

Pour les sources de chauffage conventionnelles citons :

- ✚ TPV a carburant [17],

1.6.2. Les systèmes optiques :

L'intérêt des systèmes optiques est de générer, absorber et transmettre les rayonnements thermiques aux cellules. Donc le contrôle spectral est une partie fondamentale dans les systèmes TPV. Son rôle est de récupérer la partie du spectre de rayonnement qui ne peut pas être convertie en énergie électrique par les cellules. Des surfaces réelles qui ne se comportent pas comme un corps noir sont basse pour le choix des rayonnements. Autrement dit pour déterminer les propriétés de ces surfaces réelles, certaines grandeurs seront utilisées comme : l'absorptivité α , la transmissivité τ et la réflectivité ρ qui représentent respectivement la fraction de l'irradiation absorbée, transmise et réfléchi par la surface. Sans oublier l'émissivité

ε qui se définit par le rapport des rayonnements émis sur les rayonnements émis par un corps noir à la même température selon la relation :

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (1.3)$$

Ce system optique[18] doit comporter généralement :

✚ **Un émetteur** : il existe deux. Types d'émetteurs :

-les émetteurs sélectifs qui sont des émetteurs qui présentent théoriquement une bande interdite étroite avec des valeurs d'émissivité élevées uniquement en correspondance de la bande interdite de la cellule TPV.

-les émetteurs à large bande qui ont une émissivité élevée sur tout le spectre de rayonnement. Dans la technologie des émetteurs les matériaux utilisés sont soit des céramiques, soit des métaux. Le matériau le plus utilisé est le carbure de silicium (SiC), à cause de son émissivité élevée qui se situe autour de 0,9 sur l'ensemble du spectre.

✚ **Un filtre** : généralement il ne transmet que les photons d'énergie supérieure à la bande interdite de la cellule TPV, en réfléchissant le reste du rayonnement. A cause de sa faible bande interdite dans le cas général, le filtre peut être placé entre l'émetteur et les cellules ou directement déposé sur la face avant des cellules. Fondamentalement, les filtres pour TPV sont divisés en quatre catégories différentes : Verre de quartz ; filtres interférentiels (ou diélectriques) ; Filtres à plasma à base d'oxydes conducteurs transparents (TCO) ; Filtres à surface sélective en fréquence (FSS).

✚ **Une couche Antireflet** : elle est déposée sur la face avant des cellules. Son rôle est de réduire le nombre de photons convertibles réfléchis par les cellules.

- ✚ **Un réflecteur cellule de surface arrière** : il s'agit d'une couche en or, utilisée pour renvoyer les photons vers l'émetteur qui traverseraient les cellules[19] [20] [21] [22].

1.6.3. Cellule thermophotovoltaïque :

1.6.3.1. Généralités sur la cellule photovoltaïque :

il est important de connaître le fonctionnement de la cellule photovoltaïque basée sur l'effet photovoltaïque ou effet photoélectrique, découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839 qui vise la conversion de photons en courant électrique par une jonction PN, réalisée sur la base d'un matériau semi-conducteur[23]. Généralement, ces matériaux doivent absorber des photons lumineux et générer des électrons. Ces électrons migrent de la bande de valence vers la bande de conduction en produisant un courant électrique par la génération de paires électrons-trous[24]. Ce courant électrique était, distribué au réseau[25].

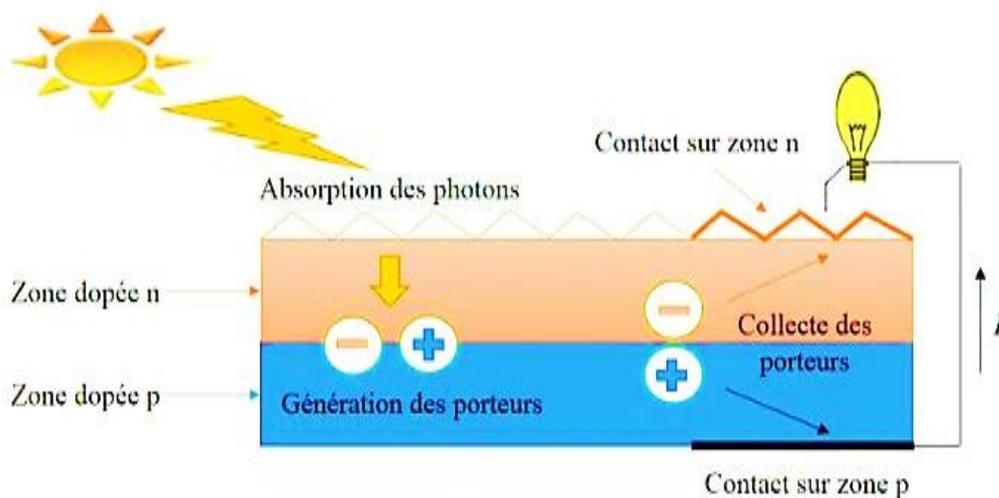


Fig.1.5. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque[26].

1.6.3.2. Différents types de cellules :

Les cellules utilisées pour les applications TPV sont classées en cellules à bande interdite élevée, moyenne et faible :

Cellules à bande interdite élevée :

Ce sont des cellules à base de silicium avec une bande interdite de 1.1 eV. Ces cellules sont très disponibles sur le marché, ont un rendement limité et nécessitent une température très élevée. Ces cellules ne sont pas considérées pour les applications TPV.

Cellules à bande interdite moyenne :

Ces cellules sont les plus étudiées pour les applications TPV. Leur bande interdite est de 0.7 eV. Dans le cas d'un corps noir à 1600 K cette bande interdite correspond à la longueur d'onde du pic de spectre. C'est le cas de la cellule en GaSb qui a été considérée comme élément des systèmes TPV dans notre thème.

Cellules à bande interdite faible :

Ces cellules sont réalisées à base d'alliages semi-conducteurs quaternaires tels que : GaInAsSb sur substrat InAs et InAsPSb sur substrat GaSb ou InAs. Ces cellules ont une bande interdite de 0.5 eV et sont réalisées pour les études à basse température [27] [28] [29] [30].

1.6.3.3. Systèmes de refroidissement des cellules :

Dans le fonctionnement des systèmes TPV, certains rayonnements qui sont ni réfléchis ni convertis en énergie électrique sont absorbés comme une charge thermique par les cellules. Donc pour un bon fonctionnement du système TPV, on doit utiliser un dissipateur thermique pour diminuer la température des systèmes. Généralement, les cellules à haute température sont moins performantes et exposées à des risques d'endommagement et de dégradation. Ce dissipateur en aluminium ou en cuivre est refroidi par air ou par eau. Un autre aspect critique dans la gestion

thermique des cellules TPV est de réaliser un bon contact thermique entre le dissipateur thermique et les cellules, autrement le substrat du dissipateur thermique doit avoir une conductivité thermique élevée et aussi doit être en même temps un bon isolant électrique pour éviter le court-circuit des contacts arrière de la cellule[31].

Chapitre 2

La cellule thermophotovoltaïque et ses applications en conversion de l'énergie

2.1. Récupération de chaleur perdue par les systèmes thermophotovoltaïques :

2.1.1. La chaleur fatale :

La chaleur fatale est la chaleur perdue ou la chaleur résiduelle produite par un procédé industriel[32], par exemple une usine de traitement des déchets ou industrie de pétrole. La récupération de cette chaleur consiste à valoriser la chaleur fatale. Généralement, une énergie thermique sera produite dans l'atmosphère. Cette énergie doit être récupérée pour produire de l'électricité ou pour l'utiliser dans le chauffage[33].



Fig. 2.1. Image illustre la chaleur perdue des sites industriels[34].

2.1.2. Applications TPV dans l'industrie du fer et de l'acier :

Etant donné que le TPV est une technologie qui nécessite une source de chaleur à haute température, il peut être utilisé dans les industries qui exécutent de tel processus. La simple application du TPV est la récupération de la chaleur perdue dans les industries à haute température comme l'industrie du verre ou de l'acier. Un

exemple de récupération de la chaleur résiduelle par ces cellules TPV est la coulée continue de tôles d'acier laminées à chaud dans l'industrie sidérurgique. Ces plaques d'acier laminées sont refroidies à une température de 1200°C. Si les cellules TPV doivent être placées sur ces plaques chauffantes pendant le processus de refroidissement, un courant électrique peut être généré par le processus d'émission. **La Figure 2.2**, montre une image schématique de la conversion d'énergie lorsque le système TPV est appliqué dans l'industrie sidérurgique[35].

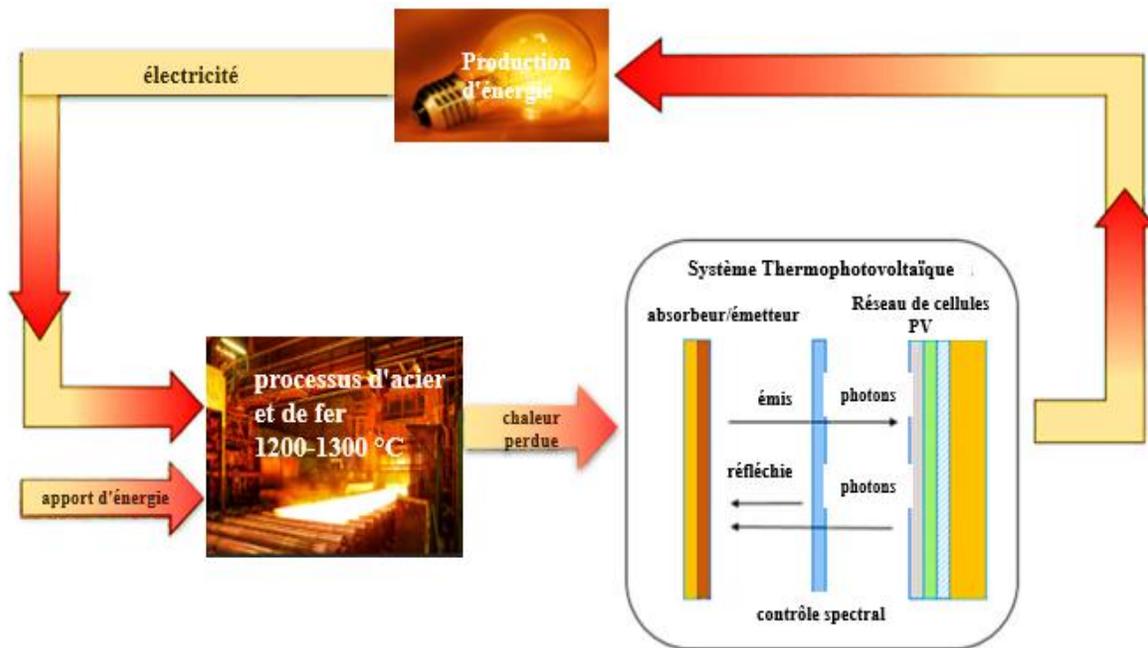


Fig. 2.2. Valorisation énergétique par application TPV dans la sidérurgie[35].

2.1.3. Applications TPV à base de cellules GaSb dans les systèmes de récupération de chaleur perdue :

Les voies de récupération de la chaleur résiduelle peuvent varier en fonction de l'industrie. Les voies de récupération de la chaleur résiduelle comprennent les échangeurs de chaleur, les récupérateurs, les chaudières, les réchauffeurs d'air passifs, les régénérateurs et les économiseurs[36] [37]. Les échangeurs de chaleur

sont souvent utilisés pour transférer les gaz d'échappement vers l'air de combustion entrant dans le four. Les récupérateurs sont des échangeurs de chaleur où la chaleur résiduelle des gaz de combustion est transférée à l'air de combustion. Les chaudières à chaleur résiduelle sont placées devant les gaz chauds et l'eau est chauffée en utilisant l'énergie des gaz chauds résiduaux.

Dans le cadre de l'analyse des systèmes de récupération de la chaleur perdue, une structure de cellule solaire TPV à cellule GaSb appliquée aux conditions de laboratoire avec chaleur perdue à haute température a été conçue par Z.Utlu[38], avec la configuration du système TPV indiquée sur **la Figure 2.3**.

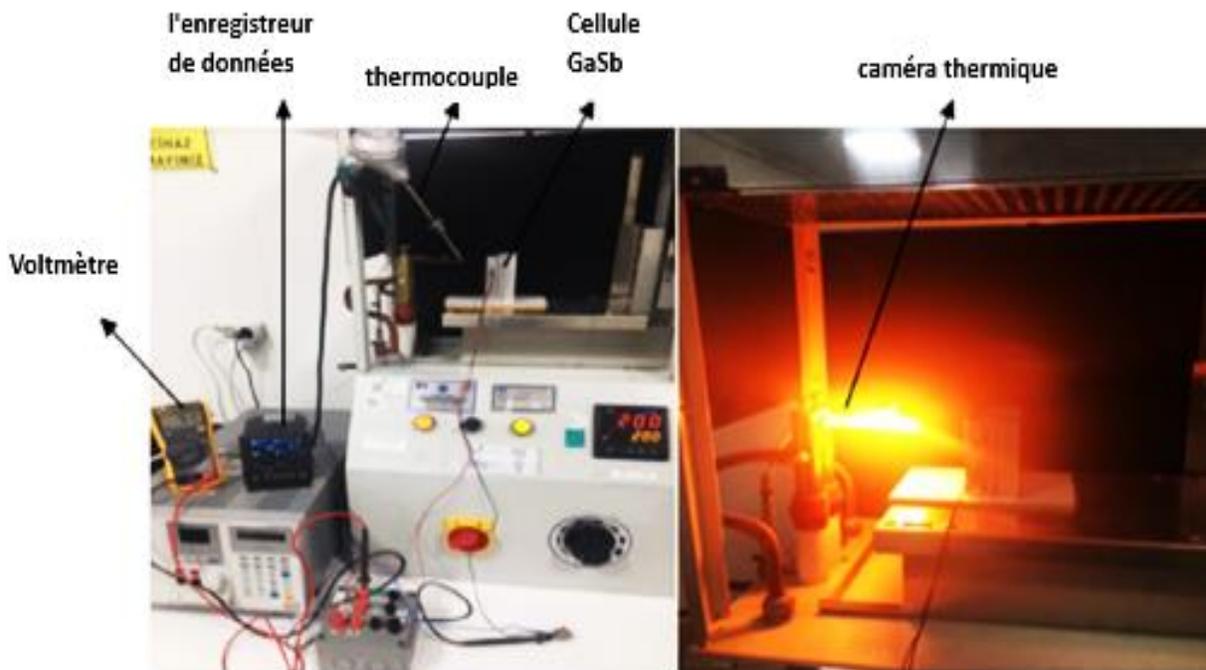


Fig.2.3. Etude expérimentale sur cellule GaSb TPV pour des applications de récupération de chaleur perdue[38].

Des représentations graphiques des paramètres de base par rapport à la température de la cellule, tels que la tension en circuit ouvert (V_{oc}), le courant de court-circuit (I_{sc}), le facteur de forme (FF) et les valeurs d'efficacité de conversion

d'énergie (η), sont présentées à la **Figure. 2.4. – 2,6**[38]. Dans une analyse expérimentale d'un système TPV de cellule GaSb installé dans des conditions de laboratoire, les valeurs d'efficacité ont été calculées tandis que les valeurs de température de la source de rayonnement ont été acquises par incréments de 250 K entre 500 et 3000 K. Les valeurs de température de la batterie sont prises de 300 à 400 K par pas de 25 K. 21,58 % à $T_{\text{source}}= 2500$ K et $T_{\text{cell}} = 300$ K, comme le montre la **Figure 2.6**.

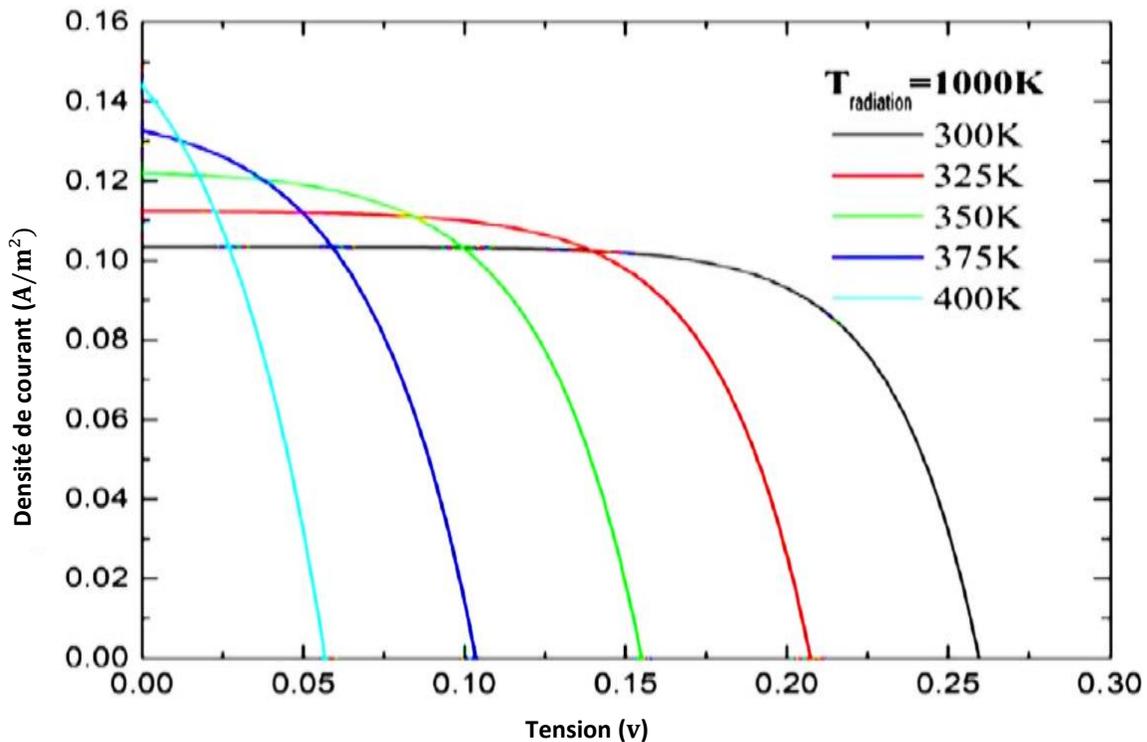


Fig.2.4. Dépendance au débit de différentes températures de cellule photoélectrique GaSb pour une température de rayonnement de 1000 K - graphique de tension[38].

À une température de chauffage de 1000 K, on observe que les densités de courant en fonction des valeurs de tension changeantes à différentes températures de cellule. Tel que, pour une température de cellule de 350 K, lorsque la valeur de

tension est de 0,05 V, la densité de courant est de 0,12 A/m², et lorsque la valeur de tension augmente vers 0,12 V, la densité de courant chute à 0,08 A/m². À une température de source de 300 K, lorsque la valeur de tension est de 0,10 V, la densité de courant est de 0,10 A/m², et quand la valeur de tension est de 0,25 V, la densité de courant chute à 0,04 A/m². Dans ce cas, lorsque la tension augmente, la densité de courant diminue.

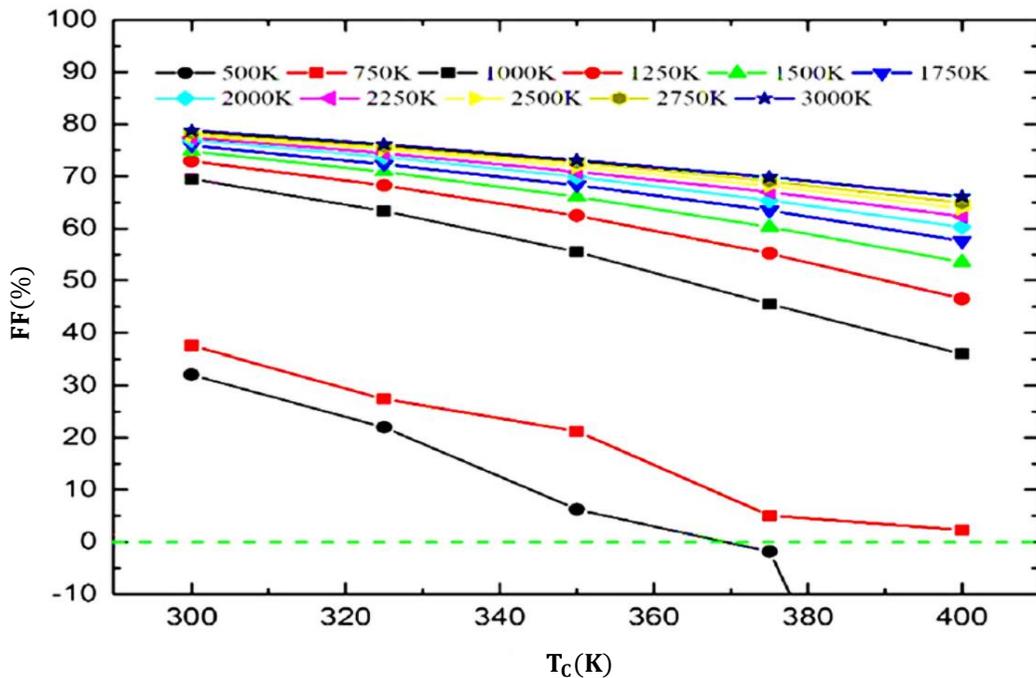


Fig.2.5. Effet du changement de température de la cellule GaSb sur le facteur de forme FF[38].

La Figure 2.5 consiste l'effet du changement de température de cellule sur le facteur de forme. On observe que lorsque la température de la cellule est de 300 K à une température de chauffage égal a 1 000 K, le facteur de forme est d'environ 70 %, tandis que lorsque la température de la cellule est de 400 K, on observe que le facteur de forme est d'environ 40 %. Dans ce cas, on dit que la température de la cellule augmente et le facteur de forme FF diminue.

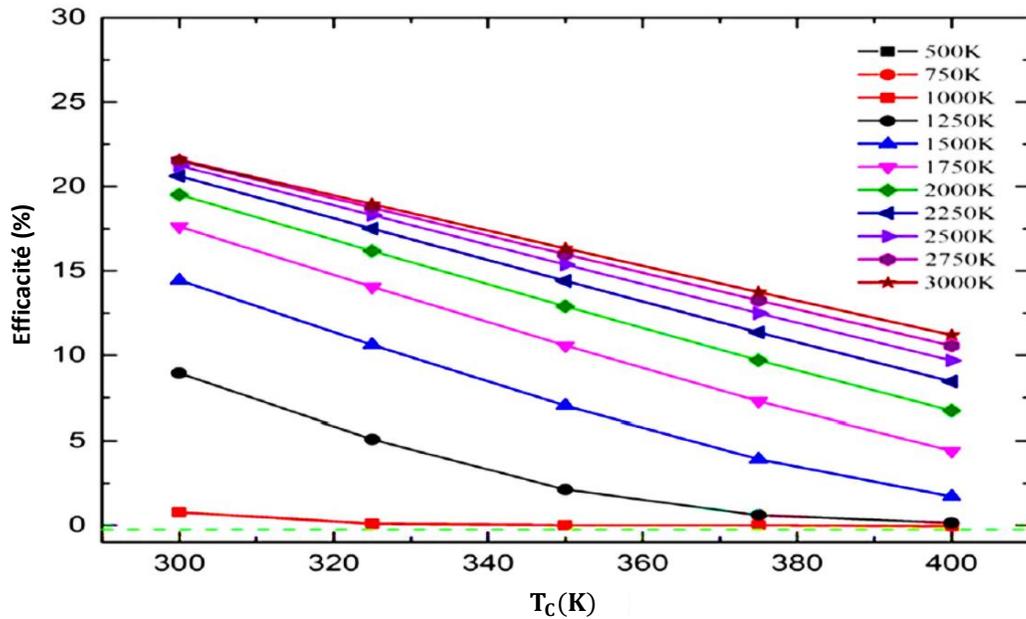


Fig.2.6. Effet du changement de température de la cellule sur l'efficacité de la photocellule GaSb[38].

La Figure 2.6 comprend l'effet du changement de température de la cellule sur l'efficacité. Par exemple, lorsque la température de la cellule est de 300 K à une température de source de 1 000 K, l'efficacité énergétique est d'environ 1,5 %. L'efficacité du système a la valeur la plus élevée à basse température de cellule et à haute température de rayonnement dans les mêmes conditions

Deux types de structures de système TPV sont généralement proposés pour des applications pratiques : une structure TPV plane, facile à mettre en œuvre mais son facteur de vue faible, et une TPV cylindrique avec un facteur de vue proche de l'unité[39]. Le système TPV cylindrique contient généralement huit ou dix cellules PV entourant l'émetteur dans toutes les directions, avec un circuit de refroidissement à base d'eau pour minimiser les températures des cellules TPV[39] [40].

2.2. Description générale et illustration du système TPV cylindrique :

Le système de récupération TPV consiste à conserver la chaleur perdue par les sites industriels en électricité. Dans notre pays on peut considérer l'industrie pétrolière de SONATRACH (RAFFINERIE D'ARZEW) comme exemple d'étude des système TPV. D'après notre recherche sur les systèmes TPV on peut généralement alimenter ce site par cette technologie de conversion de chaleur en électricité sans oublier le deuxième aspect de la production de l'eau chaude.

2.2.1. Les composants des sources thermique :

Dans le système TPV-carburant, le brûleur fourni une puissance thermique, ce dernier est couplé à un échangeur de chaleur afin de récupérer l'enthalpie des gaz d'échappement à haute température et de préchauffer l'air. le combustible entrant dans l'appareil qui permet d'augmenter la température dans la chambre de combustion qui doit être générer vers l'émetteur[41] [42].

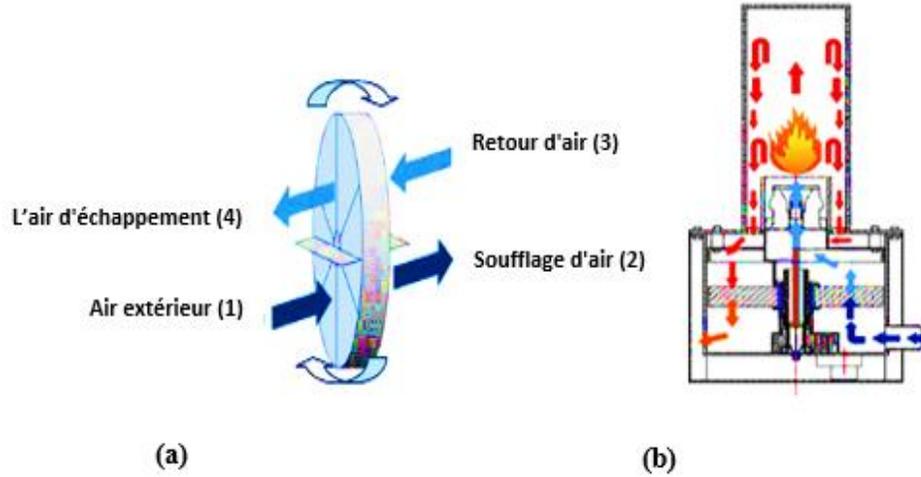


Fig.2.7. Échangeur de chaleur rotatif : principe de fonctionnement (a). Module brûleur avec échangeur de chaleur (b)[43].

2.2.2. Les composantes des systèmes optiques :

Dans la partie des systèmes optique, nous utilisons un émetteur thermique comme montre **la Figure.2.8** qui doit être chauffé à une température de 1000 K jusqu'à 2000 K. Cette composante est utilisée pour émettre la chaleur sous forme des rayonnements infrarouge IR vers les cellules photovoltaïques.



Fig.2.8. Image d'un émetteur thermique[44] [45].

2.2.3. Les composants des systèmes électrique :

Dans la partie du système électrique, on utilise un dispositif photovoltaïque pour convertir les rayonnements infrarouge IR générés par l'émetteur en courant électrique. Dans notre étude, on utilise la cellule à base de GaSb [46].

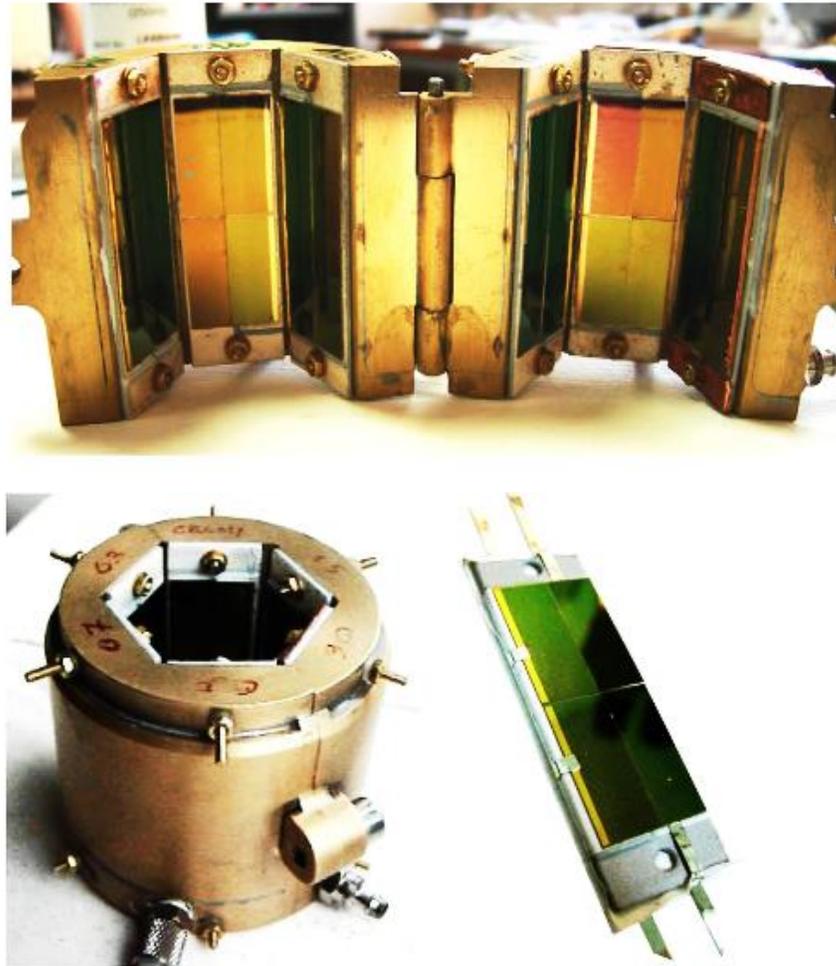


Fig.2.9. Système des cellules solaires en gallium antimonide GaSb [46].

Finalement, on assemble les différentes composantes du système, on obtient le système illustré dans **la Figure. 2.10** :

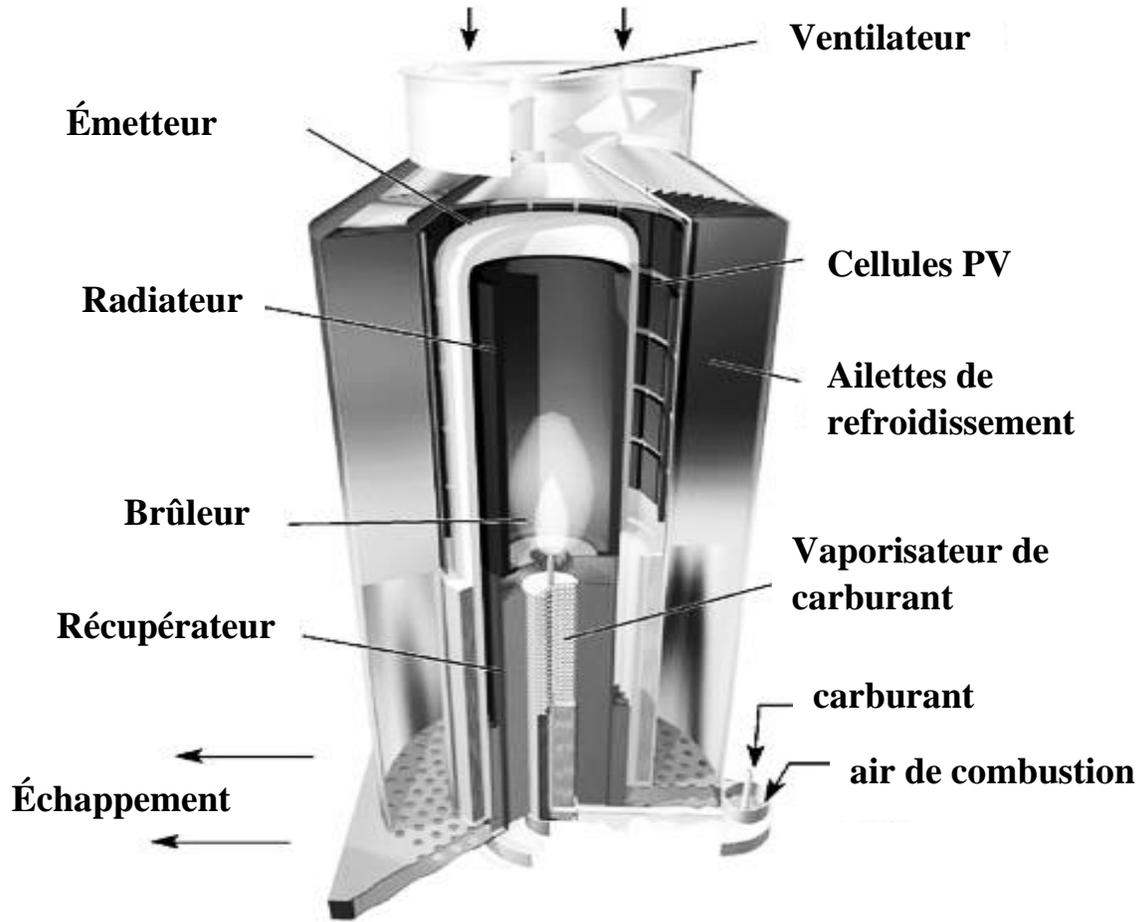


Fig.2.10. Système thermophotovoltaïque complet alimenté par les combustibles fossiles[47].

Dans ce système la combustion va se faire dans la chambre de combustion. Généralement, une énorme chaleur est générée par un échangeur de chaleur et piégée dans l'émetteur. Cet émetteur va se chauffer à une température de 1000 K jusqu'à 2000 K et émettre cette chaleur sous forme de rayonnement infrarouge IR vers les dispositifs thermophotovoltaïques pour le convertir en courant électrique. Ce système est refroidi par un circuit de refroidissement qui contient un fluide comme l'eau. Finalement, nous répondons à nos besoins en alimentation de notre site par un courant électrique et l'obtention de l'eau chaude. Cela permet de minimiser le besoin énergétique et aussi de réduire l'émission des gaz dans l'atmosphère.

2.3. Défis et recommandations pour la mise en œuvre du système TPV sur le marché général :

La pénétration du marché du système TPV reste peu concluante en raison des grands défis rencontrés tout au long de son développement technologique. Au cours des dix prochaines années, la technologie TPV devrait devenir stable sur le plan technologique, de sorte qu'elle soit capable de produire une puissance de sortie élevée pour la production de l'électricité dans la future. Dans cette partie, les problèmes et les défis de la technologie TPV sur le système TPV global, les cellules TPV à base de GaSb et InGaAs sont largement discutés, ainsi que quelques recommandations pour surmonter les défis.

2.3.1. Non-concordance spectrale avec la bande interdite du matériau cellulaire TPV :

En principe, les cellules TPV fonctionnent avec une efficacité optimale lorsque la bande interdite d'énergie du semi-conducteur est adaptée spectralement au spectre du corps noir généré par la source de chaleur. Par conséquent, les matériaux pour les cellules TPV doivent être sélectionnés en fonction de la bande interdite correspondant au spectre, qui correspond au spectre. Ceci afin de minimiser la perte optique causée par le décalage spectral et la mauvaise absorption des photons par les cellules TPV.

La conversion d'électricité se produit effectivement à des longueurs d'onde de photons proches de la longueur d'onde de la cellule photoélectrique λ_c d'un certain matériau. supposant que on obtient la conversion photon-électricité la plus élevée lorsque λ_c est approximativement similaire à λ_p , la température de fonctionnement appropriée en fonction de l'énergie de la bande interdite peut être exprimée par l'équation suivante[9]:

$$\lambda_c \approx \lambda_p \frac{hc}{E_g} \approx \frac{2900}{T_{BB}} T_{BB} \approx \frac{2900}{1.240} * E_g \quad (2.1)$$

D'où :

E_g : l'énergie de gap c : vitesse de la lumière
 T_{BB} : Température h : Constant de Planck

Dans cette étude, la température de fonctionnement appropriée pour un matériau particulier est suggérée à +/- 10 % de λ_p , comme illustré sur la **Figure 2.11**[9].

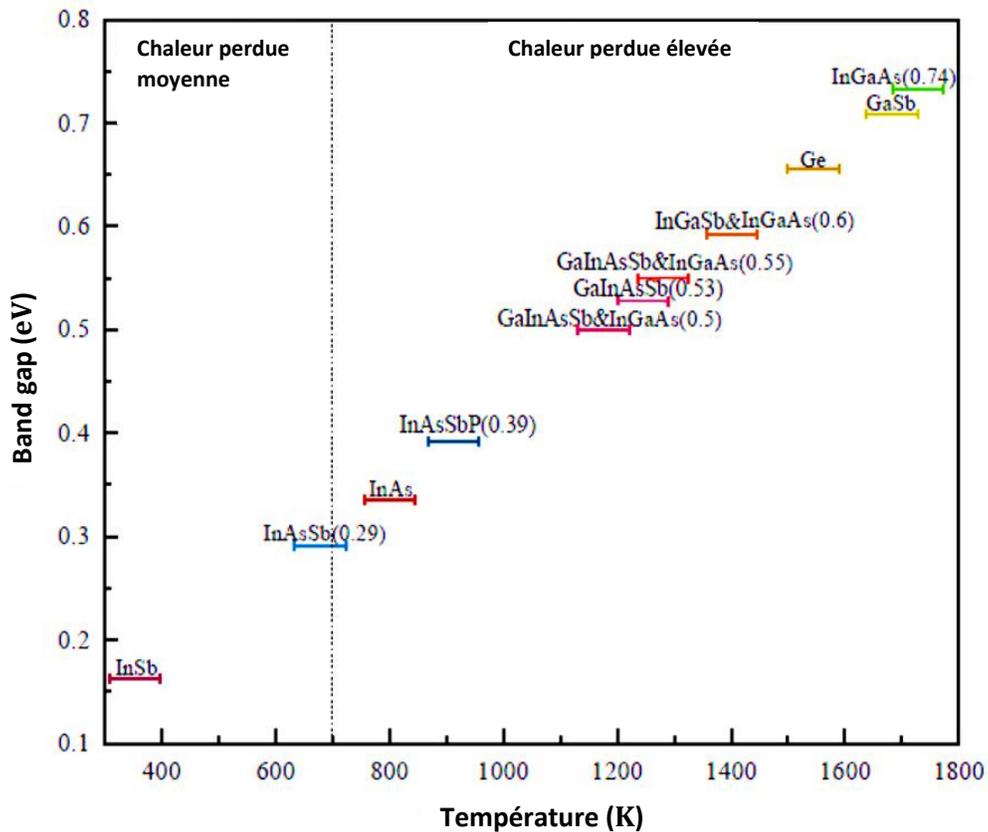


Fig.2.11. Les cellules TPV et la plage de température du corps noir de leurs performances optimales[9].

L'inadéquation entre le spectre de la source de chaleur et la bande interdite de la cellule est l'un des problèmes considérables qui diminue une énergie de sortie inférieure et réduit l'efficacité du système TPV. Par conséquent, la correspondance du spectre du corps noir avec la plage appropriée d'énergie de la bande interdite des cellules TPV est essentielle pour générer la quantité optimale d'énergie par unité de surface. La réflexion et le recyclage des photons de sous-bande interdite dans le radiateur amélioreront considérablement l'efficacité de la conversion du système TPV.

2.3.2. L'effet de la température de la cellule photoélectrique :

Les cellules TPV fonctionnent généralement à des températures supérieures à 300 K et sont situées à proximité d'un émetteur thermique pour atteindre une intensité lumineuse maximale. Étant donné que la cellule TPV est exposée à un rayonnement thermique constant pendant son fonctionnement, la cellule peut chauffer jusqu'à une certaine température, ce qui peut influe directement les performances de la cellule. Néanmoins, l'augmentation de la température de la cellule TPV augmente le I_{sc} en raison de la réduction de l'énergie de la bande interdite du matériau semi-conducteur. Donc la diminution de E_g permet d'absorber plusieurs photons à une longueur d'onde légèrement plus longue et de créer des paires électron-trou supplémentaires.

Le défi de l'augmentation de la température interne des cellules TPV peut être relevé par plusieurs méthodes. Comme l'utilisation d'un radiateur et d'un filtre pour protéger la cellule de l'effet de thermalisation, des systèmes de refroidissement actifs tels que des dissipateurs thermiques, tel que le refroidissement par air forcé a été couramment utilisés dans de nombreux prototypes de TPV[48].

2.3.3. Rentabilité de la commercialisation des cellules TPV :

Les principaux défis de l'application TPV est de développer à des cellules TPV commercialisées à moindre coût. Certaines structures TPV sont fabriquées par une technologie de croissance coûteuse telle que l'épitaxie par faisceau moléculaire (MBE). De plus, la plupart des cellules TPV nécessitent des couches de champ de surface avant et arrière pour optimiser les performances des cellules. Ces couches son rôle est d'améliorer la collection de porteurs photogénérés longs et courts[49]. Par conséquent, une méthode de croissance épitaxiale coûteuse est utilisée dans le processus de dépôt de ces couches. Le substrat TPV adapté au réseau est un autre problème qui rend la production de TPV peu rentable. En effet, la production des substrats TPV épais est coûteuse, ce qui rend la fabrication d'un substrat mince à l'échelle submicronique un difficile. Par conséquent, l'assemblage de substrats disponibles dans le commerce et efficace pour produire des cellules TPV est une bonne solution pour faire face au coût de fabrication élevé des cellules TPV. Par exemple, la croissance d'une couche de GaSb sur un substrat GaAs est une option à moindre coût par rapport au substrat GaSb[9]. Actuellement, pour développer la jonction GaSb sur un substrat GaAs avec un faible défaut d'appariement[50], la méthode de surcroissance latérale épitaxiale (ELOG) est utilisée. Par conséquent, la recherche sur l'intégration de la méthode ELOG dans différents matériaux TPV est un sujet de recherche important.

Si la température de rayonnement est élevée convient de noter que la puissance de sortie élevée par unité de surface des cellules TPV peut compenser les inconvénients liés à leur coût élevé. Par exemple, la cellule solaire GaSb sous une température de rayonnement de 1473 K a rapporté une densité de puissance de sortie de $0,82 \text{ W/cm}^2$, qui était presque 30 fois supérieure générée à la sortie par rapport à une meilleure cellule solaire GaAs[62][51].

2.3.4. Faible efficacité de conversion des cellules TPV :

Dans les systèmes TPV la faible efficacité de conversion reste le principal défi. Donc on peut classer les pertes d'efficacité des cellules TPV en deux facteurs principaux, à savoir les pertes optiques et électriques, comme illustré sur la **Figure 2.12**.

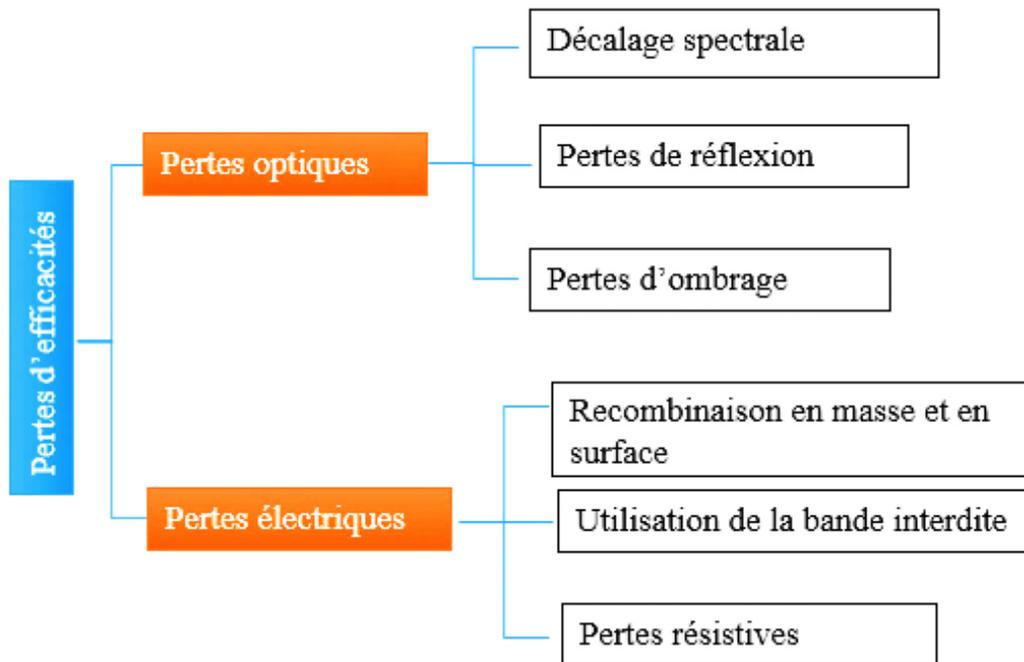


Fig.2.12. Les pertes d'efficacité de conversion des cellules TPV[9].

La prédiction des rendements de conversion optique-électrique via un calcul fondamental dans la technologie thermophotovoltaïque est comparable à la technologie solaire photovoltaïque. Cependant, une efficacité de conversion optique-électrique inférieure du système TPV global est observée dans les conditions réelles[52]. Ceci est principalement dû au mauvais contrôle spectral du générateur à la cellule TPV, entraînant des pertes optiques graves associées aux pertes de réflexion et d'ombrage. On peut atténuer le problème de réflexion en mettant en

œuvre et une couche antireflet ainsi qu'un réflecteur de surface arrière, tandis que la perte d'ombrage peut être réduite en optimisant la zone de couverture métallique sur la surface active de la cellule.

La majorité des travaux rapportés sur l'optimisation des cellules InGaAs. Sont concentrés sur l'optimisation du problème électrique de la cellule et l'amélioration du V_{oc} [9]. Donc les pertes électriques telles que la recombinaison en volume et en surface sont les facteurs influençant l'efficacité de conversion de la cellule. Ceci a été réalisé en réduisant l'épaisseur de la couche absorbante. Cependant, la cellule doit être optiquement épaisse pour absorber la majeure partie de l'éclairage incident. Le flux d'éclairage TPV est généralement décalé vers des longueurs d'onde infrarouges. Donc un absorbeur plus épais est nécessaire pour améliorer l'absorption du rayonnement infrarouge et d'augmenter I_{sc} . L'utilisation de la couche absorbante intrinsèque dans les cellules P-i-N ou N-i-P TPV peut augmenter I_{sc} et augmenter aussi le rapport génération/recombinaison car les porteurs générés dans la couche i ont une mobilité et une durée de vie élevées. Par conséquent, il faut prises en compte les pertes optiques et électriques pour maximiser l'efficacité de la cellule pour obtenir une cellule TPV de conception optimisée[52].

Chapitre 3 :

Modélisation et simulation du système
TPV.

3.1. Conception et modalisation de système TPV :

Dans cette partie on va décrire la conception et la formulation des systèmes TPV et expliquer la démarche de simulation ainsi que le concept de la géométrie et les modèles de formulation théorique utilisé dans chaque composante pour arriver à réaliser un système d'étude a deux dimension 2D ayant un format circulaire.

3.2. Etude de Modélisation et étape de Simulation des système TPV sur logiciel :

3.2.1. Présentation de logiciel d'étude :

Le logiciel choisi pour notre étude est COMSOL Multi-physique qui été appelé anciennement FemLab. Ce logiciel est utilisé pour modéliser et simuler des phénomènes physiques comme : les phénomènes de transfert de chaleur, la mécanique des fluides, l'acoustique, l'électrostatique, l'écoulement de fluides ou encore la déformation des matériaux. Par la résolution des équations aux dérivées partielles avec les éléments finis. Aujourd'hui il dispose de son propre environnement graphique qui permet de faire le dessin des géométries et aussi l'affichage des résultats en post traitement. Notre étude du système thermophotovoltaïque a été menée comme illustré sur **la Figure 3.1**.

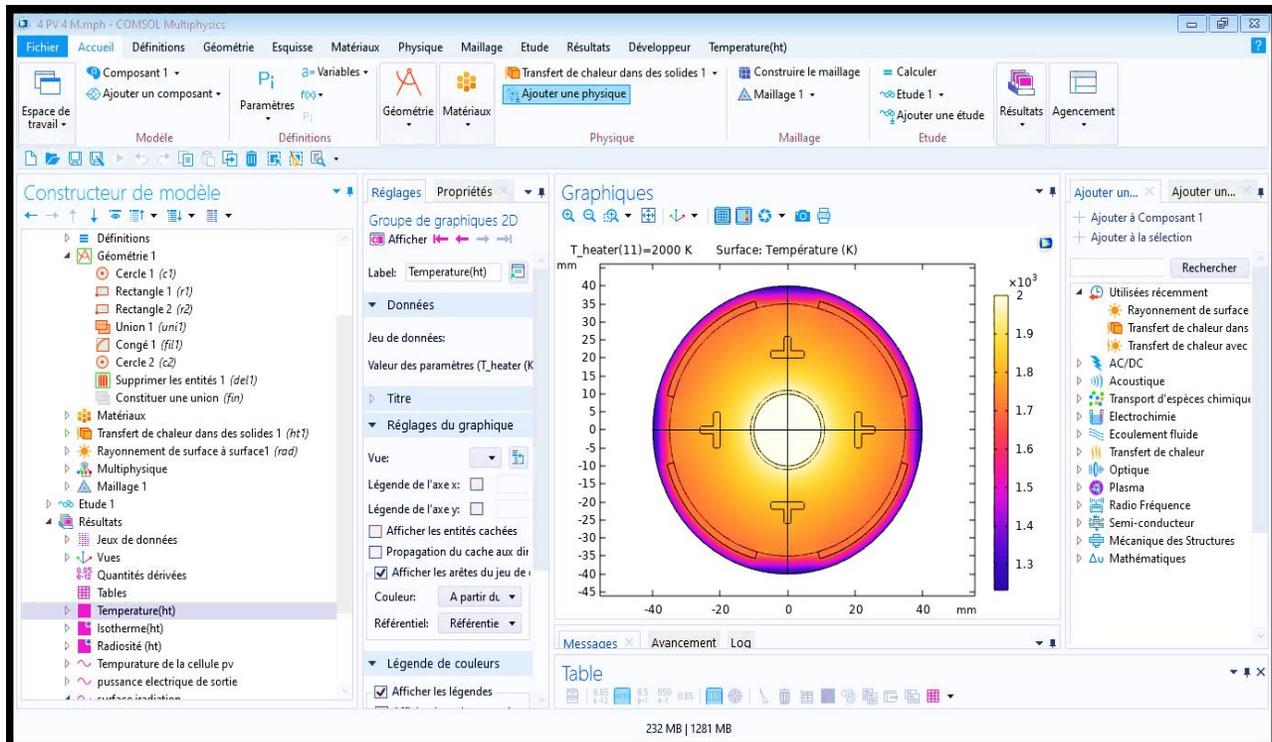


Fig.3.1. Présentation de la géométrie étudiée dans COMSOL Multiphysics[53].

3.2.2. Modélisation de la conception TPV :

Le carbure de silicium SiC a été considéré comme le matériau optimal pour le radiateur TPV à l'intérieur du système de conversion énergétique. Une étude expérimentale de l'émissivité de six échantillons de carbure de silicium Hexoloy® de type SA a révélé des valeurs moyennes d'émissivité de 0,8 avec une précision de +/- 5 % dans le domaine de température de 600 à 1200 °C [54]. Les propriétés thermoélectriques des matériaux SiC frittés Hexoloy® utilisés pour les simulations du modèle sont présentées dans le **tableau 3.1**.

Des matériaux peu coûteux, comme les plaques de silice pyrogénée, sont utilisés comme matériaux d'isolation thermique pour les batteries thermophotovoltaïques à chaleur latente[55]. Nous avons également considéré dans notre modèle un panneau de silice pyrogénée d'une épaisseur de 5 mm

comme matériau d'isolation pour les cellules photoélectriques, dont les propriétés thermoélectriques sont présentées dans **le tableau 3.1**.

Les miroirs chauds, parfois appelés miroirs réflecteurs de chaleur, réfléchissent le rayonnement infrarouge tout en transmettant la majeure partie de la lumière visible. Pour ce modèle TPV, nous avons considéré un miroir chaud de type carré à 0° AOI d'Edmund Optics, Royaume-UK[56], d'une épaisseur de 1,1 mm, basé sur un substrat BOROFLOAT 33 dont les propriétés thermoélectriques sont présentées dans **le tableau 3.1**.

Blandre et al. [57] ont utilisé un modèle radiatif, électrique et thermique couplé pour évaluer le comportement électrique et thermique de la cellule TPV GaSb et ont signalé l'augmentation de la densité de courant de court-circuit $J_{sc}(A/m^2)$ avec la température de la cellule, compensée par une forte réduction de la tension en circuit ouvert $V_{oc}(V)$. Ils ont également calculé la variation de l'efficacité de la cellule lorsque la température de la cellule passe de 300 K à 600 K. Sur la base de ces données, nous avons pu établir une corrélation en collaboration avec V. Ionescu professeur d'université Constanta entre l'efficacité et la température de la cellule en effectuant un ajustement polynomial de 3ème ordre avec le logiciel OriginPro 8, comme vous pouvez le voir dans la relation suivante :

$$\frac{\eta(T_c)}{\eta(300K)} = \begin{cases} 1.63798 + 0.00288 \cdot T_c - 2.41843 \cdot 10^{-5} \cdot T_c^2 + 2.48039 \cdot 10^{-8} \cdot T_c^3, & R^2 = 0.99963 \\ 0 & \text{pour } T_c > 600K \end{cases} \quad (3.1)$$

Z. Utlu[38] a rapporté, par le biais d'une étude expérimentale, une efficacité énergétique optimale de 21,57 % pour les cellules photoélectriques GaSb lorsque

$T_c=300$ K, l'efficacité de la cellule chute jusqu'à 15 % lorsque la température de la cellule augmente jusqu'à 400 K. Nous avons également considéré dans l'expression (3.1) l'efficacité optimale $\eta(300K) = 0.2157$.

Nous avons calculé ici la densité de puissance électrique de sortie de la cellule PV, P_0 (W/m²) en utilisant la relation :

$$P_0 = G_m \cdot \eta(T_c) \quad (3.2)$$

G_m : étant l'irradiation mutuelle de surface calculée numériquement (W/m²).

Le facteur de forme FF représente un indicateur important de l'efficacité de la cellule photoélectrique. FF est exprimé comme le rapport entre la puissance de la cellule générée P_{Out} et le produit entre la densité de courant de court-circuit I_{sc} et la tension de circuit ouvert V_{oc} , et est directement affecté par la température de la cellule T_c [58]. Les valeurs expérimentales rapportées par Vadiie et al [59] pour le facteur de forme de la cellule photoélectrique GaSb testée à des températures comprises entre 25 °C et 175 °C ont été utilisées ici pour le calcul du FF moyen dépendant de la température sur la longueur de la cellule L à l'aide de l'expression [60]:

$$FF = \frac{1}{L} \int_0^L (0.51 - 1.78 \times 10^{-3} T_c) dx \quad (3.3)$$

a) Les propriétés des matériaux utilisées :

Composante	Conductivité thermique k [W/(m k)]	Densité $\rho(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})$	Chaleur spécifique $C_p(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}})$	Emissivité ϵ	Reference
Emetteur (SiC)	120	3100	0.75	0.8	[61]
Miroir	1.2	2230	0.83	0.01	[62]
Cellule PV (GaSb)	32	5614	0.25	0.99	[63]
Isolation	0.021	180	0.9	0.1	[64]

Tableau.3.1. Les propriétés des matériaux utilisés dans la simulation.

Pour étudier l'interface de notre système d'étude, on définit chaque composante avec ses paramètres :

b) Les paramètres :

Les paramètres utilisés pour la démarche de simulation de notre système sont dans le tableau.3.2 :

Paramètre	Expression	Description
T_{heater}	1000 K	Température de l'émetteur
c_{p-air}	1100 J kg ⁻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
h_c	100 - 500 W/m ² K	Coefficient de transfert de chaleur, l'eau de refroidissement
T_{ref}	273 K	Température de l'eau de refroidissement

Tableau.3.2. les paramètres utilisés dans la simulation[65].

3.2.3. La géométrie et les dimensions de système d'étude :

On sait que la géométrie et les dimensions du système sont importantes dans la démarche de simulation. Dans notre cas, on va simuler avec une géométrie cylindrique 3D et circulaire 2D comme illustré sur la **Figure 3.2**.

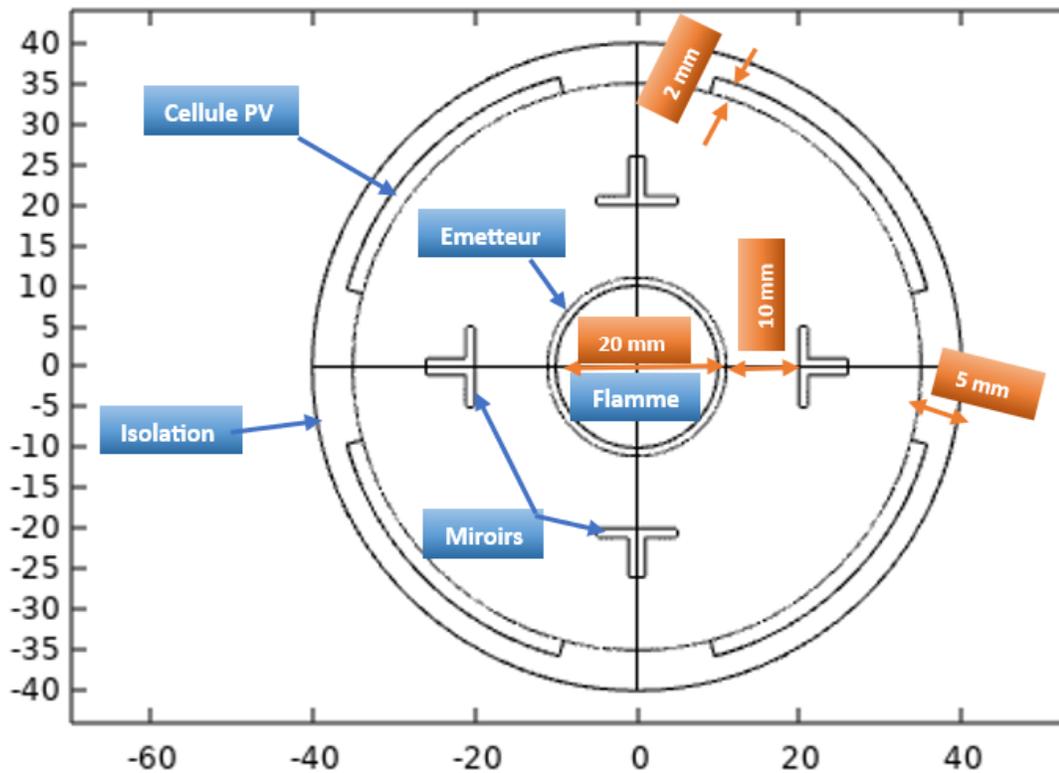


Fig.3.2 : Caractéristiques géométriques du système TPV modélisé.

Le principe de conception et d'optimisation adoptes les processus de conversion et de transport ente le concentrateur, l'émetteur, le filtre spectral, les cellules PV et le sous-système de refroidissement. Finalement, ont conclu que :

- ✚ La température de l'émetteur de la forme sphérique est plus élevée en raison de sa forme concave unique. Pour un système STPV, il est préférable d'utiliser l'émetteur cylindrique à cause de ses performances plus stables aux autres émetteurs. L'idée générale est de chercher une

grande différence de température dans l'ensemble de l'émetteur pour augmenter l'efficacité.

- ✚ Le filtre spectral utilise pour recycler l'énergie du rayonnement. Il a un rôle primordial dans les systèmes TPV.
- ✚ Un système de refroidissement performant est nécessaire pour maintenir la température de la cellule en dessous de 50 °C car l'augmentation de la température des cellules cause des effets négatifs sur la puissance électrique de sortie et l'efficacité du système[66].

3.2.4. Les modèles mathématiques utilisés :

Dans le modèle TPV actuel on utilise l'interface de transfert de chaleur avec rayonnement de surface à la surface. Ensuite le transfert de chaleur dans les solides est considéré pour résoudre l'équation régissant le transfert de chaleur par convection et conduction en fonction de la température T (ici on considère constant dans le temps) pour tous les domaines solides. Bien que certaines conditions aux limites sont prises en considération :

- ✚ L'émetteur est simulé avec une température spécifique (T_{heater}) considérée comme température de la source.
- ✚ Les miroirs sont simulés avec des faibles valeurs de l'émissivité et en tenant compte du rayonnement sur toutes les frontières.
- ✚ Enfin, à la limite extérieure des cellules PV, un effet de refroidissement convectif de l'eau est simulé en réglant h_c à 100 ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$) à une température ambiante de 273 K pour la limite de la cellule solaire. Les équations régissant le transfert de chaleur avec rayonnement de surface depuis la limite intérieure de l'émetteur jusqu'à la limite extérieure de la couche d'isolation sont listées ci-dessous.

Transfert de chaleur dans les solides [67]:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \mathbf{q} = Q + Q_{ted} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (3.5)$$

Isolation thermique [63]:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (3.6)$$

Transfert de chaleur dans les fluides [63]:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{vd} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (3.8)$$

Flux de chaleur [63]:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0 \quad (3.9)$$

$$q_0 = h(T_{ext} - T) \quad (3.10)$$

Source de chaleur limite (1,2) :

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = Q_b \quad (3.11)$$

Surface diffuse [67]:

$$J = \varepsilon e_b(T) + \rho_d G \quad (3.12)$$

$$\varepsilon + \rho_d = 1 \quad (3.13)$$

$$G = G_m + G_{amb} + G_{ext} \quad (3.14)$$

$$G_{amb} = F_{amb} e_b(T_{amb}) \quad (3.15)$$

$$G_{ext} = q_s \quad (3.16)$$

$$e_b(T) = n^2 \sigma T^4 \quad (3.17)$$

$$q_{r,net} = \varepsilon(G - e_b(T)) \quad (3.18)$$

Rayonnement surface-ambient [67]:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4) \quad (3.19)$$

Température : $T = T_0$ (3.20)

On termine par les interfaces couplées des deux phénomènes physiques :

Transfert de chaleur avec rayonnement de surface a surface [63]:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_{r,\text{net}} \quad (3.21)$$

Dans la deuxième étape de simulation, on va faire un maillage triangulaire et grossier comme illustré dans **Figure.3.3** sur la surface étudiée. Le principal objectif de ce maillage est de procéder à une simplification du système par certains modèles[68].

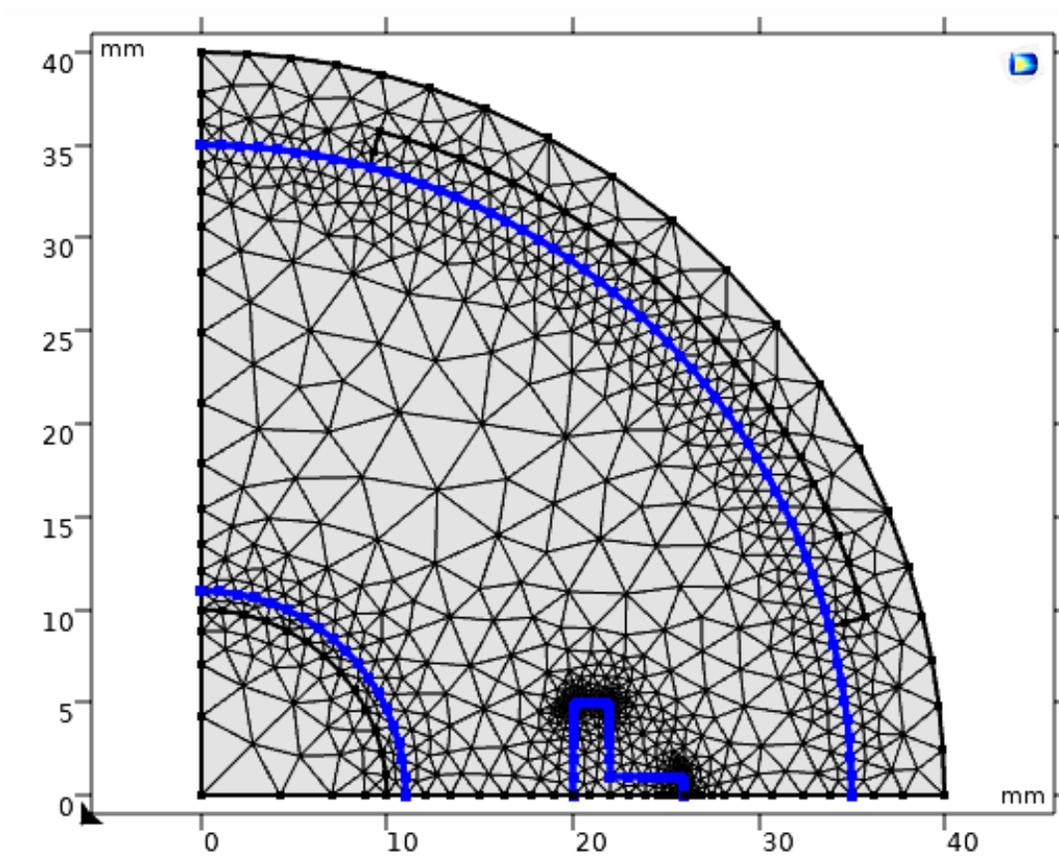


Fig.3.3. Schéma d'un maillage triangulaire et grossier.

Chapitre 4 :

Résultats et discussion

4.1. Etude d'indépendance du maillage :

Nous avons effectué ici un test préliminaire concernant la sensibilité du réseau de discrétisation par éléments finis, qui affecte les résultats de la simulation. Le critère de mesure de ce test de sensibilité a été choisi pour être la température moyenne de la cellule photoélectrique le long de la surface interne de la cellule pour une température d'émetteur $T_{\text{heater}} = 1000 \text{ K}$. Le coefficient de transfert thermique de la surface de refroidissement est de $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ avec l'émissivité de l'émetteur $\varepsilon = 1$. Cinq types de maillages, G1 - G5 ayant différents nombres d'éléments finis (NOE), ont été considérés pour établir une taille optimale du maillage d'éléments finis qui conduirait à des résultats suffisamment précis. Les résultats de l'étude d'optimisation ainsi réalisée sont présentés dans le tableau 4.1. On voit ici qu'une augmentation de NOE de 233600 à 289058 générera une erreur relative de seulement 0,028 % sur la valeur de T_c . Ainsi, les résultats de la simulation pour le maillage de discrétisation G4 ont été considérés comme indépendants de l'augmentation de NOE au-dessus de la valeur actuelle de 233600. Les éléments de forme triangulaire du réseau maillé G4 sélectionnés pour l'étude de modélisation sont présentés en détail à la **Figure. 4.1**.

Réseau	Nombre des éléments (NOE)	T_c (K)	Erreur (%)
G1	34010	353.26	-
G2	85774	352.07	0.338
G3	178028	351.62	0.128
G4	233600	351.33	0.083
G5	289058	351.25	0.028

Tableau 4.1. Résultats de l'étude de sensibilité du maillage éléments finis.

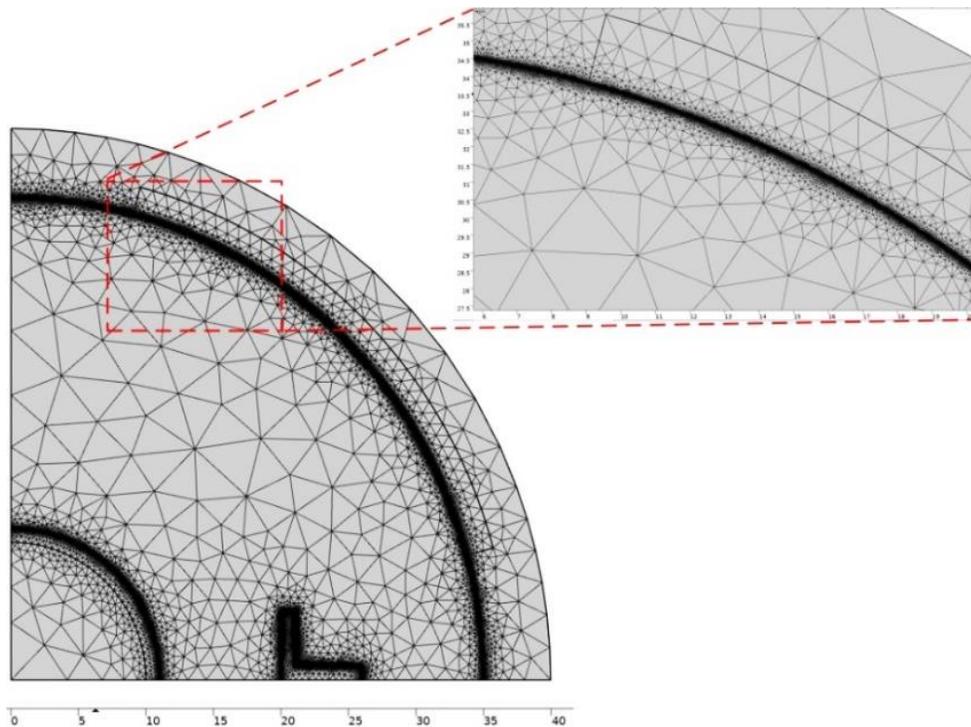


Fig.4.1. Le réseau maillé aux éléments finis G4 sélectionné pour l'étude du modèle TPV à base de GaSb.

4.2. Gestion thermique du système TPV avec refroidissement conductif – convectif :

Cette section étudie la gestion thermique du système TPV basé sur des photovoltaïques GaSb, en considérant le refroidissement conductif-convectif à différents coefficients de transfert de chaleur h_c entre 100 et 500 W/m²K.

Sur la **Figure.4.2** sont présentés les résultats de la simulation avec l'évolution des températures et de l'efficacité des cellules à la température du réchauffeur $T_{\text{heater}} = 1000$ K, ainsi que les densités de puissance de sortie maximales des cellules P_{max} obtenues à différentes valeurs T_{heater} de 1000 K, 1060 K, 1140 K, 1200 K, 1260 K, 1300 K, 1340 K, 1380 K et 1420 K.

Nous pouvons voir ici que la cellule GaSb atteint un rendement élevé de 21 % à $T_c=305$ K lorsque $h_c = 400$ W/m^2K . Pour cette valeur h_c , P_{max} enregistre 6,48 KW/m^2 à $T_c = 382$ K. De plus, on peut remarquer que lorsque h_c est inférieur à 200 W/m^2K à cette faible valeur T_{heater} de 1000 K, la cellule atteint des températures élevées (plus de 360 K), et l'efficacité chute rapidement à des valeurs inférieures à 15 %.

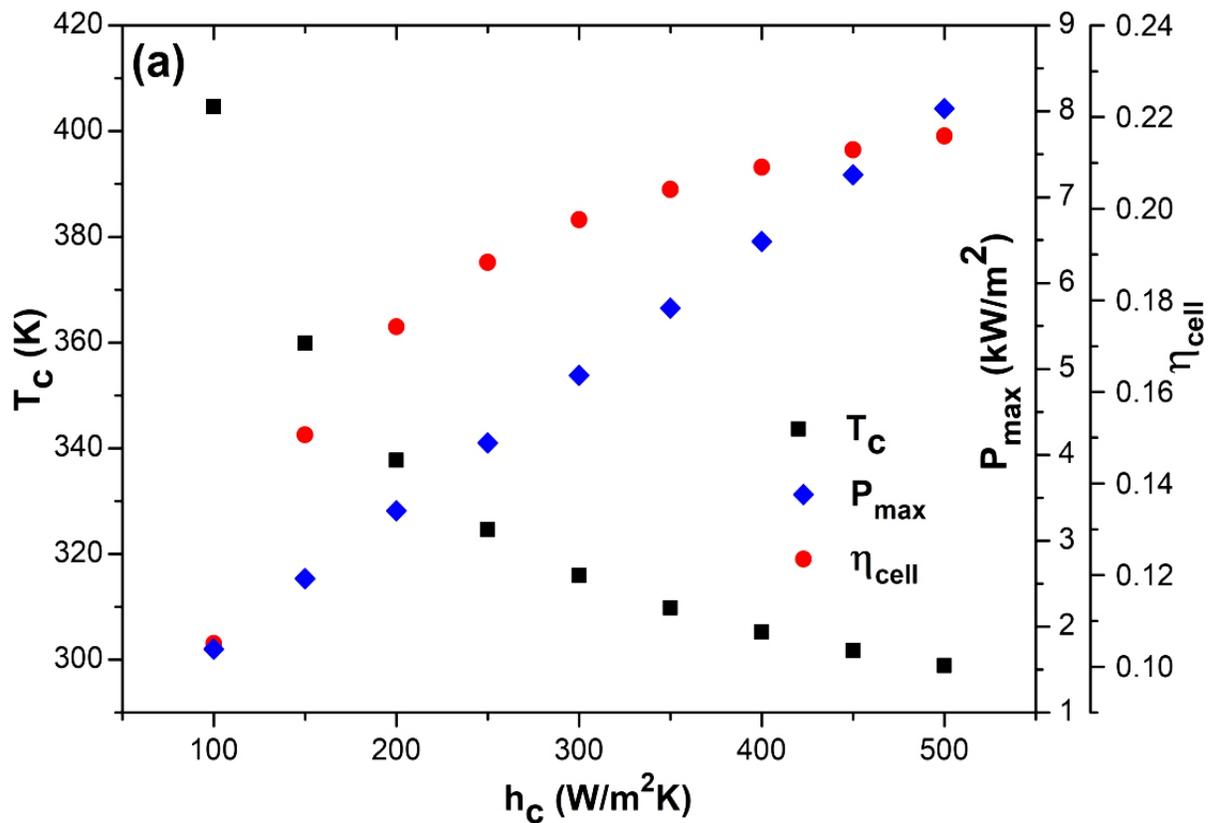
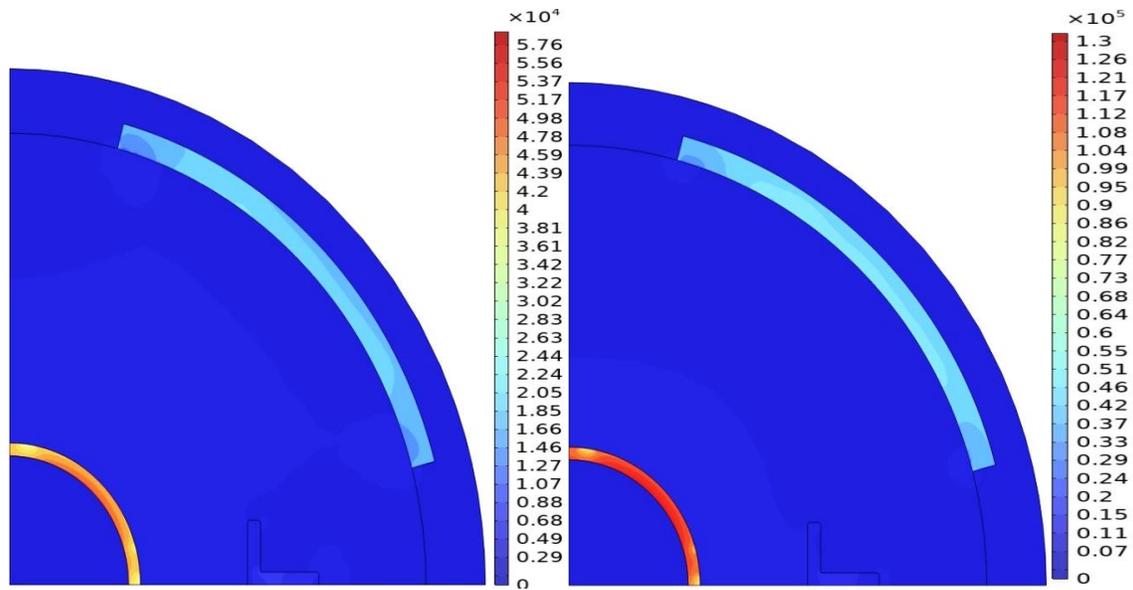


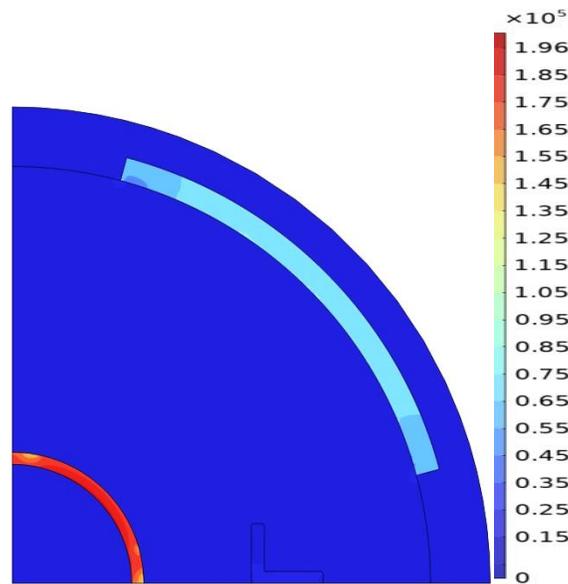
Fig.4.2. Variations de la température, de l'efficacité et de la puissance de sortie maximale de la phot cellule GaSb à l'intérieur du système TPV en fonction du coefficient de transfert de chaleur convectif – conducteur.

L'amplitude du flux d'énergie total le long de toute la surface de la cellule photoélectrique, qui est directement responsable de la variation de puissance de sortie, est présentée sur la **Figure. 4.3** pour des valeurs spécifiques de densités de puissance de sortie maximales. Nous avons considéré ici trois valeurs différentes de

$P_{\max} = 1,74 \text{ kW/m}^2$ à $T_c = 404,6 \text{ K}$ pour $h_c = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$, $4,93 \text{ kW/m}^2$ à $T_c = 386,3 \text{ K}$ pour $h_c = 300 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $8,03 \text{ kW/m}^2$ à $T_c = 383,7 \text{ K}$ pour $h_c = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$. Nous pouvons voir sur la **Figure. 4.3.c** que le flux d'énergie total présente une distribution uniforme le long de la partie centrale de la photocellule, avec des valeurs comprises entre $0,55 \cdot 10^5 - 0,65 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$, avec une distribution symétrique à travers les coins de la surface de la cellule, à des valeurs de $0,45 \cdot 10^5 - 0,55 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$. Au lieu de cela, pour le minimum P_{\max} considéré ici, une distribution en couches du flux d'énergie total a été enregistrée le long de la cellule entière, avec des valeurs comprises entre $1,27 \cdot 10^4$ et $1,85 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ (voir **Figure. 4.3.a**).



(a) $P_{\max} = 1.74 \text{ kW/m}^2$, $T_c = 404.6 \text{ K}$, $h_c = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$ (b) $P_{\max} = 4.93 \text{ kW/m}^2$, $T_c = 386.3 \text{ K}$, $h_c = 300 \text{ W/m}^2\text{K}$



(c) $P_{\max} = 8.03 \text{ kW/m}^2$, $T_c = 383.7 \text{ K}$, $h_c = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$

Fig.4.3. Distribution du gradient de l'amplitude du flux d'énergie total (W/m^2) le long d'un quart du système TPV à différentes valeurs $P_{\max}/T_c/h_c$.

De la **Figure.4.4**. Nous pouvons observer qu'à $h_c = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$, la forte augmentation de la température de cellule T_c jusqu'à 560 K à une température de chauffage de seulement 1200 K génère une diminution rapide de l'efficacité de la cellule et de la puissance de sortie. Le facteur de dépôt diminue dans ce cas d'une valeur faible de 0,275 jusqu'à 0,004 au $T_{\text{heater}} = 1200 \text{ K}$. Lorsque le coefficient de transfert thermique est augmenté de 400 à 500 $\text{W/m}^2\text{K}$, on observe que l'amélioration de η_{cell} , P_{out} et FF est moindre que celle enregistrée de 300 à 400 $\text{W/m}^2\text{K}$; la puissance de sortie présente des valeurs presque similaires aux valeurs de T_{heater} entre 1000 K et 1200 K. Pourtant, à 500 $\text{W/m}^2\text{K}$, la densité de puissance de sortie maximale est supérieure d'environ 1,55 kW/m^2 à celle de 400 $\text{W/m}^2\text{K}$, générant au $T_{\text{heater}} = 1420 \text{ K}$ une amélioration de FF avec 0,054 et une augmentation de η_{cell} avec 0,03.

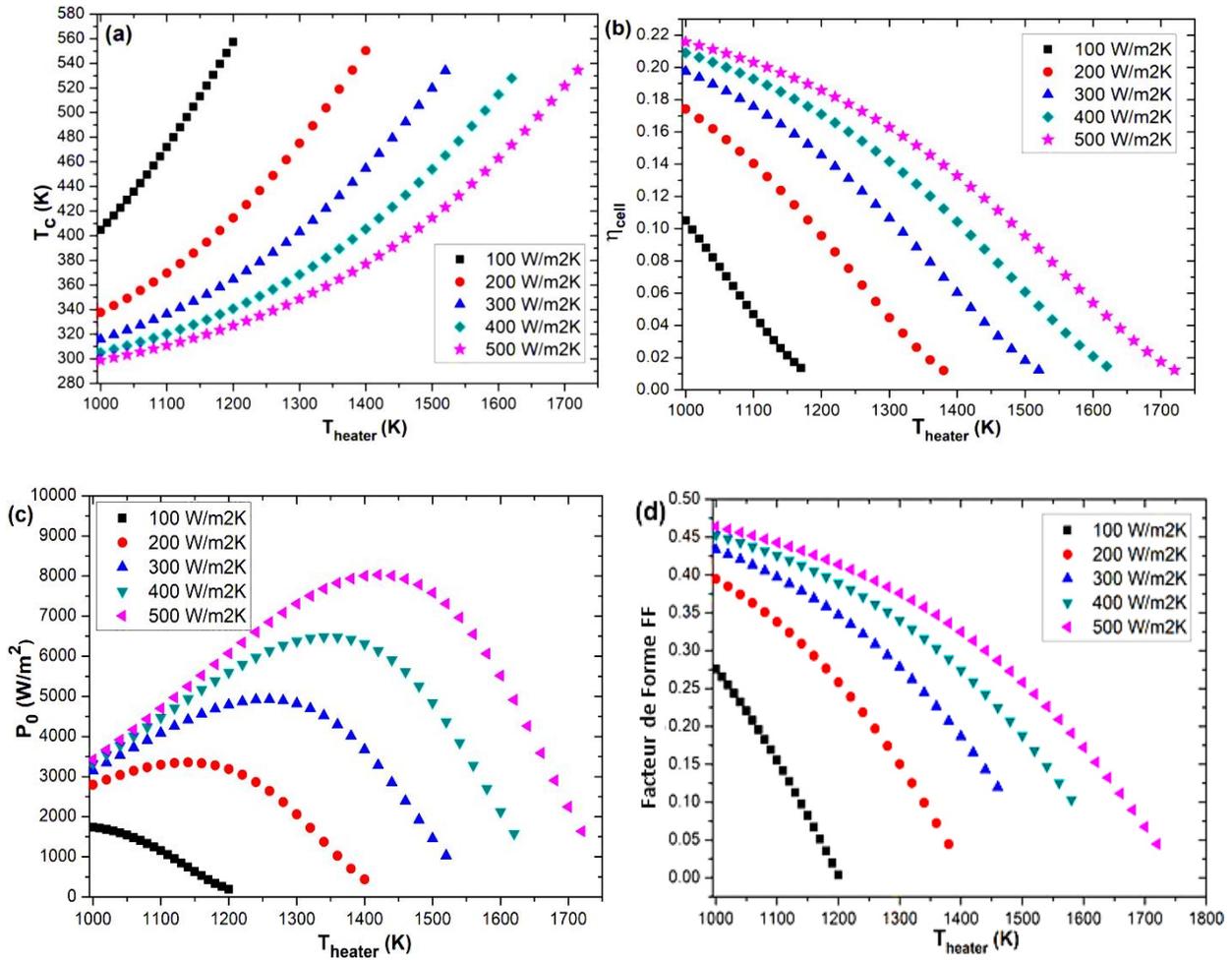


Fig.4.4. Variations de la température de la cellule (a), de l'efficacité de la cellule (b), de la puissance de sortie de la cellule (c) et du facteur de forme (d) à différentes températures d'émetteur pour différents coefficients de transfert de chaleur

Le refroidissement par air à convection forcée, basé sur système avec un dissipateur thermique et un ventilateur, peut générer des coefficients de transfert de chaleur jusqu'à 250 W/m²K [69]. Le coefficient de transfert thermique convectif de l'eau peut atteindre des valeurs comprises entre 200 et 1000 W/m²K en mode convection naturelle et entre 1000 et 15000 W/m²K en mode convection forcée[70]. Ainsi, le refroidissement efficace d'un système TPV à quatre photocellules peut être assuré par un système de refroidissement par eau à convection forcée sous flux monophasé avec mini-canaux de type cuivre – dissipateurs thermiques affinés[71].

Conclusion et perspectives

Conclusion générale :

Dans cette étude, nous avons réalisé des travaux de simulations d'un système TPV circulaire comprenant le **carbure de silicium SiC** comme émetteur à haute température et une cellule PV à base de **l'antimoniure de gallium GaSb**. On a obtenu un rendement de 21.5 % pour $h_c=500 \text{ W/m}^2\text{k}$. L'idée principale de cette étude de simulation est de montrer que les effets thermiques à l'intérieur de la cellule photovoltaïque restent un problème majeur, et si le coefficient de transfert de chaleur par conduction-convection appliqué aux cellules n'est pas assez élevé, cela peut entraîner des performances faibles du système. Donc on a augmenté le coefficient de transfert thermique conductif-convectif est on a obtenu des résultats acceptables pour différentes températures de l'émetteur. L'étude montre également que la température de la cellule diminue quand le coefficient de transfert thermique h_c augmente. Aussi, on a observé que la puissance maximale et le rendement maximal augmente. Pour cela on peut dire que pour obtenir de bons résultats il faut maintenir la température des cellules à des basses températures.

Perspectives :

Dans le futur, je peux envisager de faire des simulations avec des émissivités de 0.7, 0.6 et 0.5 dans le but de diminuer l'émission de l'émetteur. Aussi, il est possible de changer la géométrie des miroirs et de diminuer l'épaisseur des cellules PV. L'utilisation des autres matériaux à faible bande gap et également envisageable. Enfin, on peut éventuellement obtenu de l'eau chaude à partir de l'eau utiliser comme fluide de refroidissement, aussi on peut changer le fluide de refroidissement et utiliser **d'Hexafluorure de soufre SF6**.

Références bibliographiques :

- [1] G. P. Panayiotou et al., « Preliminary assessment of waste heat potential in major European industries », *Energy Procedia*, vol. 123, p. 335-345, sept. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.263.
- [2] J. Song, J. Jang, M. Lim, M. Choi, J. Lee, et B. J. Lee, « Thermophotovoltaic Energy Conversion in Far-to-Near-Field Transition Regime », *ACS Photonics*, vol. 9, n° 5, p. 1748-1756, mai 2022, doi: 10.1021/acsp Photonics.2c00149.
- [3] E. J. Tervo et al., « Efficient and scalable GaInAs thermophotovoltaic devices », *Joule*, vol. 6, n° 11, p. 2566-2584, nov. 2022, doi: 10.1016/j.joule.2022.10.002.
- [4] « Conversion d'énergie pour capteurs : Conversion thermophotovoltaïque », IES - Institut d'Electronique et des Systèmes. <https://www.ies.umontpellier.fr/la-recherche-et-linnovation/les-equipes-de-recherche/macsee/conversion-denergie-pour-capteurs-conversion-thermophotovoltaique/>.
- [5] P.-O. Chapuis, C. Lucchesi, et R. Vaillon, « Thermophotovoltaïque : des cellules PV pour convertir le rayonnement thermique », *Photoniques*, nov. 2020, doi: 10.1051/photon/202010537.
- [6] R. E. Nelson, « A brief history of thermophotovoltaic development », *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 18, n° 5, p. S141-S143, mai 2003, doi: 10.1088/0268-1242/18/5/301.
- [7] A. Luque et al., « FULLSPECTRUM: a new PV wave making more efficient use of the solar spectrum », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 87, n° 1, p. 467-479, mai 2005, doi: 10.1016/j.solmat.2004.07.034.
- [8] K. W. Stone, R. E. Drubka, et S. M. Kusek, « A space solar thermophotovoltaic power system », *IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, vol. 2, p. 1001-1006, 1996, doi: 10.1109/IECEC.1996.553835.
- [9] M. M. A. Gamel et al., « A Review on Thermophotovoltaic Cell and Its Applications in Energy Conversion: Issues and Recommendations », *Materials (Basel)*, vol. 14, n° 17, p. 4944, août 2021, doi: 10.3390/ma14174944.

- [10] A. LaPotin et al., « Thermophotovoltaic efficiency of 40 », *Nature*, vol. 604, n° 7905, p. 287-291, avr. 2022, doi: 10.1038/s41586-022-04473-y.
- [11] T. Moriarty et K. Emery, « Thermophotovoltaic cell temperature measurement issues », *AIP Conference Proceedings*, vol. 460, n° 1, p. 301-311, mars 1999, doi: 10.1063/1.57809.
- [12] E. Rephaeli et S. Fan, « Absorber and emitter for solar thermo-photovoltaic systems to achieve efficiency exceeding the Shockley-Queisser limit », *Opt Express*, vol. 17, n° 17, p. 15145-15159, août 2009, doi: 10.1364/oe.17.015145.
- [13] Z. Omair et al., « Ultraefficient thermophotovoltaic power conversion by band-edge spectral filtering », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, p. 201903001, juill. 2019, doi: 10.1073/pnas.1903001116.
- [14] A. Schock, C. Or, et V. Kumar, « Small radioisotope thermophotovoltaic (RTPV) generators », vol. 358, p. 81-97, févr. 1996, doi: 10.1063/1.49711.
- [15] L. Broman et J. Marks, « Co-generation of electricity and heat from combustion of wood powder utilizing thermophotovoltaic conversion », *AIP Conference Proceedings*, vol. 321, n° 1, p. 133-138, janv. 1995, doi: 10.1063/1.47062.
- [16] A. S. Vlasov, V. P. Khvostikov, O. A. Khvostikova, P. Y. Gazaryan, S. V. Sorokina, et V. M. Andreev, « TPV Systems with Solar Powered Tungsten Emitters », *AIP Conference Proceedings*, vol. 890, n° 1, p. 327-334, févr. 2007, doi: 10.1063/1.2711750.
- [17] Z. Liu et K. Qiu, « A TPV Power System Consisting of a Composite Radiant Burner and Combined Cells », *Energy*, vol. 141, sept. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.09.111.
- [18] J. R. Howell, M. P. Menguc, et R. Siegel, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 5^e éd. Boca Raton: CRC Press, 2010. doi: 10.1201/9781439894552.
- [19] A. Gombert, « An Overview Of TPV Emitter Technologies », *AIP Conference Proceedings*, vol. 653, n° 1, p. 123-131, janv. 2003, doi: 10.1063/1.1539370.
- [20] T. Aicher et al., « Development of a Novel TPV Power Generator », *AIP Conference Proceedings*, vol. 738, n° 1, p. 71-78, nov. 2004, doi: 10.1063/1.1841881.

- [21] C. L. DeBellis, M. V. Scotto, L. Fraas, J. Samaras, R. C. Watson, et S. W. Scoles, « Component development for 500 watt diesel fueled portable thermophotovoltaic (TPV) power supply », AIP Conference Proceedings, vol. 460, n° 1, p. 362-370, mars 1999, doi: 10.1063/1.57816.
- [22] B. İşyarlar et T. Menlik, « Evaluation of Applicability of Thermophotovoltaic System in Combi Boiler », Politeknik Dergisi, vol. 23, n° 2, Art. n° 2, juin 2020, doi: 10.2339/politeknik.631730.
- [23] « L'effet photovoltaïque ». <https://photovoltaique-energie.fr/1-effet-photovoltaique.html>.
- [24] M. Daoudi, « Cours : Physique des semi-conducteurs », Université de Béchar Faculté des sciences exactes Département des sciences de la matière, 2019, p. 26. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.researchgate.net/publication/335929242>
- [25] H. Essakhi et S. Farhat, « MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE », LASIME, ESTA Université Ibn Zohr , BP 33/S, 80000 Agadir, Maroc, mai 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.researchgate.net/publication/332846895>
- [26] « Figure I.1 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV. », ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Principe-de-fonctionnement-dune-cellule-PV_fig1_323384804.
- [27] Carlos Algora, Victoria Corregidor, Thermophotovoltaic Generation of Electricity. Consulté le: 18 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://link.springer.com/book/9780735403925>
- [28] B. Bitnar et al., « Record Electricity-to-Gas Power Efficiency of a Silicon Solar Cell Based TPV System », AIP Conference Proceedings, vol. 653, n° 1, p. 18-28, janv. 2003, doi: 10.1063/1.1539360.
- [29] V. A. Gevorkyan et al., « The Growth of Low Band-Gap InAsSbP Based Diode Heterostructures for Thermo-Photovoltaic Application », AIP Conference Proceedings, vol. 890, n° 1, p. 165-173, févr. 2007, doi: 10.1063/1.2711733.
- [30] T. Schlegl, F. Dimroth, A. Ohm, et A. W. Bett, « TPV Modules Based On GaSb Structures », AIP Conference Proceedings, vol. 738, n° 1, p. 285-293, nov. 2004, doi: 10.1063/1.1841905.

- [31] Z. Zhou, X. Sun, et P. Bermel, « Radiative cooling for thermophotovoltaic systems », sept. 2016, p. 997308. doi: 10.1117/12.2236174.
- [32] « Guide méthodologique : la récupération de chaleur fatale dans les collectivités (ENT42) ». <https://amorco.asso.fr/publications/guide-methodologique-la-recuperation-de-chaleur-fatale-dans-les-collectivites-ent42>.
- [33] « La récupération de chaleur par Idex », Idex. <https://www.idex.fr/nos-solutions/mobiliser-toutes-les-energies-locales-renouvelables/recuperation-de-chaleur>.
- [34] « Un colloque pour tout savoir sur la récupération de la chaleur fatale », 11 décembre 2017. <https://www.climaxion.fr/actualites/colloque-savoir-recuperation-chaleur-fatale>.
- [35] Z. Utlu et B. S. Önal, « Thermodynamic analysis of thermophotovoltaic systems used in waste heat recovery systems: an application », International Journal of Low-Carbon Technologies, vol. 13, n° 1, p. 52-60, mars 2018, doi: 10.1093/ijlct/ctx019.
- [36] H. L. Talom et A. Beyene, « Heat recovery from automotive engine », Applied Thermal Engineering, vol. 29, n° 2, p. 439-444, févr. 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.03.021.
- [37] M. Bendig, F. Maréchal, et D. Favrat, « Defining “Waste Heat” for industrial processes », Applied Thermal Engineering, vol. 61, n° 1, p. 134-142, oct. 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.03.020.
- [38] Z. Utlu, « Thermophotovoltaic applications in waste heat recovery systems: example of GaSb cell », International Journal of Low-Carbon Technologies, vol. 15, n° 2, p. 277-286, mai 2020, doi: 10.1093/ijlct/ctz049.
- [39] Z. Wang et al., « Selective emitter materials and designs for high-temperature thermophotovoltaic applications », Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 238, p. 111554, mai 2022, doi: 10.1016/j.solmat.2021.111554.
- [40] B. Bitnar, W. Durisch, et R. Holzner, « Thermophotovoltaics on the move to applications », Applied Energy, vol. 105, p. 430-438, mai 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.12.067.

- [41] V. Sundaram, M. D. Morgan, et W. E. Horne, « Final Report: Bandgap-Engineered Thermophotovoltaic Devices for Hi Efficiency Radioisotope Power, July 9, 1996 - July 8, 1999 », mars 2000, p. 765625. doi: 10.2172/765625.
- [42] K. Qiu et A. C. S. Hayden, « Thermophotovoltaic power generation systems using natural gas-fired radiant burners », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, n° 7, p. 588-596, avr. 2007, doi: 10.1016/j.solmat.2006.11.011.
- [43] G. Colangelo, A. de Risi, et D. Laforgia, « New approaches to the design of the combustion system for thermophotovoltaic applications », *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 18, n° 5, p. S262, avr. 2003, doi: 10.1088/0268-1242/18/5/318.
- [44] V. A. Grilikhes, A. Ya. Ender, I. N. Kolyshkin, V. I. Kuznetsov, et M. Z. Shvarts, « A high-temperature solar source of heat for a thermophotovoltaic generator: Theory and experiment », *Therm. Eng.*, vol. 54, n° 8, p. 620-625, août 2007, doi: 10.1134/S0040601507080058.
- [45] C. Zhang, L. Tang, Y. Liu, Z. Liu, W. Liu, et K. Qiu, « A novel thermophotovoltaic optical cavity for improved irradiance uniformity and system performance », *Energy*, vol. 195, p. 116962, mars 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.116962.
- [46] W. E. S. W. A. Rashid, P. J. Ker, M. Z. B. Jamaludin, M. M. A. Gamel, H. J. Lee, et N. B. A. Rahman, « Recent Development of Thermophotovoltaic System for Waste Heat Harvesting Application and Potential Implementation in Thermal Power Plant », *IEEE Access*, vol. 8, p. 105156-105168, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2999061.
- [47] R. G. Mahorter, B. Wernsman, R. M. Thomas, et R. R. Siergiej, « Thermophotovoltaic system testing », *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 18, n° 5, p. S232, avr. 2003, doi: 10.1088/0268-1242/18/5/314.
- [48] L. Fraas, « Thermophotovoltaics using Infrared Sensitive Cells & 2016 Addendum », 2016.
- [49] M. Ali, P. J. Ker, E. Rashid, H. Lee, L. Yao, et B. Wong, « Effect of Front-Surface-Field and Back-Surface-Field on the Performance of GaAs Based-Photovoltaic Cell », juill. 2019, p. 1-4. doi: 10.1109/SENSORSNANO44414.2019.8940098.

- [50] C. W. Bumby, « Improved Efficiency of GaSb/GaAs TPV Cells Using an Offset p-n Junction and Off-Axis (100) Substrates », in AIP Conference Proceedings, Freiburg (Germany): AIP, 2004, p. 353-359. doi: 10.1063/1.1841913.
- [51] M. M. A. Gamel et al., « Multi-dimensional optimization of In_{0.53}Ga_{0.47}As thermophotovoltaic cell using real coded genetic algorithm », Sci Rep, vol. 11, n° 1, Art. n° 1, avr. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-86175-5.
- [52] C. Hitchcock et al., « GaInSb and GaInAsSb thermophotovoltaic device fabrication and characterization », mai 1997, p. KAPL-P--000174, K--97058, 319652. doi: 10.2172/319652.
- [53] « COMSOL Desktop® Updates - COMSOL® 6.0 Release Highlights », COMSOL. <https://www.comsol.com/release/6.0/comsol-desktop>.
- [54] « Materials | Free Full-Text | Thermal and Mechanical Characterization of Carbides for High Temperature Nuclear Applications ». <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/10/2689>.
- [55] A. Datas, E. López, A. Ramos, A. L. de Ceballos, et C. del Cañizo, « Latent Heat Thermophotovoltaic Batteries ». Rochester, NY, 20 août 2021. doi: 10.2139/ssrn.3908778.
- [56] « Schott-borofloat-technical-data-sheet-english.pdf ».[Enligne].Disponiblesur:<https://www.edmundoptics.com/ViewDocument/schott-borofloat-technical-data-sheet-english.pdf>
- [57] E. Blandre, R. Vaillon, et J. Dré villon, « New insights into the thermal behavior and management of thermophotovoltaic systems », Opt Express, vol. 27, n° 25, p. 36340-36349, déc. 2019, doi: 10.1364/OE.27.036340.
- [58] T. Burger, C. Sempere, B. Roy-Layinde, et A. Lenert, « Present Efficiencies and Future Opportunities in Thermophotovoltaics », Joule, vol. 4, n° 8, p. 1660-1680, août 2020, doi: 10.1016/j.joule.2020.06.021.
- [59] E. Vadiee et al., « Temperature dependence of GaSb and AlGaSb solar cells », Current Applied Physics, vol. 18, n° 6, p. 752-761, juin 2018, doi: 10.1016/j.cap.2018.03.007.

- [60] Éliton Fontana, Lucas Battiston, Rosivaldo G.A. Oliveira, Claudia A. Capeletto, et Luiz F.L. Luz, « Beyond the combustion chamber: Heat transfer and its impact on micro-thermophotovoltaic systems performance », *Energy*, vol. 239, p. 122184-, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122184.
- [61] « Using Silicon Carbide Components for Wafer Handling & Inspection ». <https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/news-articles/using-silicon-carbide-components-wafer-handling-inspection>.
- [62] « High Performance Hot Mirrors | Edmund Optics ». <https://www.edmundoptics.com/f/high-performance-hot-mirrors/13824/>.
- [63] « HeatTransferModuleUsersGuide.pdf »[Enligne].
Disponiblesur:<https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>
- [64] « Fumed silica and other components for regular and medium temperature insulation panel ». <https://abc-456.com/low-temp-insulation-panel/>.
- [65] « Rahmani Hemza.pdf ». Consulté le: 4 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur:<https://dspace.univbba.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/744/Rahmani%20Hemza.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [66] Y. Xuan, X. Chen, et Y. Han, « Design and analysis of solar thermophotovoltaic systems », *Renewable Energy*, vol. 36, n° 1, p. 374-387, janv. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.06.050.
- [67] V. Ionescu, « Geometry optimization of a thermophotovoltaic system using the finite element method », *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 400, p. 042033, sept. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/400/4/042033.
- [68] « Heat Transfer Modeling Software for Analyzing Thermal Effects », COMSOL. <https://www.comsol.com/heat-transfer-module>.
- [69] P. Birbarah et al., « Water immersion cooling of high power density electronics », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 147, p. 118918, févr. 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118918.

[70] M. Xiao, L. Tang, X. Zhang, I. Y. F. Lun, et Y. Yuan, « A Review on Recent Development of Cooling Technologies for Concentrated Photovoltaics (CPV) Systems », *Energies*, vol. 11, n° 12, p. 1-39, 2018.

[71] K. Yuki et K. Suzuki, « Applicability of Minichannel Cooling Fins to the Next Generation Power Devices as a Single-Phase-Flow Heat Transfer Device », *Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging*, vol. 4, n° 1, p. 52-60, 2011, doi: 10.5104/jiepeng.4.52.

Résumé :

Une cellule thermophotovoltaïque (TPV) est un dispositif de conversion du rayonnement thermique en énergie électrique par des cellules photovoltaïques. Le dispositif suscite un intérêt croissant depuis quelques années, notamment pour son efficacité, supérieure à celle de la conversion photovoltaïque classique. Ce processus de conversion est généralement réalisé par l'utilisation d'émetteurs thermiques chauffés à une température supérieure à 800 C. L'objectif principal de ce travail est d'optimiser la géométrie du système (disposition et nombre de cellules) pour de meilleures performances. Le second objectif concerne l'augmentation de l'efficacité des systèmes thermophotovoltaïque TPV.

Mots Clés : Thermophotovoltaïque, conversion énergétique, cellules photovoltaïques, optimisation, source thermique.

Abstract:

A Thermophotovoltaics cell (TPV) is a device for converting thermal radiation into electrical energy using photovoltaic cells. The device has been attracting growing interest in recent years, not least for its efficiency, which is superior to that of conventional photovoltaic conversion. This conversion process is generally carried out using thermal emitters heated to a temperature in excess of 800 C. The main aim of this work is to optimize the system geometry (cell layout and number of cells) for improved performance. The second objective is to increase the efficiency of Thermophotovoltaics (TPV) systems.

Keywords: Thermo-photovoltaic, energy conversion, photovoltaic cells, optimization, thermal source.

ملخص:

الخلايا الحرارية الكهروضوئية (TPV) هي جهاز لتحويل الإشعاع الحراري إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الكهروضوئية. أثار الجهاز اهتمامًا متزايدًا في السنوات الأخيرة ، لا سيما بسبب كفاءته ، والتي تعد أعلى من كفاءة التحويل الكهروضوئي التقليدي. تتم عملية التحويل هذه عمومًا باستخدام بواعث حرارية مسخنة لدرجة حرارة أعلى من 800 درجة مئوية. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحسين هندسة النظام (التخطيط وعدد الخلايا) للحصول على أداء أفضل. الهدف الثاني يتعلق بزيادة كفاءة الأنظمة الحرارية الكهروضوئية (TPV).

الكلمات المفتاحية: الخلايا الحرارية الكهروضوئية ، تحويل الطاقة ، الخلايا الكهروضوئية ، التحسين ، المصدر الحراري.