



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen



Mémoire

Présenté à :

Faculté des sciences – Département de Physique

Master en Physique

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Par :

Mr.KADA Ahmed

Sur le thème :

Simulation numérique et optimisation géométrique d'un système thermo photovoltaïque (TPV).

Soutenu publiquement le 04 juin 2024 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mme RAHMOUN.Khadidja	professeur	université de Tlemcen	présidente
Mr CHABANE SARI.Nasr-eddine	professeur	université de Tlemcen	Encadrant
Mme BENABADJI.Batoul	MCA	université de Tlemcen	Examinatrice
Mme BELABACI.Cherifa	doctorante	université de Tlemcen	Co-encadrante

Année universitaire : 2023-2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

À mes parents, à ma merveilleuse femme, et à mes chers enfants

À travers les jours de recherche, les nuits d'étude et les moments d'effort intense, votre soutien inconditionnel a été ma lumière et ma motivation. Ce travail de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en Physique Énergétique représente bien plus qu'une simple réalisation académique. C'est le fruit de notre engagement collectif envers la connaissance, la persévérance et le dépassement de soi. À vous, ma tendre moitié, qui a été mon pilier dans les moments de doute et ma muse dans les instants de créativité, je dédie chaque page de ce mémoire. Votre soutien a été vraiment la fondation sur laquelle j'ai construit ce parcours académique. À mes merveilleux enfants, dont les sourires et les encouragements ont été ma source d'inspiration constante, je dédie ce travail avec la promesse que chaque étape franchie est un pas de plus vers un avenir brillant que nous partageons ensemble. À mes chers parents, dont le soutien indéfectible et les conseils avisés ont guidé chacune de mes décisions, je vous adresse ma plus profonde gratitude pour avoir été mes modèles de persévérance et de détermination. Ce travail est le fruit de votre amour et de votre encouragement constants.

Ahmed Kada

Remerciements

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude pour votre acceptation d'assister à ma soutenance de mémoire de fin d'études. Votre présence lors de cet événement important pour moi représente bien plus qu'un simple témoignage de soutien.

À Mr. Chabane Sari Nasr-Eddine, votre encadrement attentif et vos conseils éclairés ont été essentiels à la réussite de mon travail, et je suis honoré(e) de pouvoir partager ce moment avec vous.

À Mme. Rahmoune Khadidja, je suis honoré(e) d'avoir été guidé(e) par votre sagesse et vos connaissances, qui ont grandement enrichi mon parcours universitaire.

À Mme. Benabadji Batoul, Je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour avoir accepté d'être membre de la commission de jury lors de ma soutenance de mémoire de fin d'études.

À Mme. Belabaci Cherifa, votre Co-encadrement et vos précieux conseils ont été d'une aide inestimable tout au long de mon projet.

Et un grand merci à tous les membres de l'unité de recherche de matériaux et énergie renouvelable (URMER).

Table des matières :

Remerciements	I
Table des matières	II
Liste des figures et tableaux	IV
Nomenclature	VI
Introduction générale	VIII
Chapitre 1 : Généralités sur la thermo photovoltaïque.	
1.1. Introduction.....	1
1.2. Historique de la thermo photovoltaïque.....	2
1.3. Principe de fonctionnement de la thermo photovoltaïque.....	3
1.3.1. Notion générale sur les cellules TPV.....	3
1.3.2. Mécanisme opérationnel de la TPV.....	3
1.3.3. Les différentes gammes des cellules thermo photovoltaïques.....	5
1.3.4. Panel de matériaux utilisés dans les cellules TPV.....	6
1.3.5. L'efficacité des cellules TPV.....	7
1.3.6. Facteur de forme (FF) de la cellule thermo photovoltaïque.....	8
1.4. Applications des cellules TPV en conversion d'énergie	10
1.4.1. Rentabilité de la commercialisation des cellules TPV.....	10
1.4.2. L'influence de la température sur la cellule TPV.....	11
1.4.3. Application de la cellule TPV à base de GaSb dans la récupération d'énergie thermique résiduelle.....	13
1.4.4. L'influence de la température sur le FF de la cellule TPV à base de GaSb.....	14
1.4.5. L'influence de la température sur la cellule TPV à base de GaSb.....	15
1.4.6. La concordance spectrale avec la bande interdite des matériaux cellulaires TPV.....	16

Chapitre 2 : Description du système TPV.

2.1. Le principe de fonctionnement du système TPV.....	18
2.2. Les composition d'un système TPV.....	19
2.2.1. Partie de sources chaudes (Générateur Thermique).....	19
2.2.2. Partie optique.....	20
2.2.3. Partie électrique.....	23
2.2.4. Partie de gestion thermique.....	25
2.3. Exemple d'un système TPV à combustion.....	28
2.4. Récupération d'Énergie dans l'Industrie par Système TPV Cas de SONATRACH.....	29
2.5. Evolutions technologiques.....	30

Chapitre 3: Simulation et optimisation d'un système thermo photovoltaïque

3.1. Présentation de logiciel d'étude.....	32
3.2. Modélisation d'un système TPV.....	33
3.2.1. Les matériaux utilisés dans le système TPV.....	33
3.2.2. Les paramètres à optimiser dans la simulation.....	34
3.2.3. La géométrie du système à étudier.....	35
3.2.4. Système de refroidissement.....	36
3.2.5. Les formules mathématiques utilisées.....	37
3.3. Introduction aux méthodes numériques.....	38
3.3.1. Les différences finies.....	38
3.3.2. Les volumes finis.....	39
3.3.3. La méthode des éléments finis.....	39
3.3.4. Analyse Approfondie du Maillage dans la Simulation.....	40

Chapitre 4 : Résultats et discussions.

4.1. Optimisation de l'épaisseur de l'émetteur thermique.....	42
---	----

4.1.1. Etude de la puissance de sortie.....	42
4.1.2. Etude de rendement du système TPV.....	43
4.1.3. Etude de la température de la cellule PV GaSb.....	44
4.2. Optimisation de l'épaisseur de la cellule PV GaSb.....	46
4.2.1. Etude de la puissance de sortie.....	46
4.2.2. Etude de rendement du système TPV.....	47
4.2.3. Etude de la température de la cellule PV GaSb.....	48
4.2.4. La défaillance de la cellule PV GaSb à partir de 1200K.....	49
4.3. Optimisation thermique couplé cellule-émetteur.....	47
4.3.1. Etude de la puissance de sortie.....	48
4.3.2. Etude de rendement du système TPV.....	49
4.3.3. Etude de la température de la cellule PV GaSb.....	49
Conclusion et perspectives.....	50
Résumé.....	51
Références bibliographiques.....	53

Liste des figures :

❖ Chapitre 1 :

Fig. 1.1. Principe de la thermo photovoltaïque.

Fig. 1.2. Cellule thermo photovoltaïque.

Fig. 1.3. Base de fonctionnement TPV.

Fig. 1.4. Théorie des bandes d'énergie.

Fig. 1.5. L'efficacité de certaines cellules TPV avec différents matériaux.

Fig. 1.6. Caractérisation I-V d'une cellule thermo photovoltaïque.

Fig. 1.7. Les pertes d'efficacité de conversion des cellules TPV.

Fig. 1.8. Effet de la température sur la rentabilité des cellules TPV pour une température de rayonnement de 1000K.

Fig. 1.9. Cellule GaSb TPV pour des applications de récupération de chaleur perdue.

Fig. 1.10. Effet du changement de température sur le FF de la cellule sur l'efficacité de la photocellule GaSb.

Fig. 1.11. L'influence de la température sur la cellule TPV à base de GaSb.

Fig. 1.12. Les cellules TPV et la plage de température du corps noir de leurs performances optimales.

❖ Chapitre 2 :

Fig. 2.1. Principe de fonctionnement du système TPV.

Fig. 2.2. Source chaude à carburant.

Fig. 2.3. Emetteur thermique.

Fig. 2.4. Cellules photovoltaïques à base de GaSb.

Fig. 2.5. Récupération de la chaleur perdue.

Fig. 2.6. Système TPV à combustion.

Fig. 2.7. Système TPV à combustion avec refroidissement.

❖ Chapitre 3 :

Fig. 3.1. Présentation de la géométrie étudiée dans COMSOL Multiphysics.

Fig. 3.4. La géométrie du système TPV modélisé.

Fig. 3.5. Modèle d'un système de refroidissement.

Fig. 3.6. Schéma d'un maillage triangulaire et grossier.

❖ Chapitre 4 :

Fig. 4.1. Variation de la puissance de sortie pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

Fig. 4.2. Variation du rendement pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

Fig. 4.3. Variation de la T_{cell} pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

Fig. 4.4. Variation de la puissance de sortie pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

Fig.4.5. Variation du rendement pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

Fig. 4.6. Variation de la T_{cell} pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

Fig.4.7. Variation de la puissance de sortie d'une cellule à 4mm d'épaisseur et d'un émetteur à 10mm d'épaisseur.

Fig.4.8. Variation du rendement d'un système TPV optimisé cellule-émetteur.

Fig.4.9. Variation de la température de la cellule PV dans un système optimisé cellule-émetteur.

Liste des tableaux :

Chapitre 3 :

3.2. Tableau des propriétés thermo électriques utilisés dans la simulation.

3.3. Tableau des paramètres utilisés dans la simulation.

Nomenclature :

Pmp, Pmax: 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.

Préf : Puissance réfléchié.

Pinc : Puissance incident.

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

FF : Facteur de forme.

Vco : Tension en circuit ouvert (V).

Icc : Intensité de court circuit (A/m^2).

Vmp : Tension maximal (V).

Imp : Intensité maximale (A/m^2).

Eg : Energie de la bande interdite (eV).

Cp: Chaleur spécifique ($J/kg.K$).

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

qs: Flux de chaleur surfacique.

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

n : L'indice de réfraction.

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

hc : Coefficient de transfert thermique de l'eau de refroidissement.

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

hc : Coefficient de transfert thermique de l'eau de refroidissement.

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

E_émetteur : Epaisseur de la couche d'émetteur

E_cell : Epaisseur de la couche de cellule

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

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

Gamb : L'irradiance ambiante (W/m^2).

Gext : L'irradiance extérieure (W/m^2).

T : Température (K).

T_émetteur : Température de l'émetteur.

Tcell ,Tc: Température de la cellule.

T source: Température de la source.

Tref : Température de l'eau de refroidissement.

Text : Température extérieur.

Tamb : Température ambiante.

J : La radiosité : la quantité de rayonnement thermique émise (W/m^2).

F : Facteur de configuration.

u : Le champ de vitesse (m/s).

α : L'absorptivité.

τ : La transmissivité.

ρ : La densité (kg/m^3).

ϵ : L'émissivité.

η_{TPV} , η_{cell} : efficacité de la cellule TPV.

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

λp : La longueur d'onde de photon (m).

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

h : Constante de Planck (J.s).

Introduction générale

Parmi les domaines d'innovations énergétiques durables, les systèmes thermo-photovoltaïques (TPV) se dressent comme des piliers de promesse, combinant les principes de la thermodynamique et de la photovoltaïque pour convertir efficacement la chaleur en électricité. Remontant à l'essor de la science des matériaux et des technologies solaires, l'évolution des TPV témoigne d'une convergence entre l'ingéniosité humaine et les exigences croissantes en matière de solutions énergétiques [1].

L'histoire des TPV se tisse à travers les décennies de recherche et de développement, ponctuée par des avancées notables et des défis techniques. Ses origines remontent aux premières tentatives de capturer et d'utiliser la chaleur du soleil pour produire de l'électricité, une ambition qui a suscité l'intérêt des scientifiques et des ingénieurs depuis le début du 20ème siècle.

Les années de recherche intensive ont donné naissance à des prototypes et des modèles conceptuels, jetant les bases pour la création des premiers systèmes TPV fonctionnels dans les années 1960 et 1970. Aujourd'hui, les TPV se présentent comme une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques croissants de notre société, offrant un potentiel considérable pour une production d'électricité propre et durable.

Dans cette étude, nous plongerons dans les mécanismes et les défis des systèmes TPV, en explorant leurs fondements théoriques, leurs applications pratiques et ses voies vers une adoption plus large et plus efficace [4].

Ce système de conversion thermo-photovoltaïque (TPV) se compose de quatre éléments essentiels. Tout d'abord, un générateur qui fournit l'énergie thermique nécessaire, un radiateur transforme cette énergie thermique en un spectre d'émission approprié. Ensuite, des filtres sélectifs facultatifs et des réflecteurs (miroirs) sont utilisés pour ajuster et optimiser le spectre de rayonnement, en réfléchissant les photons sous-bande de manière appropriée. Enfin, une phot cellule est intégrée pour convertir les photons en énergie électrique exploitable [2].

Les cellules TPV, considérées comme le cœur du système de conversion d'énergie, sont constituées de semi-conducteurs à faible bande interdite, capables de générer des paires électron-trou lorsqu'ils absorbent des photons de faible énergie dont les énergies dépassent la bande interdite du semi-conducteur. Les cellules photovoltaïques en **GaSb**, dotées d'une

bande interdite réduite de 0,72 eV, sont particulièrement efficaces pour convertir la majeure partie du rayonnement filtré émis par les émetteurs à large bande.

Les radiateurs TPV adaptés aux cellules photovoltaïques à bande étroite utilisent du carbure de silicium (SiC), présentant une bande interdite minimale de 2 eV. Ce matériau permet d'établir une émission spectrale dans la plage des longueurs d'onde longues, ce qui est essentiel pour des températures de fonctionnement comprises entre 1000 et 2000 K.

Dans les chapitres suivants, nous explorerons en détail chaque composant du système TPV, en mettant en lumière leurs caractéristiques, leurs rôles respectifs et leur contribution à l'efficacité globale du système de conversion d'énergie thermo-photovoltaïque :

- ❖ **Le premier chapitre :** Dans ce chapitre introductif, nous explorerons les fondements de la thermo photovoltaïque (TPV), une discipline fascinante qui unit les principes de la thermodynamique et de la photovoltaïque pour convertir la chaleur en électricité. Nous commencerons par une introduction détaillée à la TPV, en expliquant ses concepts de base et en mettant en évidence son importance dans le paysage énergétique actuel. Nous examinerons également l'évolution historique des systèmes TPV, des premières tentatives jusqu'aux progrès récents, en mettant en lumière les défis et les opportunités qui ont façonné son développement. Enfin, nous discuterons des avantages potentiels de la TPV ainsi que des défis technologiques à surmonter pour sa pleine exploitation, en nous appuyant sur l'état actuel de la recherche et les tendances émergentes.
- ❖ **Le deuxième chapitre :** Ce chapitre se concentrera sur une description approfondie des systèmes TPV, en examinant de près leur composition et leur fonctionnement. Nous détaillerons les différents composants qui composent un système TPV, notamment le générateur, le radiateur, les filtres sélectifs, les réflecteurs et la photocellule, en expliquant le rôle de chacun dans le processus de conversion d'énergie. De plus, nous explorerons les différents types de cellules photovoltaïques utilisées dans les systèmes TPV, mettant en évidence leurs caractéristiques et leurs performances. Enfin, nous illustrerons notre propos en présentant des exemples concrets de systèmes TPV existants et en discutant de leurs applications potentielles dans divers domaines.

- ❖ **Le troisième chapitre :** Dans ce chapitre, nous aborderons la géométrie du modèle à étudier dans notre recherche, ainsi que les méthodes d'optimisation de l'émetteur thermique et de la cellule photovoltaïque. Nous décrirons en détail la géométrie du système TPV que nous avons étudiée, en expliquant les paramètres et les variables clés impliqués. Ensuite, nous discuterons des différentes approches d'optimisation utilisées pour améliorer les performances du système, en mettant en évidence les considérations théoriques et pratiques qui ont guidé nos travaux. Nous illustrerons également notre démarche en présentant des exemples d'outils et de techniques numériques utilisés pour la modélisation et l'optimisation du système TPV.
- ❖ **Le quatrième chapitre :** Dans ce dernier chapitre, nous présenterons les résultats de notre étude ainsi que les discussions qui en découlent. Nous commencerons par décrire en détail la méthodologie de simulation que nous avons utilisée et les paramètres que nous avons étudiés. Ensuite, nous présenterons les résultats obtenus pour différentes configurations du système TPV, en analysant les performances du système en fonction des variations de paramètres. Nous comparerons ensuite nos résultats avec les objectifs initiaux de notre étude et avec les travaux existants dans la littérature, avant de discuter des conclusions tirées et de leur pertinence pour la recherche future dans le domaine de la thermo photovoltaïque.

Chapitre 1 :

Généralités sur la thermo photovoltaïque.

1.1. Introduction :

La thermo photovoltaïque (TPV) représente une discipline innovante au sein du domaine de la conversion d'énergie thermique en électricité. Cette technologie cherche à exploiter de manière directe le rayonnement infrarouge émis par une source de chaleur pour exciter les électrons dans des matériaux semi-conducteurs au sein de cellules photovoltaïques, engendrant ainsi une conversion efficace de la chaleur en électricité. Contrairement aux systèmes conventionnels, tels que les moteurs thermiques, la TPV offre des avantages significatifs, notamment une potentielle augmentation de l'efficacité énergétique et une compacité accrue des dispositifs [1].

Le principe fondamental de la thermo photovoltaïque implique l'utilisation d'une source de chaleur, telle qu'une flamme ou un four solaire, pour chauffer un émetteur générant un rayonnement thermique dans le spectre infrarouge. Ce rayonnement est ensuite dirigé vers des cellules photovoltaïques spécifiquement conçues pour capturer et convertir cette énergie thermique en électricité. La technologie thermo photovoltaïque (TPV) offre des applications diverses en exploitant la conversion directe de la chaleur en électricité. Voici quelques exemples concrets [2] :

- Récupération d'énergie industrielle.
- Alimentation autonome pour capteurs distants.
- Optimisation de l'énergie solaire concentrée.
- Source d'énergie pour l'espace.
- Électrification dans des zones éloignées.

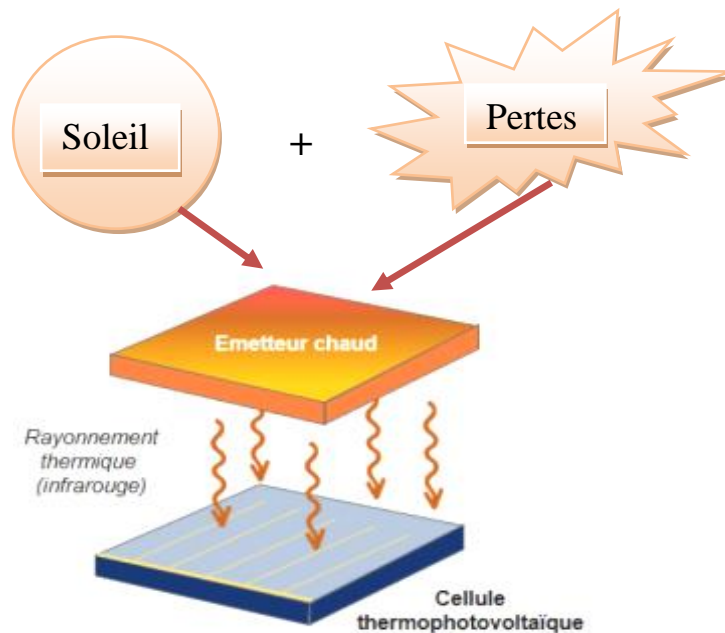


Fig. 1.1. Principe de la thermo photovoltaïque [3].

1.2. Historique de la thermo photovoltaïque :

La thermo-photovoltaïque (TPV) représente une convergence stratégique entre les principes thermodynamiques et la technologie photovoltaïque, visant à convertir de manière efficace la chaleur en électricité. L'histoire de la thermo-photovoltaïque trouve ses racines dans les années **1960**, une époque où les premières idées émergeaient dans la littérature scientifique, explorant la possibilité de transformer la chaleur en énergie électrique au moyen de processus photovoltaïques [4].

Une étape clé dans le développement de la TPV intervient dans les années **1980**, avec le dépôt du premier brevet significatif par Robert L. Jaffe en **1985** aux États-Unis. Ce brevet, identifié sous la référence Brevet US 4, 524,348, représente une étape cruciale dans la formalisation des concepts de conversion thermo photovoltaïque [5].

Les années **1990-2000** sont caractérisées par des avancées substantielles axées sur le développement de matériaux destinés à augmenter l'efficacité des cellules thermo-photovoltaïques en NREL (National Renewable Energy Laboratory). Des études approfondies sur les semi-conducteurs à large bande interdite sont publiées, jetant les bases d'une recherche plus approfondie visant à optimiser les performances des dispositifs TPV [4].

Au cours des années **2010**, le domaine de la thermo-photovoltaïque connaît des progrès significatifs (Rome et Madrid). Les chercheurs du monde entier concentrent leurs efforts sur la conception de dispositifs TPV présentant des rendements accrus et des coûts réduits. Des avancées notables émergent, propulsant la TPV vers le devant de la scène en tant que technologie prometteuse dans le paysage énergétique.

À la lueur de la dernière mise à jour en **janvier 2022**, les années 2020 se dévoilent avec des perspectives d'applications potentielles de la thermo-photovoltaïque. Des explorations dans des domaines tels que la récupération de chaleur industrielle, les systèmes de cogénération et les sources d'énergie renouvelable illustrent l'ampleur des possibilités offertes par la TPV dans la recherche de solutions énergétiques innovantes.

Il convient de souligner que la recherche en thermo-photovoltaïque demeure un domaine en constante évolution, avec de nouvelles avancées susceptibles de survenir après la dernière mise à jour en **janvier 2022**, soulignant ainsi l'importance d'une veille continue dans ce secteur dynamique.

1.3. Principe de fonctionnement de la thermo photovoltaïque :

1.3.1. Notion générale sur les cellules TPV :

Les cellules thermo-photovoltaïques (TPV) sont une technologie émergente qui convertit la chaleur en électricité en combinant les principes thermodynamiques avec la photovoltaïque. Contrairement aux cellules photovoltaïques classiques, les cellules TPV utilisent le rayonnement thermique pour générer un courant électrique. Elles présentent un fort potentiel d'application dans des domaines tels que la récupération de chaleur industrielle et les systèmes de cogénération. Bien que prometteuses, des défis subsistent, notamment l'optimisation des rendements et la recherche de matériaux performants. La recherche dans le domaine des cellules TPV reste active pour améliorer l'efficacité énergétique et contribuer aux solutions durables.

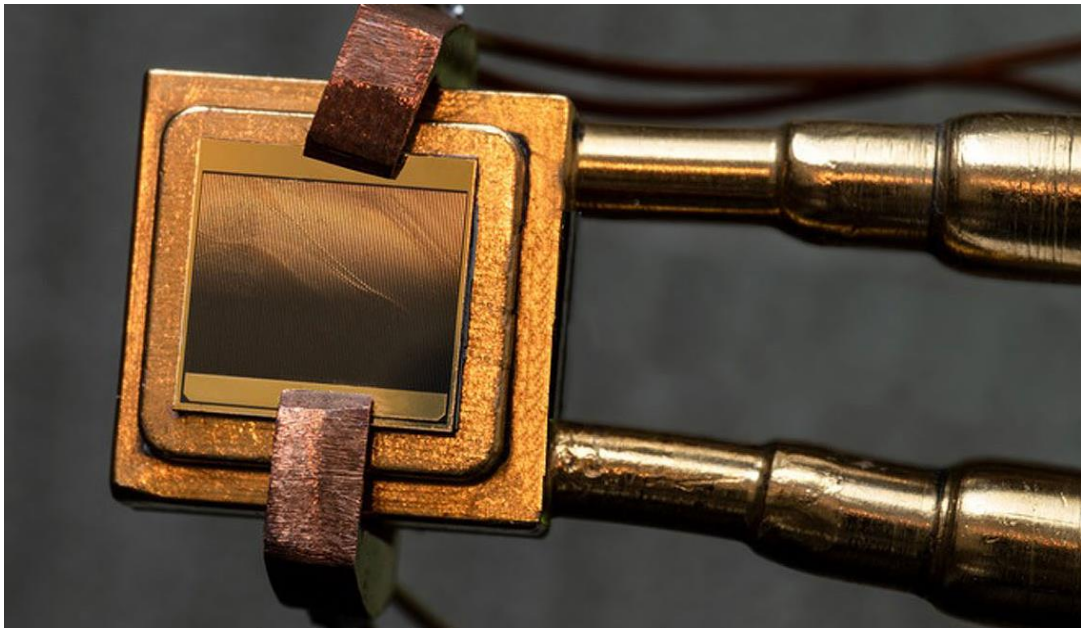


Fig. 1.2. Cellule thermo photovoltaïque [6].

1.3.2. Mécanisme opérationnel de la TPV :

Un système thermo-photovoltaïque (TPV) opère en exploitant les principes photovoltaïques pour convertir de manière efficace la chaleur en électricité. Dans un processus sophistiqué, le fonctionnement de cette technologie peut être décomposé comme suit :

Absorption Sélective de la Chaleur : La cellule TPV est conçue avec des matériaux sélectifs qui absorbent spécifiquement le rayonnement thermique provenant de la source de chaleur, que ce soit une flamme, un radiateur ou toute autre entité génératrice de chaleur.

Génération de Porteurs de Charge : L'énergie thermique absorbée par la cellule TPV excite les porteurs de charge dans le matériau semi-conducteur, générant ainsi des électrons libres et des trous. Ce processus crée une population de porteurs de charge qui seront ensuite mobilisés pour générer un courant électrique.

Émission de Photons : Les porteurs de charge générés réémettent l'énergie sous forme de photons lorsqu'ils retournent à leur état de repos, initié par le choc thermique initial. Ces photons représentent essentiellement une énergie lumineuse, prête à être convertie en électricité.

Chapitre 1 : Généralité sur la thermo photovoltaïque

Conversion Photovoltaïque : Les photons émis interagissent avec les couches semi-conductrices de la cellule, générant des paires électron-trou. Un champ électrique interne assure ensuite la séparation de ces paires, créant un flux de courant électrique.

Production d'Électricité : Le courant électrique généré est ensuite acheminé à travers un circuit externe, où il peut être exploité pour alimenter des dispositifs électroniques ou être intégré au réseau électrique.

Cette approche technique sophistiquée repose sur des matériaux spécialisés, des procédés de conception avancés et une optimisation continue pour atteindre des rendements élevés et une efficacité maximale dans la conversion de la chaleur en électricité.

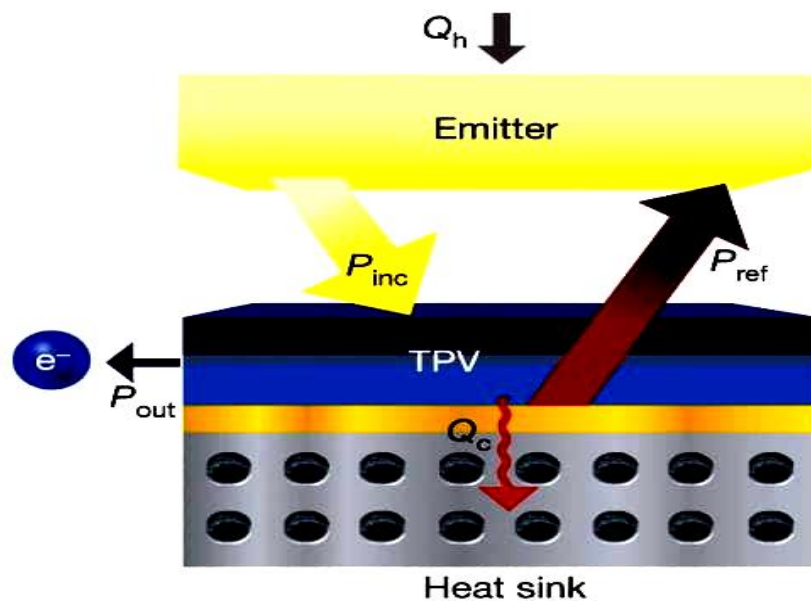


Fig. 1.3. Base de fonctionnement TPV [7].

1.3.3. Les différentes gammes des cellules thermo photovoltaïques :

Les cellules utilisées dans les applications thermo-photovoltaïques (TPV) sont catégorisées en fonction de leur bande interdite, se déclinant en cellules à bande interdite élevée, moyenne et faible :

Cellules à Bande Interdite Élevée : Ces cellules, basées sur le silicium avec une bande interdite de 1.1 eV, sont largement disponibles sur le marché. Bien qu'elles aient un rendement limité, elles nécessitent des températures très élevées. En raison de ces contraintes, elles sont moins considérées pour les applications TPV.

Chapitre 1 : Généralité sur la thermo photovoltaïque

Cellules à Bande Interdite Moyenne :

Les cellules à bande interdite moyenne, avec une bande interdite de 0.7 eV, sont les plus étudiées pour les applications TPV. Leur bande interdite correspond à la longueur d'onde du pic de spectre d'un corps noir à 1600 K. Parmi celles-ci, la cellule en GaSb a été particulièrement envisagée comme composant des systèmes TPV dans notre étude.

Cellules à Bande Interdite Faible :

Les cellules à bande interdite faible sont fabriquées à partir d'alliages semi-conducteurs quaternaires, tels que GaInAsSb sur substrat InAs et InAsPSb sur substrat GaSb ou InAs. Ces cellules, avec une bande interdite de 0.5 eV, sont conçues pour des études à basse température.

Cette classification permet de cibler des cellules spécifiques en fonction de leurs caractéristiques, offrant ainsi une approche précise dans le choix des cellules adaptées aux besoins des systèmes TPV à différentes températures et conditions d'exploitation [8].

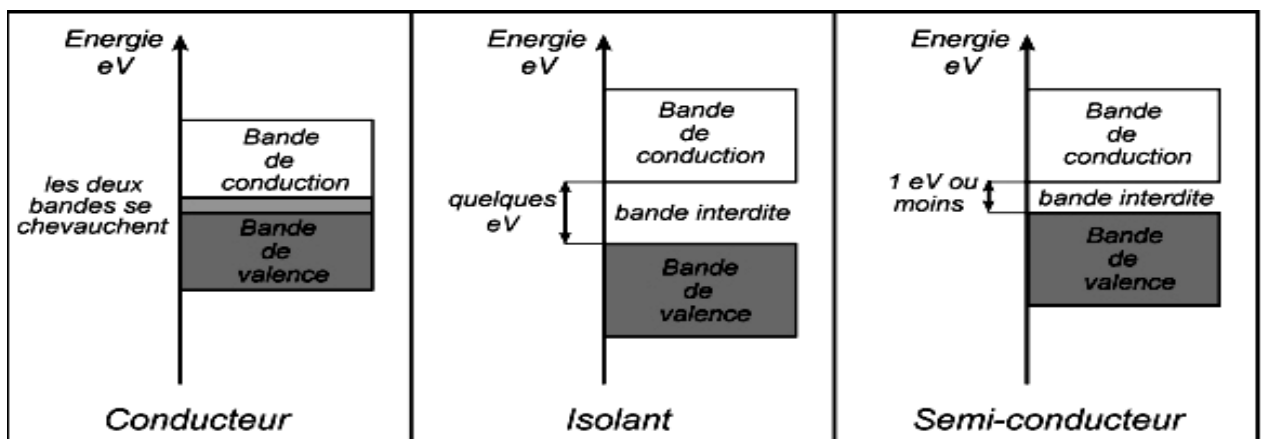


Fig. 1.4. Théorie des bandes d'énergie [9].

1.3.4. Panel de matériaux utilisés dans les cellules TPV :

Les cellules thermo-photovoltaïques (TPV) font usage de divers semi-conducteurs dans le cadre de leur conception. Ces semi-conducteurs, en tant que composants fondamentaux, jouent un rôle critique dans la conversion de l'énergie thermique en électricité. Voici une sélection de semi-conducteurs pertinents employés dans les cellules TPV :

Chapitre 1 : Généralité sur la thermo photovoltaïque

Arséniure de Gallium (GaAs) :

Le GaAs est un semi-conducteur largement utilisé dans les cellules TPV en raison de ses propriétés de bande interdite directe et de son rendement élevé. Des recherches telles que celle menée par S. Rinner et al. Ils ont exploré l'utilisation de GaAs dans les cellules TPV [10].

Phosphure d'Indium-Gallium (InGaP) :

Le matériau InGaP est également utilisé comme semi-conducteur dans les cellules TPV. Il peut être combiné avec d'autres matériaux pour optimiser les performances. Des travaux de recherche comme ceux de R. Scheer et al. Ils ont examiné l'utilisation d'InGaP dans les cellules TPV [11].

Nitride de Gallium (GaN) :

Le GaN est un matériau semi-conducteur qui a attiré l'attention pour son large intervalle énergétique et sa robustesse thermique. Des recherches telles que celles menées par S. Nakamura et al. Ils ont examiné l'utilisation de GaN dans les cellules TPV [12].

InGa (Indium Gallium) :

Des travaux de recherche tels que ceux d'A. Freundlich et al. Ils peuvent fournir des informations sur l'utilisation d'InGaAs dans des cellules TPV [13].

AsSb (Antimoniure d'Arsenic) :

Des études telles que celles menées par M. C. Wu et al. Ils peuvent être consultés pour des informations sur l'utilisation d'alliages AsSb dans des applications TPV [14].

GaSb (Antimoniure de Gallium) : GaSb est un semi-conducteur de type III-V qui a des applications notables dans les cellules TPV. Les travaux de W. Jin et al. Ils pourraient offrir des détails sur les caractéristiques et les performances spécifiques de GaSb dans ce contexte [15].

Si (Silicium) : Pour des+ informations sur l'utilisation du silicium dans les cellules TPV, des études telles que celles menées par H. Yonezu et al. Ils peuvent être utiles [16].

Ge (Germanium) : Des travaux tels que ceux de D. Lackner et al. Ils peuvent fournir des informations sur l'utilisation du germanium dans des cellules TPV [17].

Chapitre 1 : Généralité sur la thermo photovoltaïque

Le choix des semi-conducteurs est influencé par divers paramètres, tels que les performances requises notamment l'énergie gap, les considérations économiques, les exigences de fabrication, et d'autres critères de conception propres aux cellules TPV. La recherche continue dans ce domaine vise à explorer de nouveaux matériaux et à perfectionner les technologies existantes pour améliorer l'efficacité et la viabilité de ces dispositifs.

1.3.5. L'efficacité des cellules TPV :

L'efficacité d'une cellule thermophotovoltaïque (TPV) diffère de celle d'une cellule solaire classique en raison de son potentiel unique à conserver et convertir directement l'énergie des photons de sous-bande interdite. Contrairement aux cellules solaires, les TPV peuvent réfléchir les photons non convertis vers l'émetteur, maintenant ainsi l'émetteur chaud et minimisant l'apport d'énergie nécessaire au chauffage.

L'efficacité d'une cellule TPV (η_{TPV}) est exprimée par l'équation :

$$\eta_{TPV} = \frac{P_{out}}{P_{out} + Q_c} = \frac{P_{out}}{P_{inc} + P_{ref}}$$

Où :

P_{out} : représente la puissance électrique générée par la cellule TPV, comprenant la tension de circuit ouvert V_{co} , le courant de court-circuit I_{cc} , et le facteur de forme du courant-tension FF.

Q_c : est la chaleur totale absorbée et générée par la cellule, comprenant la chaleur parasite due à l'absorption dans le semi-conducteur ou le réflecteur métallique, les pertes de thermalisation, les pertes d'échauffement Joule, et les pertes de recombinaison radiative.

Pour améliorer l'efficacité du TPV, il est crucial d'augmenter P_{out} et/ou de réduire la quantité de chaleur absorbée et générée dans la cellule Q_c . Cela nécessite une optimisation de la conception de la cellule TPV. Il est important de noter que l'efficacité d'un système complet intégrant des TPV sera toujours inférieure à η_{TPV} en raison des pertes spécifiques au système.

Il est impératif de mesurer précisément la puissance électrique générée et la chaleur perdue pour évaluer et améliorer l'efficacité des cellules TPV, contribuant ainsi à l'avancement de cette technologie prometteuse.

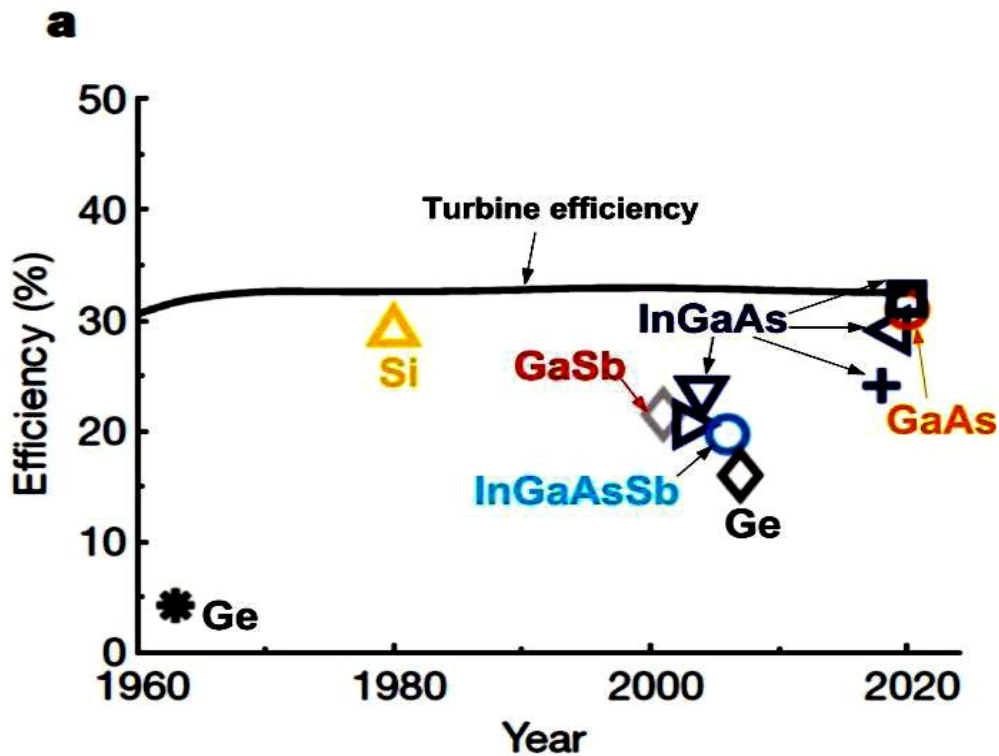


Fig. 1.5. L'efficacité de certaines cellules TPV avec différents matériaux [18].

1.3.6. Facteur de forme (FF) de la cellule thermo photovoltaïque :

Le facteur de forme (FF) pour les cellules thermo photovoltaïques (TPV) est un paramètre qui, comme dans le cas des cellules solaires classiques, mesure l'ajustement de la courbe caractéristique courant-tension (I-V) à une forme rectangulaire idéale.

Le FF est défini comme le rapport de la puissance maximale de la cellule (P_{max}) au produit de la tension en circuit ouvert (V_{co}) et du courant de court-circuit (I_{cc}). La formule mathématique est la suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}}$$

Chapitre 1 : Généralité sur la thermo photovoltaïque

Graphiquement, le FF peut être interprété comme une mesure de "l'équerrage" de la cellule TPV. Un FF proche de 1 indique une courbe I-V rectangulaire, ce qui signifie que la cellule a une bonne capacité à convertir la lumière thermique en électricité.

Il est important de noter que le FF est souvent associé à la qualité des dispositifs photovoltaïques, indiquant l'efficacité avec laquelle la cellule peut extraire la puissance maximale de la lumière thermique incidente.

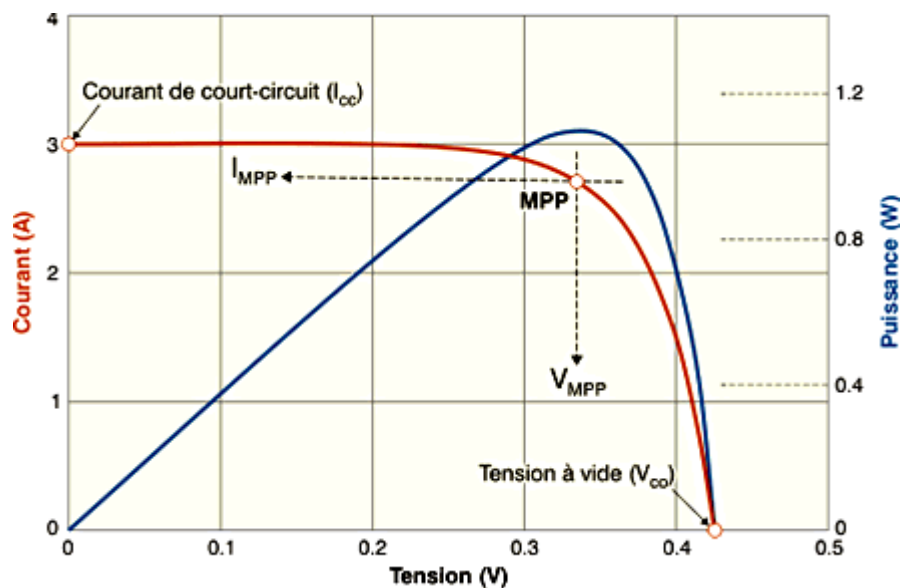


Fig. 1.6. Caractérisation I-V d'une cellule thermo photovoltaïque [19].

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

Sa tension à vide V_{co} : Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

Son courant court-circuit I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même. Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux.

1.4. Applications des cellules TPV en conversion d'énergie :

1.4.1. Rentabilité de la commercialisation des cellules TPV :

La commercialisation des cellules thermo photovoltaïques (TPV) fait face à des défis majeurs, notamment en termes de coûts de fabrication et d'efficacité de conversion. Les technologies de croissance coûteuses, telles que l'épitanie par faisceau moléculaire (MBE), sont souvent utilisées dans la fabrication de structures TPV, ce qui entraîne des coûts élevés. De plus, l'utilisation de couches de champ de surface avant et arrière, nécessaires pour optimiser les performances des cellules, est souvent associée à des méthodes de dépôt coûteuses [20].

Une solution potentielle consiste à explorer des méthodes de croissance moins coûteuses et des alternatives pour les couches de champ afin de réduire les coûts de fabrication. De plus, la production de substrats TPV épais est onéreuse, mais l'assemblage de substrats disponibles dans le commerce peut être une solution pour rendre la production plus rentable.

Malgré les coûts élevés, la puissance de sortie élevée par unité de surface des cellules TPV à des températures de rayonnement élevées peut compenser ces inconvénients financiers. Par exemple, une cellule solaire GaSb a démontré une densité de puissance de sortie considérablement plus élevée à des températures élevées par rapport à une cellule solaire GaAs [21].

Cependant, la faible efficacité de conversion reste un défi majeur. Les pertes d'efficacité peuvent être classées en pertes optiques et électriques.

La recherche continue sur des méthodes de fabrication plus rentables, des alternatives de matériaux et des améliorations de l'efficacité de conversion est essentielle pour surmonter ces défis et rendre la commercialisation des cellules TPV plus viable économiquement.

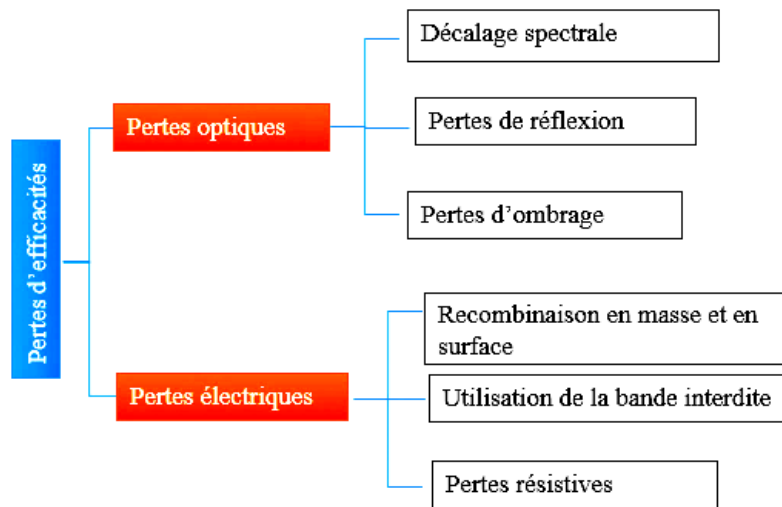


Fig. 1.7. Les pertes d'efficacité de conversion des cellules TPV [22].

1.4.2. L'influence de la température sur la cellule TPV :

L'effet de la température sur les performances des cellules thermo photovoltaïques (TPV) est un aspect crucial à prendre en compte, étant donné que ces cellules fonctionnent généralement à des températures élevées, souvent supérieures à 300 K. L'exposition constante à un rayonnement thermique intense peut entraîner un chauffage significatif de la cellule, influant directement sur ses performances.

L'augmentation de la température interne de la cellule TPV a plusieurs conséquences importantes. Tout d'abord, elle a un impact sur le courant de court-circuit (I_{cc}) en raison de la réduction de l'énergie de la bande interdite du matériau semi-conducteur. Cette réduction de l'énergie de la bande interdite, notée E_g , permet à la cellule TPV d'absorber plusieurs photons à des longueurs d'onde légèrement plus longues, générant ainsi des paires électron-trou supplémentaires.

Cependant, l'augmentation de la température peut également présenter des défis, notamment une augmentation du courant de saturation inverse (I_{cc}), ce qui peut affecter les performances globales de la cellule. Pour surmonter ces défis, plusieurs méthodes sont employées. L'utilisation de radiateurs et de filtres permet de protéger la cellule de l'effet de thermalisation, limitant ainsi l'impact de l'augmentation de température.

Chapitre 1 : Généralité sur la thermo photovoltaïque

Des systèmes de refroidissement actifs, tels que des dissipateurs thermiques ou le refroidissement par air forcé, sont également couramment utilisés dans de nombreux prototypes de TPV. Ces méthodes visent à maintenir une température optimale pour assurer des performances maximales de la cellule tout en gérant les effets thermiques indésirables.

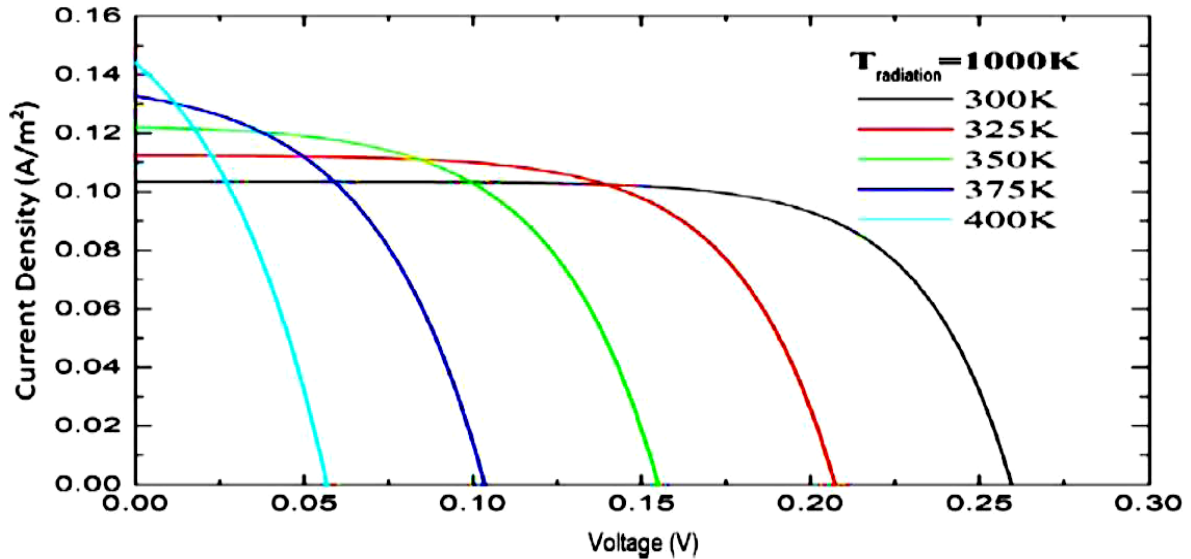


Fig. 1.8. Effet de la température sur la rentabilité des cellules TPV pour une température de rayonnement de 1000K [23].

À une température de chauffage de 1000 K, on observe que les densités de courant en fonction des valeurs de tension changent 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.

1.4.3. Application de la cellule TPV à base de GaSb dans la récupération d'énergie thermique résiduelle :

Les cellules thermo photovoltaïques (TPV) à base de GaSb trouvent des applications prometteuses dans les systèmes de récupération de chaleur résiduelle, particulièrement dans des contextes industriels divers. Les voies de récupération de la chaleur résiduelle dans ces systèmes peuvent prendre différentes formes, s'adaptant aux besoins spécifiques de l'industrie concernée.

Chapitre 1 : Généralité sur la thermo photovoltaïque

Parmi les méthodes couramment utilisées, on trouve les échangeurs de chaleur, les récupérateurs, les chaudières, les réchauffeurs d'air passifs, les régénérateurs et les économiseurs. Les échangeurs de chaleur, par exemple, sont fréquemment déployés pour transférer la chaleur des gaz d'échappement vers l'air de combustion entrant dans un four. Les récupérateurs, eux, sont des échangeurs de chaleur spécialement conçus pour transférer la chaleur résiduelle des gaz de combustion à l'air de combustion. Les chaudières à chaleur résiduelle sont positionnées devant les gaz chauds, chauffant l'eau à l'aide de l'énergie contenue dans les gaz chauds résiduels.

Dans le cadre d'une analyse des systèmes de récupération de la chaleur perdue, Z. Utlu a conçu une structure de cellule solaire TPV utilisant du GaSb. Cette cellule solaire TPV a été appliquée dans des conditions de laboratoire, où la chaleur perdue à haute température est capturée et convertie en électricité. La configuration du système TPV associée à cette application spécifique est illustrée sur la Figure 1.9.

Cette approche démontre comment les cellules TPV, en particulier celles utilisant le matériau semi-conducteur GaSb, peuvent être intégrées de manière efficace dans des systèmes de récupération de chaleur résiduelle. En exploitant la haute température des gaz d'échappement ou des processus industriels, ces cellules TPV offrent une solution pour convertir cette chaleur perdue en électricité utile, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique globale des installations industrielles

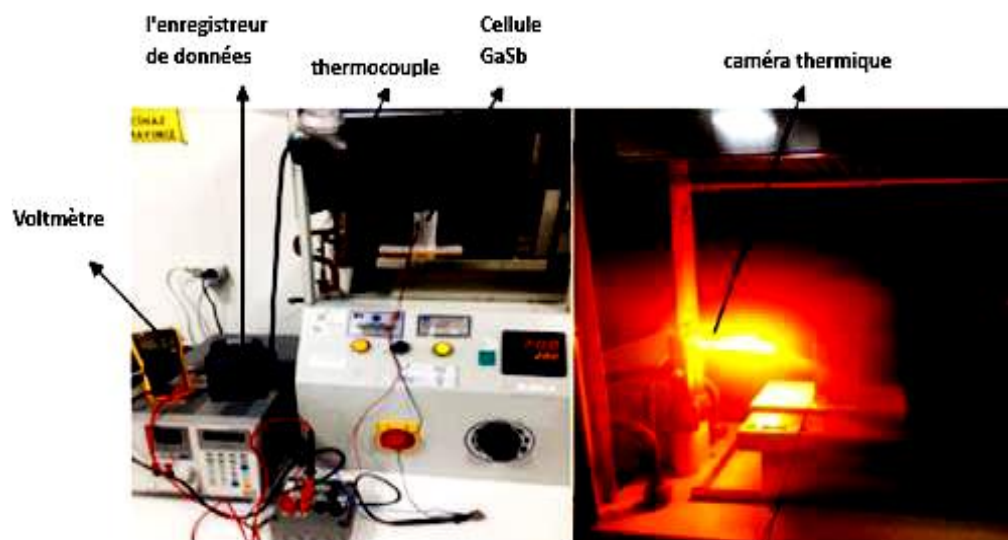


Fig. 1.9. Cellule GaSb TPV pour des applications de récupération de chaleur perdue [23].

Chapitre 1 : Généralité sur la thermo photovoltaïque

1.4.4. L'influence de la température sur le FF de la cellule TPV à base de GaSb :

La Figure 1.10 illustre l'impact du changement de température de la cellule sur le facteur de forme (FF). Une observation notable est que, lorsque la température de la cellule passe de 300 K à une température de chauffage égale à 1 000 K, le facteur de forme atteint environ 70 %. Cependant, lorsque la température de la cellule est de 400 K, le facteur de forme diminue à environ 40 %. Dans ce scénario, on constate que l'augmentation de la température de la cellule s'accompagne d'une diminution du facteur de forme FF. Cette tendance souligne l'influence significative de la température sur les performances de la cellule, où une augmentation de la température est associée à une réduction du facteur de forme, une mesure cruciale pour évaluer l'efficacité de la cellule thermo photovoltaïque.

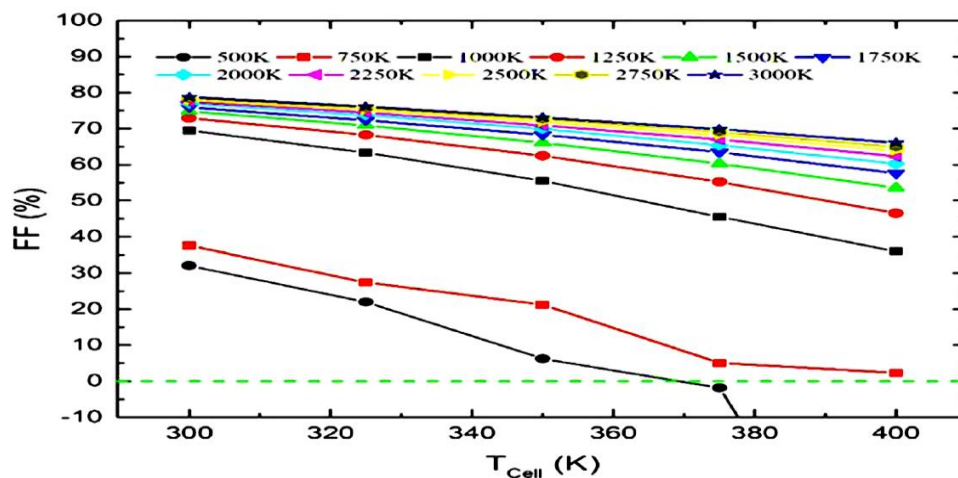


Fig. 1.10. Effet du changement de température sur le FF de la cellule sur l'efficacité de la photocellule GaSb [23].

1.4.5. L'influence de la température sur la cellule TPV à base de GaSb :

La Figure 1.11 présente l'influence du changement de température de la cellule sur l'efficacité du système. À titre d'exemple, lorsqu'on observe une transition de la température de la cellule de 300 K à une température de source de 1 000 K, l'efficacité énergétique atteint environ 1,5 %. Il est important de noter que l'efficacité du système affiche sa valeur maximale lorsque la température de la cellule est basse et que la température de rayonnement est élevée dans des conditions similaires. Cette observation souligne l'importance critique de maintenir une température de cellule plus basse tout en bénéficiant d'une source de rayonnement à une température plus élevée pour optimiser l'efficacité globale du système thermo photovoltaïque.

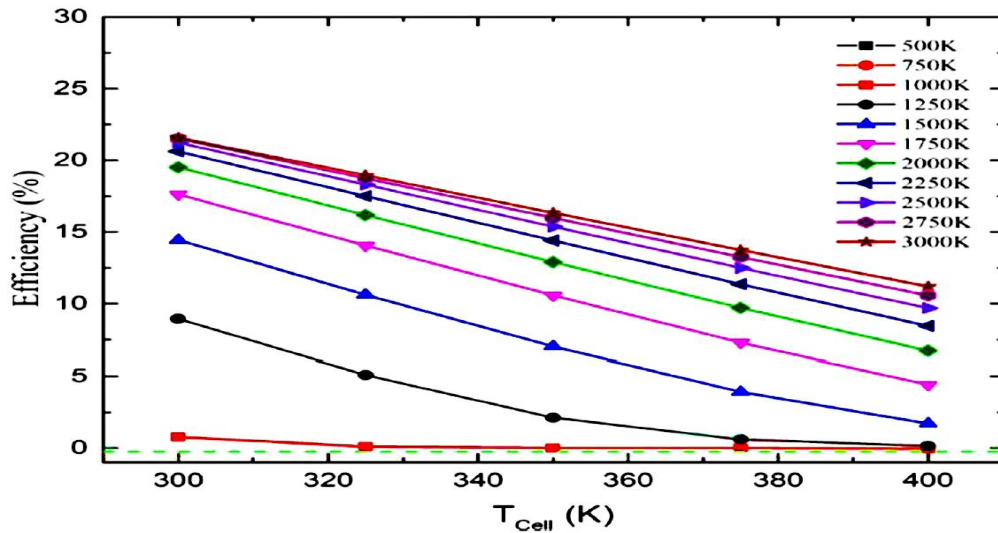


Fig. 1.11. L'influence de la température sur la cellule TPV à base de GaSb [23].

1.4.6. La concordance spectrale avec la bande interdite des matériaux cellulaires TPV :

La non-concordance spectrale dans les systèmes thermo photovoltaïques (TPV) survient lorsque le spectre d'émission d'une source thermique ne s'aligne pas de manière optimale avec la bande interdite du matériau semi-conducteur utilisé dans la cellule TPV. La bande interdite représente l'énergie minimale nécessaire pour générer des paires électron-trou et produire de l'électricité. Une non-concordance spectrale peut entraîner des pertes d'efficacité, car une partie du spectre thermique peut ne pas être absorbée efficacement par le matériau de la cellule. Les chercheurs travaillent à améliorer la concordance spectrale en utilisant des matériaux spécifiques, des revêtements sélectifs et des optimisations de conception pour maximiser l'efficacité de conversion d'énergie dans les systèmes TPV.

La conversion d'électricité dans un système thermo photovoltaïque (TPV) sera maximale lorsque les longueurs d'onde des photons émis par la source thermique sont proches de la longueur d'onde de la cellule photoélectrique (λ_c) d'un matériau spécifique. Pour optimiser cette conversion, on recherche une concordance entre la longueur d'onde critique de la cellule (λ_c) et la longueur d'onde du pic d'émission de la source thermique (λ_p).

La température de fonctionnement appropriée en fonction de l'énergie de la bande interdite peut être exprimée par l'équation suivante [22] :

$$\lambda_c \approx \lambda_p \frac{hc}{E_g} \approx \frac{2900}{T_{bb}} T_{bb} \approx \frac{2900}{1.240} E_g$$

D'où :

Eg : l'énergie de gap ; **c** : vitesse de la lumière ; **TBB** : Température **h** : Constant de Planck

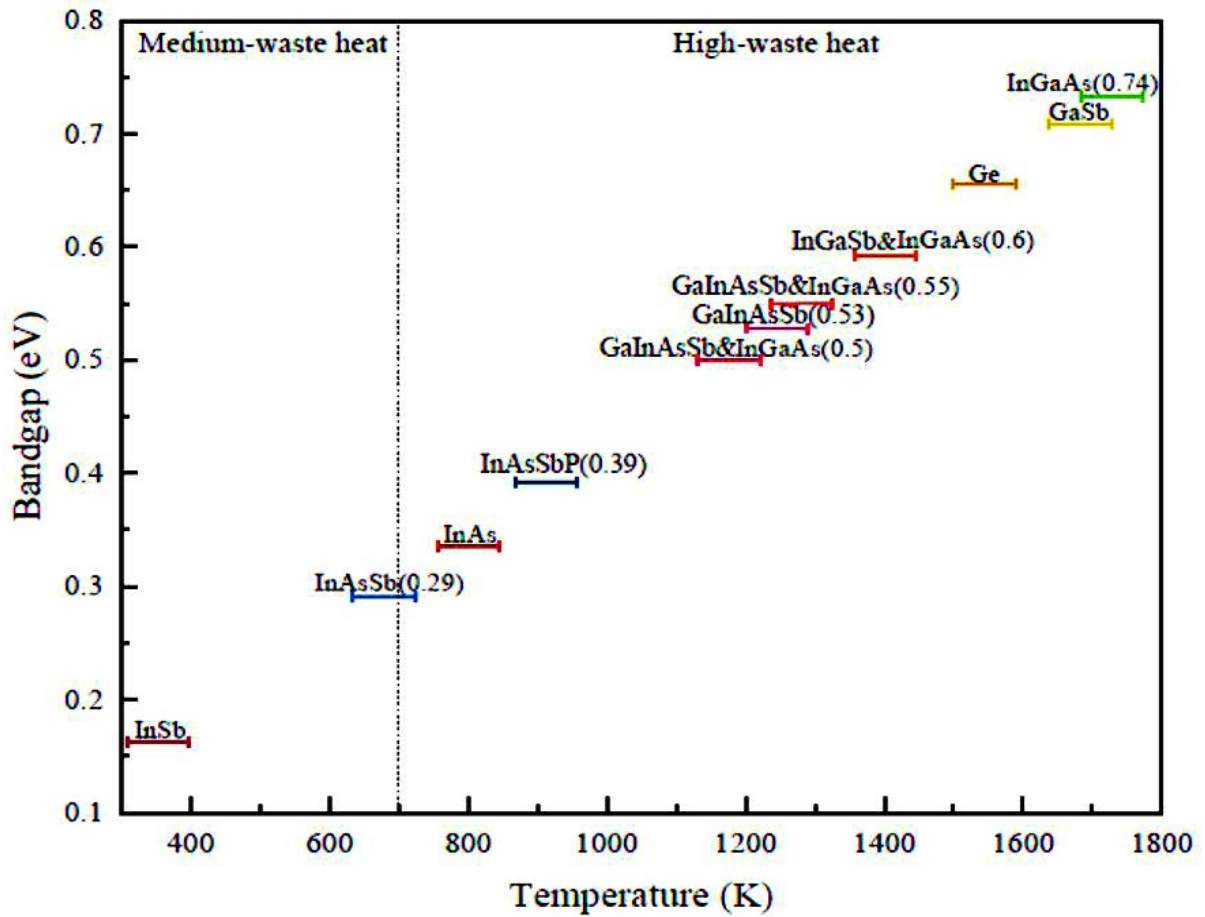


Fig. 1.12. Les cellules TPV et la plage de température du corps noir de leurs performances optimales [22].

Chapitre 2 :

Description du système TPV.

2.1. Le principe de fonctionnement du système TPV :

Le fonctionnement fondamental du système thermo photovoltaïque (TPV) repose sur le principe astucieux d'élever la température d'un solide jusqu'à ce que les rayonnements infrarouges émis correspondent à la longueur d'onde maximale d'efficacité quantique des cellules photovoltaïques (PV) [24]. En d'autres termes, le TPV vise à convertir l'énergie thermique générée par un générateur en électricité. Ce processus est orchestré à travers un système composé d'un générateur, d'un radiateur, d'un filtre et d'un réseau de cellules TPV (Figure 2.1).

Le générateur est chargé de générer de l'énergie à partir de diverses sources de chaleur (P_{source}), transférant ensuite cette énergie vers un radiateur avec une certaine perte de chaleur ($P_{source, perte}$). À ce stade, le radiateur libère des rayonnements thermiques ($P_{rayonnante}$) en direction des cellules PV par l'intermédiaire d'un système optique qui inclut un filtre. Ces rayonnements émis doivent être soigneusement filtrés afin de dépasser la bande interdite des cellules PV avec une puissance correspondante (P_{gap}), malgré la possibilité de pertes ($P_{gap, perte}$) induites par des photons d'énergie inférieure à la bande interdite des cellules PV.

Par la suite, le radiateur récupère ces photons ($P_{récupérée}$) pour maintenir la chaleur et réduire la puissance de la source (P_{source}) à la température requise du radiateur. Enfin, la puissance de sortie (P_{sortie}) est mesurée et distribuée aux réseaux [22]. Cette séquence de procédés reflète le cycle sophistiqué de conversion de l'énergie thermique en électricité au sein du système TPV.

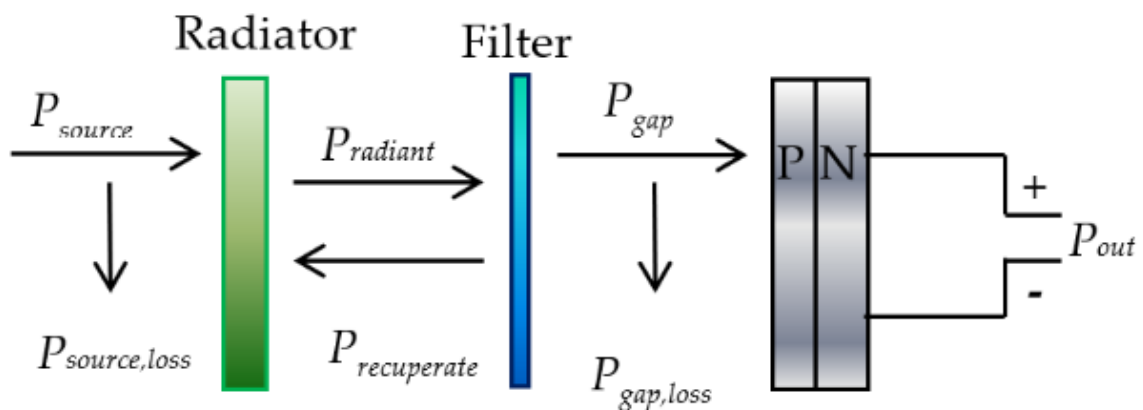


Fig. 2.1. Principe de fonctionnement du système TPV [22].

2.2. Les composition d'un système TPV :

Les systèmes thermo photovoltaïques (TPV) sont complexes et impliquent plusieurs composants pour la conversion d'énergie thermique en électricité. On peut distinguer les grandes catégories suivantes :

2.2.1. Partie de sources chaudes (Générateur Thermique) :

La technologie TPV offre la flexibilité d'utiliser différentes sources de chaleur pour chauffer l'émetteur, à condition que la température atteigne le niveau requis, généralement entre 1000 K et 2000 K, pour la conversion TPV. Diverses études explorent l'utilisation de sources de chauffage conventionnelles et non conventionnelles. Parmi les sources non conventionnelles, on trouve :

Les combustibles Nucléaires [25] :

Explore l'utilisation de la chaleur générée par des combustibles nucléaires pour alimenter le système TPV.

Les Biocarburants [26] :

Considère l'utilisation de la chaleur provenant de biocarburants comme source d'alimentation pour le TPV.

L'énergie solaire [27] :

Investigue la possibilité d'utiliser l'énergie solaire pour chauffer l'émetteur TPV, élargissant ainsi les sources d'énergie renouvelable.

D'un autre côté, parmi les sources de chauffage conventionnelles, on peut citer :

L'énergie fossile [28] :

Implique l'utilisation de combustibles conventionnels pour générer de la chaleur et alimenter le TPV.

Ces différentes approches démontrent la polyvalence de la technologie TPV en adaptant diverses sources de chaleur, allant des combustibles nucléaires aux biocarburants, en passant par l'énergie solaire et les combustibles conventionnels. Chaque source de chauffage présente des avantages et des défis spécifiques, et les recherches dans ce domaine continuent d'évoluer pour optimiser les performances et élargir les applications de la technologie TPV.



Fig. 2.2. Source chaude à carburant [30].

2.2.2. Partie optique :

Le rôle essentiel des systèmes optiques dans les systèmes thermo photovoltaïques (TPV) est de générer, absorber et transmettre les rayonnements thermiques de manière à optimiser la conversion en énergie électrique par les cellules photovoltaïques (PV). Le contrôle spectral joue un rôle fondamental dans ces systèmes, visant à récupérer la partie du spectre de rayonnement qui ne peut pas être convertie en énergie électrique par les cellules. Les surfaces réelles, qui ne se comportent pas comme des corps noirs parfaits, nécessitent une caractérisation approfondie pour guider le choix des rayonnements.

Propriétés des Surfaces Réelles :

Absorptivité (α) : Fraction de l'irradiation absorbée par la surface.

Transmissivité (τ) : Fraction de l'irradiation transmise à travers la surface.

Réfectivité (ρ) : Fraction de l'irradiation réfléchie par la surface.

Émissivité (ϵ) : Rapport des rayonnements émis par la surface sur ceux émis par un corps noir à la même température.

L'équation associée à l'émissivité (ϵ) est définie par :
$$\epsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)}$$

Chapitre 2 : Description du système TPV

Où : $E(T)$ est le rayonnement émis par la surface réelle et $E_b(T)$ est le rayonnement émis par un corps noir à la même température.

Composants du Système Optique TPV [29] :

*Émetteur :

L'émetteur thermique dans un système TPV est souvent composé de matériaux sélectifs d'émission qui absorbent efficacement la chaleur et émettent ensuite des photons dans le spectre infrarouge. Un exemple courant de matériau utilisé pour l'émetteur thermique est le carbure de silicium (SiC). Il est choisi pour sa capacité à fonctionner à des températures élevées tout en maintenant une émissivité élevée dans le spectre infrarouge, ce qui signifie qu'il émet efficacement des photons dans cette plage de longueurs d'onde nécessaires pour l'absorption par les cellules photovoltaïques.

Il existe d'autres matériaux qui pourraient offrir des performances encore meilleures dans certains contextes spécifiques pour les émetteurs thermiques dans les systèmes TPV. Voici quelques matériaux qui pourraient être considérés comme des concurrents potentiels au SiC :

Nitride de bore (BN) : Le nitride de bore est un autre matériau céramique qui possède d'excellentes propriétés thermiques, une conductivité thermique élevée et une résistance à haute température. Il peut être utilisé dans des environnements extrêmes et pourrait être une alternative intéressante pour les applications TPV.

Nitride de gallium (GaN) : Le nitride de gallium est un semi-conducteur à large bande interdite avec des propriétés optiques et électroniques uniques. Bien qu'il soit plus couramment utilisé dans les domaines de l'électronique de puissance et des LED, ses propriétés pourraient être exploitées dans des systèmes TPV pour des applications spécifiques.

Tungstène (W) : Le tungstène est un métal réfractaire connu pour sa très haute température de fusion et sa résistance à la corrosion.

Il pourrait être utilisé dans des configurations d'émetteurs thermiques TPV nécessitant une robustesse et une durabilité extrêmes.

Platine (Pt) : Bien que coûteux, le platine est un excellent émetteur thermique en raison de son haut coefficient d'émissivité et de sa stabilité à haute température. Il pourrait être envisagé pour des applications haut de gamme nécessitant des performances maximales.

-Émetteurs sélectifs : Bande interdite étroite, émissivité élevée en correspondance de la bande interdite de la cellule TPV.

-Émetteurs à large bande : Émissivité élevée sur tout le spectre de rayonnement.

Matériaux couramment utilisés : carbure de silicium (SiC), céramiques, métaux.

***Filtre :**

Il transmet généralement les photons d'énergie supérieure à la bande interdite de la cellule TPV.

Catégories de filtres : Verre de quartz, filtres interférentiels, filtres à plasma à base d'oxydes conducteurs transparents (TCO), filtres à surface sélective en fréquence (**FSS**).

***Réflecteur Cellule de Surface Arrière :**

Couche en or utilisée pour renvoyer les photons vers l'émetteur qui traverseraient les cellules.

L'ensemble de ces composants vise à maximiser l'efficacité du système TPV en contrôlant le spectre de rayonnement, en réduisant les pertes et en optimisant la conversion d'énergie thermique en électricité. Cette approche professionnelle assure une ingénierie précise des composants optiques pour répondre aux exigences spécifiques du système TPV.



Fig. 2.3. Emetteur thermique [31].

2.2.3. Partie électrique :

La phase électrique du système Thermo photovoltaïque (TPV) orchestre la transformation de l'énergie thermique émise par l'émetteur en électricité utilisable. Voici une perspective alternative sur cette partie cruciale du système TPV :

***Conversion au Niveau des Cellules Photovoltaïques (PV) :**

Les cellules PV, disposées en réseau, agissent comme des convertisseurs d'énergie, transformant les rayonnements thermiques infrarouges en électricité à travers le phénomène photovoltaïque, la sélection des matériaux pour les cellules PV, tels que le GaSb ou l'AsSb, détermine l'efficacité de conversion dans la plage de longueurs d'onde spécifique.

***Contrôle et Régulation du Système :**

Un système de contrôle surveille en temps réel divers paramètres tels que la température des cellules PV, ajustant les conditions opérationnelles pour optimiser les performances.

Chapitre 2 : Description du système TPV

Les capteurs intégrés assurent une régulation précise, garantissant un fonctionnement stable et efficient du système TPV.

***Mesure de l'Électricité Générée :**

Des dispositifs de mesure évaluent la puissance de sortie du système TPV, fournissant des données essentielles sur la performance globale. Ces mesures permettent également de diagnostiquer d'éventuels problèmes opérationnels et d'optimiser l'efficacité du système.

***Adaptation du Courant Continu (CC) au Courant Alternatif (AC) :**

Si l'électricité générée est en courant continu (CC), un onduleur intervient pour la convertir en courant alternatif (AC). Cette conversion rend l'électricité compatible avec les applications domestiques et les réseaux électriques.

***Stockage de l'Énergie (Facultatif) :**

Les systèmes TPV peuvent intégrer des dispositifs de stockage d'énergie, tels que des batteries, pour accumuler l'électricité produite. Ceci permet une utilisation ultérieure en l'absence de rayonnement thermique, offrant une certaine autonomie au système.

***Distribution de l'Électricité :**

L'électricité générée peut être utilisée localement pour alimenter des appareils ou être injectée dans le réseau électrique. Des mécanismes de distribution garantissent une intégration harmonieuse avec le réseau ou une utilisation directe, selon les besoins.

Cette séquence de processus électriques dans un système TPV illustre la conversion efficace de l'énergie thermique en une forme d'énergie largement utilisable, contribuant ainsi à la durabilité et à la diversification des sources d'énergie.

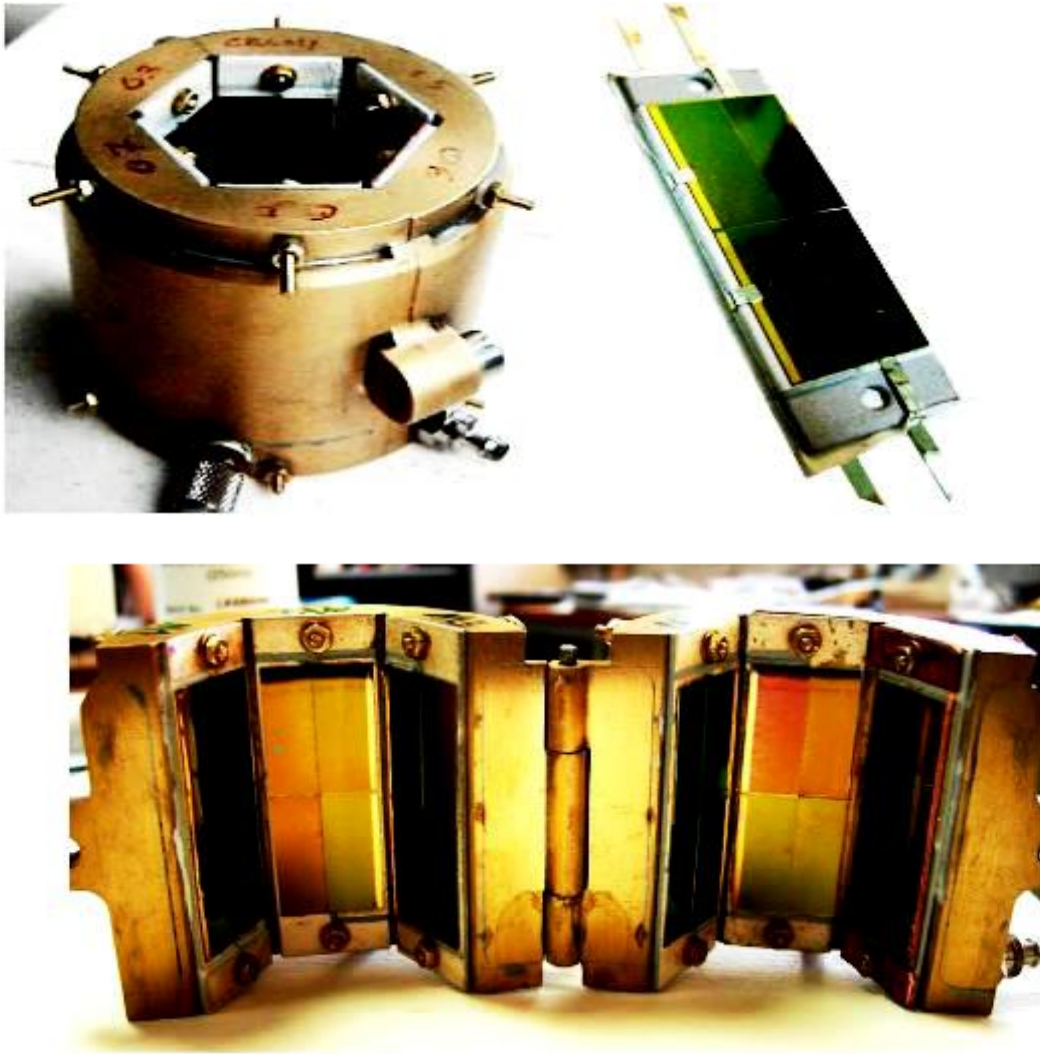


Fig. 2.4. Cellules photovoltaïques à base de GaSb [32].

2.2.4. Partie de gestion thermique :

La partie de gestion thermique dans un système thermo photovoltaïque (TPV) joue un rôle fondamental dans l'optimisation des performances globales. Cette section vise à assurer un contrôle précis des températures pour les composants clés tels que les cellules photovoltaïques (PV) et le générateur thermique. En maintenant des conditions thermiques idéales, la gestion thermique contribue à maximiser l'efficacité de la conversion d'énergie thermique en électricité. Les principaux aspects de la gestion thermique incluent la récupération de chaleur et le système de refroidissement, chacun jouant un rôle spécifique dans l'optimisation des performances du système TPV.

*Système de Récupération de Chaleur :

Le système de récupération de chaleur dans un système TPV est conçu pour récupérer l'énergie thermique résiduelle générée pendant le processus de conversion. Voici comment il opère :

- Captation de l'Énergie Thermique Résiduelle :

La chaleur produite mais non convertie en électricité par les cellules PV est récupérée par le système de récupération de chaleur.

- Réutilisation de la Chaleur :

La chaleur récupérée peut être réutilisée pour maintenir la température du générateur à un niveau optimal, assurant une stabilité opérationnelle même en cas de variations de la demande d'électricité.

- Amélioration de l'Efficacité :

En récupérant cette chaleur, le système global devient plus efficace, réduisant ainsi les pertes d'énergie thermique inutiles.

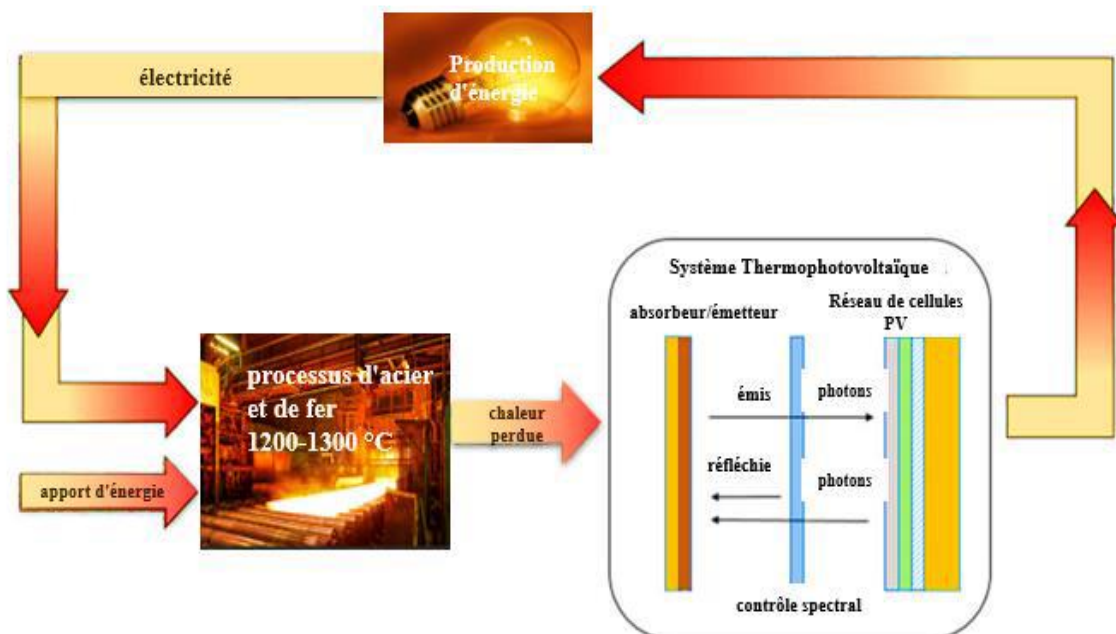


Fig. 2.5. Récupération de la chaleur perdue [33].

***Système de refroidissement :**

Le système de refroidissement dans un système thermo photovoltaïque (TPV) joue un rôle crucial en maintenant des conditions de température optimales pour les composants clés, en particulier les cellules photovoltaïques (PV). Voici une explication plus détaillée :

- Optimisation des Performances :

Les cellules PV ont des performances optimales à des températures spécifiques. Un système de refroidissement est intégré pour maintenir ces températures idéales, garantissant ainsi une conversion maximale de l'énergie thermique en électricité.

- Dissipation de la Chaleur :

Lorsque les cellules PV convertissent l'énergie thermique en électricité, une partie de cette énergie se dissipe sous forme de chaleur. Le système de refroidissement évacue cette chaleur, évitant la surchauffe qui pourrait diminuer l'efficacité des cellules PV.

- Circulation de Fluides ou d'Air :

Les systèmes de refroidissement peuvent utiliser des circuits de liquide ou d'air pour transférer la chaleur générée loin des cellules PV. La circulation du fluide de refroidissement contribue à maintenir des températures constantes.

- Échangeurs Thermiques :

Des échangeurs thermiques, tels que des radiateurs, facilitent le transfert de chaleur du système vers l'environnement. Ces échangeurs optimisent le processus de dissipation thermique.

- Surveillance et Régulation :

Des capteurs de température surveillent en permanence la température des cellules PV et d'autres composants sensibles. Les systèmes de régulation ajustent la vitesse de fonctionnement du système de refroidissement en fonction des variations de température, garantissant un fonctionnement optimal.

2.3. Exemple d'un système TPV à combustion :

Le processus débute dans la chambre de combustion, où des combustibles tels que le gaz naturel sont brûlés. Cette combustion génère une chaleur considérable. L'échangeur de chaleur capte cette énergie thermique, permettant à l'émetteur d'atteindre des températures élevées allant de 1000 K à 2000 K. L'émetteur, ainsi chauffé, émet un rayonnement infrarouge (IR) dirigé vers les dispositifs thermo photovoltaïques (TPV). Ces dispositifs convertissent efficacement le rayonnement IR en courant électrique, réalisant ainsi la transformation directe de la chaleur en électricité. Pour maintenir l'émetteur à des niveaux de température optimaux, un circuit de refroidissement, utilisant généralement de l'eau, dissipe la chaleur excédentaire. L'électricité générée alimente le site en énergie électrique, tandis que la chaleur résiduelle peut également être utilisée pour la production d'eau chaude. En adoptant cette approche, le système minimisant le besoin énergétique contribue simultanément à la réduction des émissions atmosphériques, présentant une solution énergétique polyvalente et respectueuse de l'environnement.

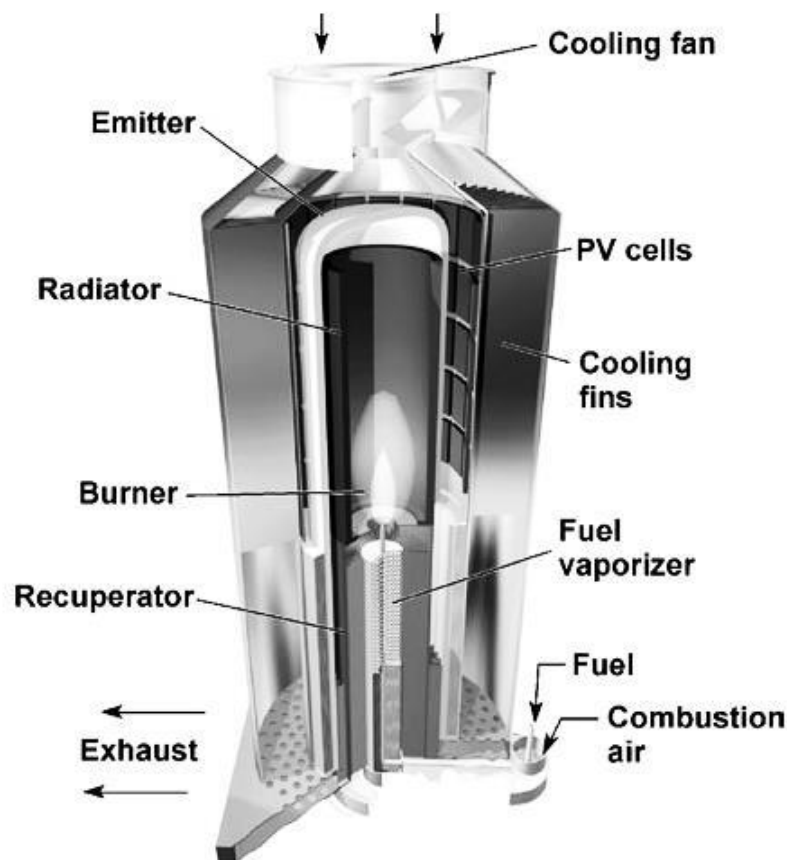


Fig. 2.6. Système TPV à combustion [34]

2.4. Récupération d'Énergie dans l'Industrie par Système TPV Cas de SONATRACH :

Le système de récupération thermo photovoltaïque (TPV) trouve une application prometteuse dans l'industrie pétrolière, notamment à la raffinerie d'Arzew de SONATRACH. Ce système innovant vise à convertir la chaleur perdue en électricité, avec un accent particulier sur la récupération des sources thermiques. Voici une vue détaillée des composants clés du système TPV-carburant :

- Brûleur :

Le point de départ est le brûleur, où des combustibles tels que le gaz naturel génère une puissance thermique significative.

- Échangeur de Chaleur :

L'échangeur de chaleur est essentiel pour récupérer l'enthalpie des gaz d'échappement, augmentant ainsi l'efficacité du processus.

Cette récupération préchauffe l'air entrant, optimisant le rendement énergétique.

- Chambre de Combustion :

La chambre de combustion permet de contrôler la température et de favoriser une combustion efficace du combustible.

- Émetteur :

L'émetteur, chauffé par la combustion, émet un rayonnement infrarouge dirigé vers les dispositifs TPV.

- Cellules TPV :

Ces cellules convertissent le rayonnement infrarouge en électricité, effectuant ainsi une transformation directe de la chaleur en énergie électrique.

En intégrant ce système TPV à la raffinerie d'Arzew, l'objectif est double : produire de l'électricité tout en exploitant la chaleur résiduelle pour répondre aux besoins en eau chaude. Cette approche novatrice aligne l'industrie pétrolière avec des pratiques énergétiques

durables, offrant un modèle de récupération efficace au sein d'une installation industrielle de grande envergure.

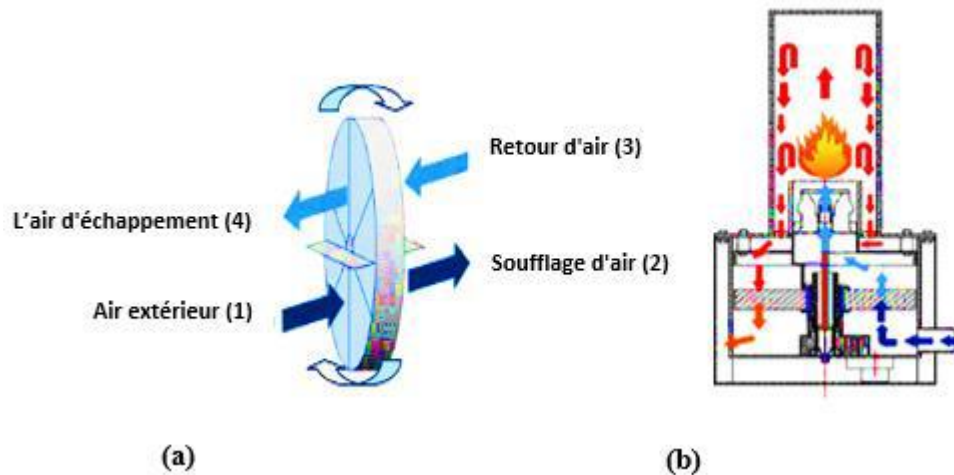


Fig. 2.7. Système TPV à combustion avec refroidissement [35].

2.5. Evolutions technologiques :

Les évolutions technologiques dans le domaine des systèmes thermo photovoltaïques (TPV) sont souvent axées sur l'amélioration de l'efficacité, la réduction des coûts et l'expansion des applications potentielles. Voici quelques-unes des tendances et des évolutions technologiques récentes dans ce domaine :

Innovation des Matériaux : L'évolution des cellules photovoltaïques s'articule autour de l'exploration de matériaux novateurs, notamment les pérovskites et les nanomatériaux, visant à améliorer l'efficacité de conversion tout en réduisant les coûts de production.

Conception Avancée des Cellules TPV : Des recherches approfondies sont menées pour optimiser la conception des cellules TPV, intégrant des architectures innovantes et des techniques de micro fabrication pour maximiser la capture de la lumière solaire et améliorer le rendement global.

Gestion Thermique Raffinée : Les avancées en matière de gestion thermique se concentrent sur le développement de matériaux thermiques de pointe et de systèmes de refroidissement

efficaces afin de maintenir des conditions optimales et d'optimiser la conversion d'énergie [36].

Intégration de Stockage d'Énergie : L'intégration de technologies de stockage d'énergie avancées, telles que les batteries lithium-ion, vise à accroître la fiabilité des systèmes TPV en permettant le stockage et la distribution d'énergie pendant des périodes sans ensoleillement.

Automatisation et Contrôle Intelligent : Les progrès dans l'automatisation et les systèmes de contrôle intelligent permettent une gestion plus sophistiquée des systèmes TPV, offrant une adaptabilité en temps réel aux conditions météorologiques changeantes et à la demande énergétique.

Miniaturisation et Intégration : L'accent est mis sur la miniaturisation des composants des systèmes TPV pour faciliter leur intégration dans divers contextes, y compris les applications embarquées et les dispositifs électroniques.

Hybridation avec d'Autres Technologies : Les recherches explorent les avantages de l'hybridation des systèmes TPV avec d'autres technologies, telles que les systèmes photovoltaïques traditionnels, les systèmes solaires thermiques et les systèmes de cogénération, pour optimiser l'efficacité énergétique.

Électronique de Puissance Avancée : L'utilisation de composants électroniques de puissance avancée vise à maximiser l'efficacité de la conversion et du transfert d'énergie au sein des systèmes TPV.

En adoptant ces avancées technologiques, le secteur des systèmes thermo photovoltaïques progresse vers des solutions plus sophistiquées, durables et compétitives sur le marché de l'énergie renouvelable.

Chapitre 3 :

Simulation et optimisation du système thermo photovoltaïque.

Chapitre 3 : Simulation et optimisation du système TPV

Dans ce chapitre, nous allons détailler la modélisation et la formulation des systèmes TPV, en expliquant la méthode de simulation ainsi que le concept de géométrie et les modèles de formulation théorique utilisés dans chaque composante pour créer un système d'étude en deux dimensions (2D) avec un format circulaire.

3.1. Présentation de logiciel d'étude :

Le logiciel sélectionné pour notre étude est COMSOL Multiphysics. Ce logiciel est spécifiquement conçu pour la modélisation et la simulation de divers phénomènes physiques tels que le transfert de chaleur, la mécanique des fluides, l'acoustique, l'électrostatique, les écoulements de fluides et la déformation des matériaux. Il résout les équations aux dérivées partielles en utilisant la méthode des éléments finis. Aujourd'hui, il dispose de son propre environnement graphique permettant la création de géométries et l'affichage des résultats en post-traitement. Notre étude sur le système thermo photovoltaïque a été menée conformément à la configuration illustrée dans la *Figure 3.1*

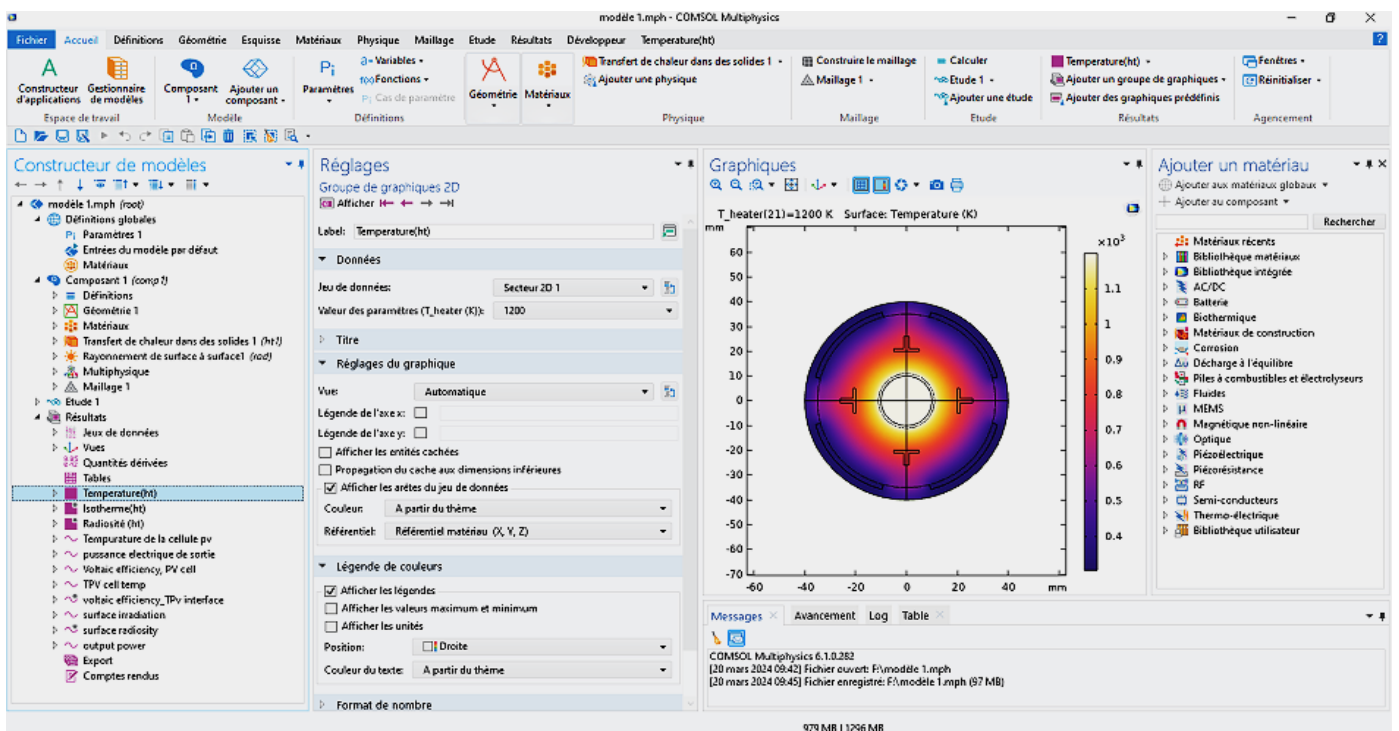


Fig. 3.1. Présentation de la géométrie étudiée dans COMSOL Multiphysics [41].

3.2. Modélisation d'un système TPV :

3.2.1. Les matériaux utilisés dans notre système TPV :

- Le carbure de silicium (SiC) est reconnu comme le matériau idéal pour les émetteurs des systèmes de conversion énergétique thermo photovoltaïque (TPV). Une étude expérimentale sur le carbure de silicium Hexoloy de type SA a montré une émissivité moyenne de 0,8 avec une précision de +/- 5 % dans la plage de température de 600 à 1200 °C.
- Les miroirs chauds, qui réfléchissent le rayonnement infrarouge tout en transmettant la lumière visible, sont également inclus dans le modèle TPV. Nous avons choisi un miroir chaud de type carré à 0° d'angle d'incidence et avec une épaisseur de 1,1 mm, basé sur un substrat BOROFLUAT 33.
- Pour l'isolation thermique des batteries thermo photovoltaïques à chaleur latente, des matériaux peu coûteux comme les plaques de silice pyrogénées sont utilisés. Dans notre modèle, un panneau de silice pyrogéné de 5 mm d'épaisseur est considéré comme matériaux d'isolation pour les cellules photoélectriques.
- On a travaillé avec la cellule GaSb qui est largement reconnue comme le meilleur matériau pour les travaux dans ce domaine. Sa combinaison unique de propriétés électriques et thermiques en fait un choix optimal pour les applications thermo photovoltaïques. Son efficacité élevée, sa réponse sensible aux variations de température, et sa capacité à maintenir des performances stables dans une large gamme de conditions en font un élément essentiel pour les systèmes de conversion énergétique, notamment dans le cadre de la recherche menée actuellement.

Z. Utlu [23] a révélé, à travers une étude expérimentale, une efficacité énergétique optimale de 21,57 % pour les cellules photoélectriques GaSb à une température de cellule (T_c) de 300 K, avec une diminution de l'efficacité jusqu'à 15 % lorsque la température de la cellule atteint 400 K. Pour exprimer cette efficacité optimale à 300 K, nous utilisons également la valeur $\eta = 0,2157$ dans l'expression suivante :

$$\frac{\eta(T_c)}{\eta(300K)} = \begin{cases} 1.63798 + 0.00288.T_c - 2.41843.10^{-5}.T_c^2 + 2.48039.10^{-8}.T_c^3, R^2 & \text{pour } 300K \leq T_c \leq 600K \\ 0 & \text{pour } T_c > 600K \end{cases} \quad [49]$$

Chapitre 3 : Simulation et optimisation du système TPV

Toutes les propriétés thermoélectriques des matériaux utilisés dans ce système sont mentionnés dans le **tableau 3.2**

Composante	Conductivité thermique k [W/(m K)]	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique C_p (kJ/kg K)	Emissivité ϵ	Référence
Emetteur (SiC)	120	3100	0.75	0.8	[42]
Miroir	1.2	2230	0.83	0.01	[43]
Cellule (GaSb)	32	5614	0.25	1	[44]
Isolateur	0.021	180	0.9	0.1	[45]

3.2. Tableau des propriétés thermo électriques utilisés dans la simulation.

3.2.2. Les paramètres à optimiser dans la simulation :

Les paramètres utilisés dans la simulation de notre système TPV sont mentionnés dans le **tableau 3.3**

Paramètre	Valeur	Description
C_p air	1100 J kg ⁻¹ K ⁻¹	Capacité thermique de l'air
h_{air}	5 W/m ² K	Coefficient de transfert de chaleur de l'air
h_c	500 W/m ² K	Coefficient de transfert de chaleur
T_{air}	293 K	Température de l'air
$T_{émetteur}$	1000 – 1800 K	Température de l'émetteur
$E_{émetteur}$	1 – 10 mm	Epaisseur de la couche d'émetteur
E_{cell}	2 – 4 mm	Epaisseur de la couche de cellule

3.3. Tableau des paramètres utilisés dans la simulation [46].

3.2.3. La géométrie du système à étudier :

Dans notre étude, on va simuler avec une géométrie circulaire 2D comme illustré sur la Figure 3.4

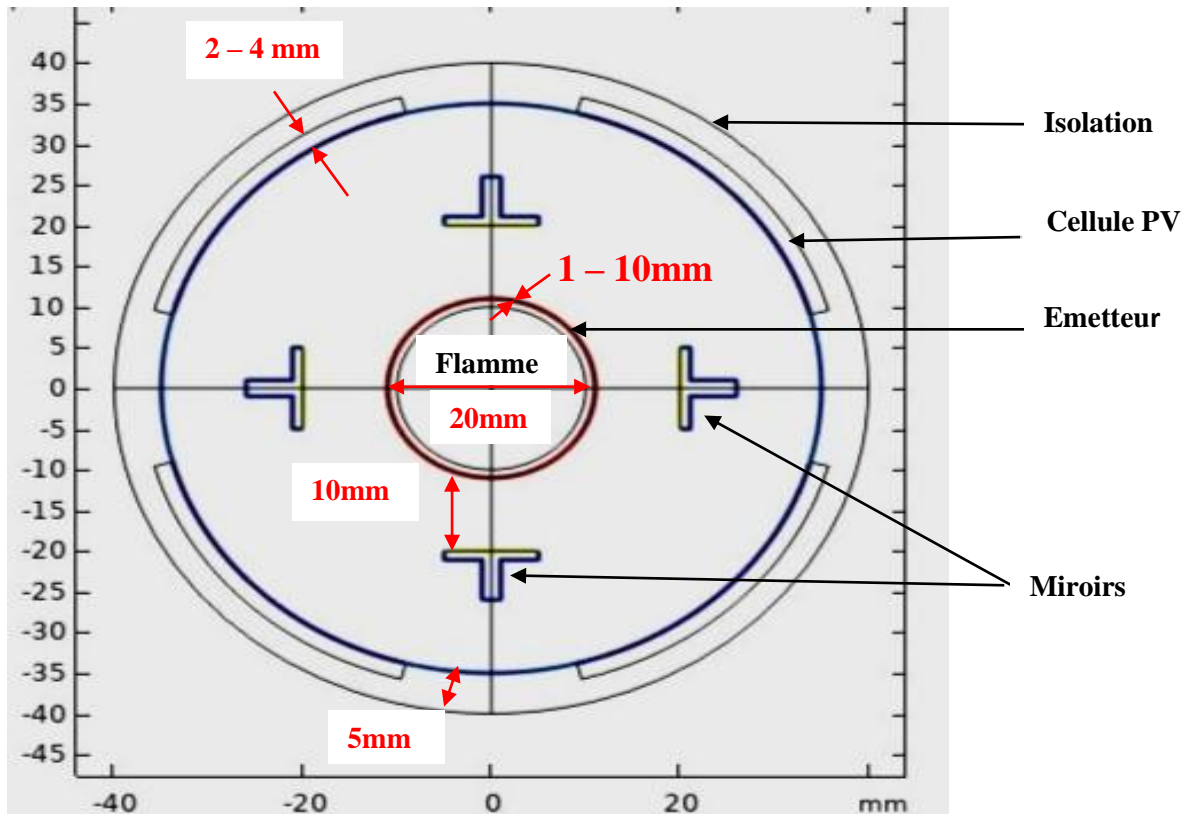


Fig. 3.4. La géométrie du système TPV modélisé.

Le processus de conception et d'optimisation des systèmes de conversion et de transport entre le concentrateur, l'émetteur, le filtre spectral, les cellules PV et le sous-système de refroidissement a conduit à plusieurs conclusions importantes :

Premièrement, il a été observé que la température de l'émetteur de forme sphérique est généralement plus élevée en raison de sa configuration concave distinctive. Toutefois, pour les systèmes STPV, il est recommandé d'opter pour un émetteur cylindrique en raison de sa stabilité de performance supérieure par rapport à d'autres configurations d'émetteurs. L'objectif principal est de créer une différence de température

significative à travers l'émetteur dans son ensemble afin d'optimiser l'efficacité du système.

Deuxièmement, le filtre spectral joue un rôle crucial dans les systèmes TPV en recyclant l'énergie du rayonnement. Il est donc essentiel de sélectionner et de concevoir soigneusement le filtre spectral pour maximiser le rendement énergétique du système.

3.2.4. Système de refroidissement :

Il est très important de placer un système de refroidissement performant est indispensable pour maintenir la température des cellules PV en dessous de 50°C. Cela est nécessaire car une augmentation de la température des cellules PV peut entraîner une diminution de la puissance électrique de sortie ainsi qu'une réduction de l'efficacité globale du système. Par conséquent, des stratégies de refroidissement efficaces doivent être mises en place pour garantir le bon fonctionnement et la longévité du système TPV. Dans cette simulation on a utilisé un système de refroidissement par eau à convection forcée qui a été prouvé l'année dernière [49], tel que le coefficient de transfert thermique convectif a atteint des valeurs entre 1000-15000 W/m²K°, par contre le refroidissement par eau à convection naturelle qui a marqué des valeurs entre 200 et 1000 W/m²K° et le refroidissement par air basé sur un dissipateur thermique et un ventilateur qui a marqué une valeur de 250 W/m²K°

3.2.5. Les formules mathématiques utilisées :

-Transfert de chaleur dans les solides :

$$\rho \cdot Cp \cdot u \cdot \Delta T + \Delta Q = Q + Q_{ted}; q = -k\Delta T \quad (1)$$

-Isolation thermique : $-nq = 0$ (2)

-Transfert de chaleur dans les fluides :

$$\rho \cdot Cp \cdot u \cdot \Delta T + \Delta Q = Q + Q_p + Q_{vd}; q = -k\Delta T \quad (3)$$

-Flux de chaleur : $-nq = q_0$; $q_0 = h(T_{ext} - T)$ (4)

-Source de chaleur limite : $-nq = Q_b$ (5)

-Surface de diffuse :

$$J = \varepsilon e_b(T) + \rho_d G \quad (6)$$

$$\varepsilon + \rho_d = 1 \quad (7)$$

$$G = G_m + G_{amb} + G_{ext} \quad (8)$$

$$G_{amb} = F_{amb} \cdot e_b(T_{amb}) \quad (9)$$

$$G_{ext} = q_s \quad (10)$$

$$e_b(T) = n^2 \delta T^4 \quad (11)$$

$$q_{r;net} = \varepsilon(G - e_b(T)) \quad (12)$$

$$\text{-Rayonnement surface-ambient : } -nq = \varepsilon\delta(T_{amb}^4 - T^4) \quad (13)$$

$$\text{-Transfert de chaleur avec rayonnement de surface a surface : } -nq = q_{r;net} \quad (14)$$

[48].

La figure 3.5 présente que les cellules PV sont refroidies par conduction forcée entre le coté arrière et la surface de l'isolant avec un circuit fermé.

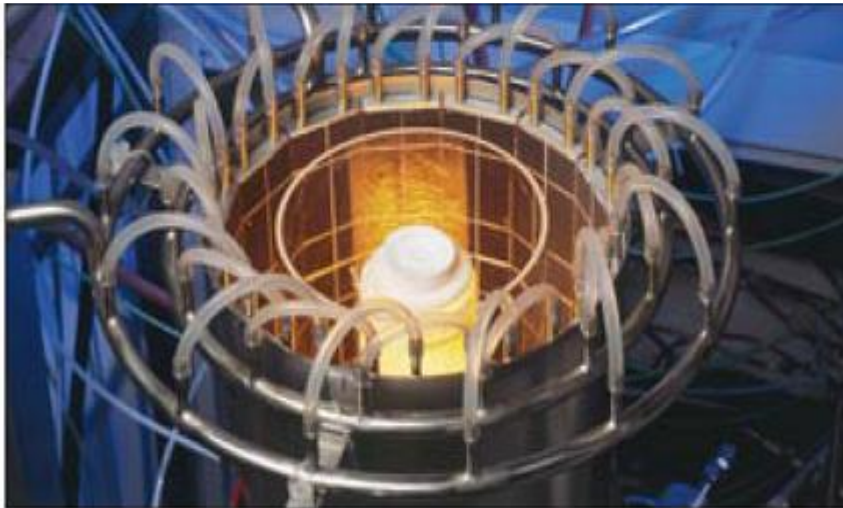


Fig. 3.5. Modèle d'un système de refroidissement [47].

3.3. Introduction aux méthodes numériques :

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation vise à transformer la résolution d'une équation aux dérivées partielles (EDP) dans un domaine donné, en prenant en compte les conditions aux limites, en un système d'équations algébriques. La solution de ce système conduit à la distribution des champs à l'intérieur du domaine d'étude. Pour passer d'un problème continu exact régi par une EDP à un problème discret approché, trois grandes familles de méthodes sont couramment utilisées :

3.3.1. Les différences finies :

La méthode implique de substituer les dérivées partielles par des différences divisées ou des combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un ensemble de points discrets ou de nœuds du maillage.

- **Avantages** : simplicité d'écriture et faible coût de calcul.

- **Inconvénients** : adaptée à des géométries simples.

3.3.2. Les volumes finis :

La méthode consiste à intégrer les équations, exprimées sous forme de lois de conservation, sur des volumes élémentaires de forme simple. Cela génère naturellement des approximations discrètes conservatrices et convient particulièrement bien aux équations de la mécanique des fluides. Son implémentation est simple avec des volumes élémentaires rectangulaires. - - - -

- **Avantages** : capable de traiter des géométries complexes avec des volumes de forme quelconque et permet une détermination plus naturelle

- **Inconvénient** : peu de résultats théoriques de convergence.

3.3.3. La méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis qu'on va l'utiliser souvent dans notre travail permet de calculer les grandeurs physiques pour chaque point d'une structure en subdivisant le volume ou la surface d'étude en éléments finis interconnectés par des nœuds [37]. Les solutions sont calculées pour chaque nœud, puis interpolées à l'intérieur de chaque élément à partir des résultats des nœuds limitant cet élément. Ce processus transforme le problème continu en un ensemble de problèmes discrets avec un nombre fini d'inconnues, facilitant ainsi la résolution des équations aux dérivées partielles sous forme matricielle [38].

Domaine d'application :

La méthode des éléments finis trouve des applications dans une multitude de domaines de la physique, couvrant la mécanique, l'électronique, la thermique, la météorologie, et bien d'autres encore [39][40], notamment :

- Mécanique du solide
- Mécanique des fluides
- Transfert de chaleur
- Réaction chimique
- Circuits électriques

3.3.4. Analyse Approfondie du Maillage dans la Simulation :

L'utilisation efficace des éléments finis revêt une importance capitale pour garantir des simulations précises et fiables. En adaptant le maillage à la géométrie spécifique du problème, nous pouvons obtenir des résultats de simulation hautement précis tout en optimisant l'utilisation des ressources informatiques disponibles. La capacité à gérer des géométries complexes et à offrir des outils de maillage automatique et manuel nous permet de modéliser avec précision des systèmes comportant des caractéristiques variées. De plus, la flexibilité du maillage nous permet aussi de nous adapter aux différentes physiques impliquées dans le problème, assurant ainsi une modélisation précise et réaliste. Enfin, la possibilité d'effectuer des analyses de sensibilité basées sur le maillage nous permet d'évaluer l'impact des variations de maillage sur les résultats de simulation, renforçant ainsi la fiabilité et la validité des modèles. En somme, dans un environnement professionnel, les éléments finis représentent un pilier essentiel pour mener à bien des simulations complexes et obtenir des résultats précis qui orientent les décisions et les développements technologiques.

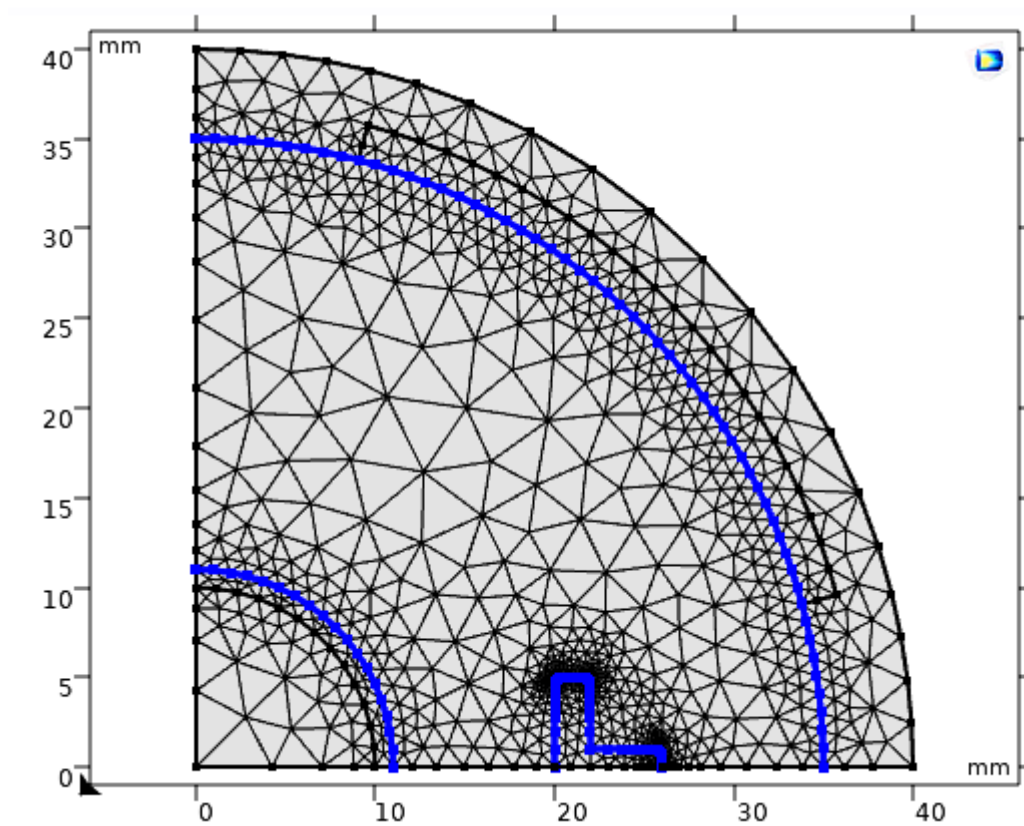


Fig. 3.6. Schéma d'un maillage triangulaire et grossier.

Chapitre 4 :

Résultats et discussions.

4.1. Optimisation de l'épaisseur de l'émetteur thermique :

4.1.1. Etude de la puissance de sortie :

Dans la **figure 4.1** on peut constater que pour les épaisseurs de 1mm, 3mm et 5mm, on a un pic de $P = 4873 \text{ W/m}^2$ à une température de l'émetteur = 1500K suivi par une chute libre rapide, ainsi que pour l'épaisseur de 10mm on a un pic de $P = 4841 \text{ W/m}^2$ mais à une température de l'émetteur = 1600K suivi par une diminution un peu lente.

Interprétation :

Pour les épaisseurs plus fines, l'augmentation de la température peut entraîner une augmentation rapide de l'absorption de chaleur, atteignant un maximum à 1500K, mais au-delà de cette température, l'émission de chaleur va diminuer, ce qui expliquerait la chute rapide de la puissance de sortie. En revanche, pour 10mm d'épaisseur, l'augmentation de la température permet une absorption et une émission de chaleur plus efficaces à des températures plus élevées ($\geq 1600\text{K}$), ainsi que la dissipation de chaleur est plus efficace dans le cas des matériaux les plus épais grâce à ces résistivités thermiques. Et concernant la diminution lente de la puissance de sortie, elle est due à la grande masse thermique des émetteurs épais qui peuvent accumuler plus de chaleur avant d'atteindre un équilibre thermique et une stabilité dans l'émission de chaleur.

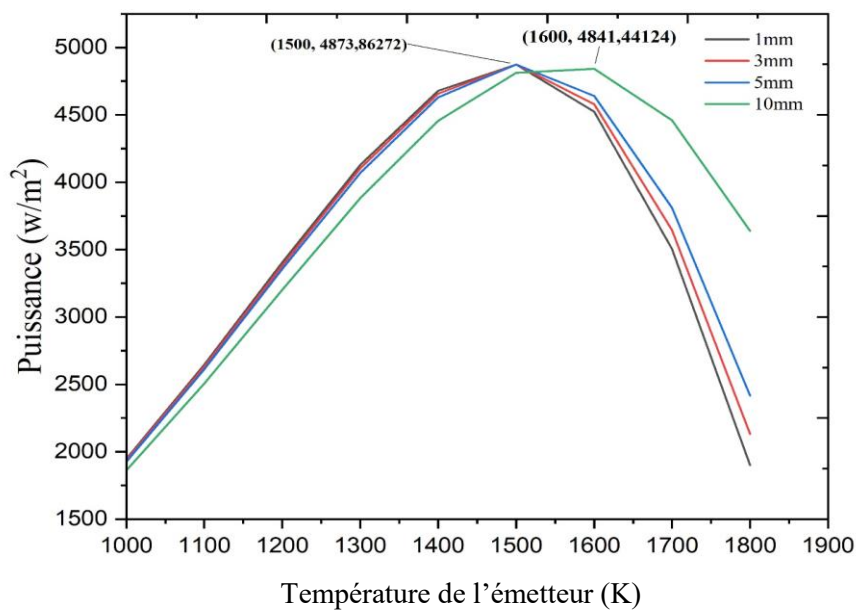


Fig. 4.1. Variation de la puissance de sortie pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

4.1.2. Etude de rendement du système TPV :

La **figure 4.2** illustre comment le rendement du système TPV évolue en fonction de l'épaisseur et la température de l'émetteur thermique ce qui nous permet de voir qu'il y a une diminution progressive pour toutes les épaisseurs simulées entre $T_{\text{émetteur}} = 1000\text{K}$ et $T_{\text{émetteur}} = 1800\text{K}$

-Dans le cas de 1mm d'épaisseur, le rendement varie entre 21.1% et 1.9%.

-Dans le cas de 3mm d'épaisseur, le rendement varie entre 21.1% et 2.7%.

-Dans le cas de 5mm d'épaisseur, le rendement varie entre 21.2% et 2.7%.

-Dans le cas de 10mm d'épaisseur, le rendement varie entre 21.3% et 4.9%.

Interprétation :

Ces résultats montrent que les épaisseurs importantes peuvent mieux améliorer et maintenir le rendement à des températures plus élevées car ces capacités de stocker l'énergie thermique sont importantes avant de l'émettre vers les cellules PV.

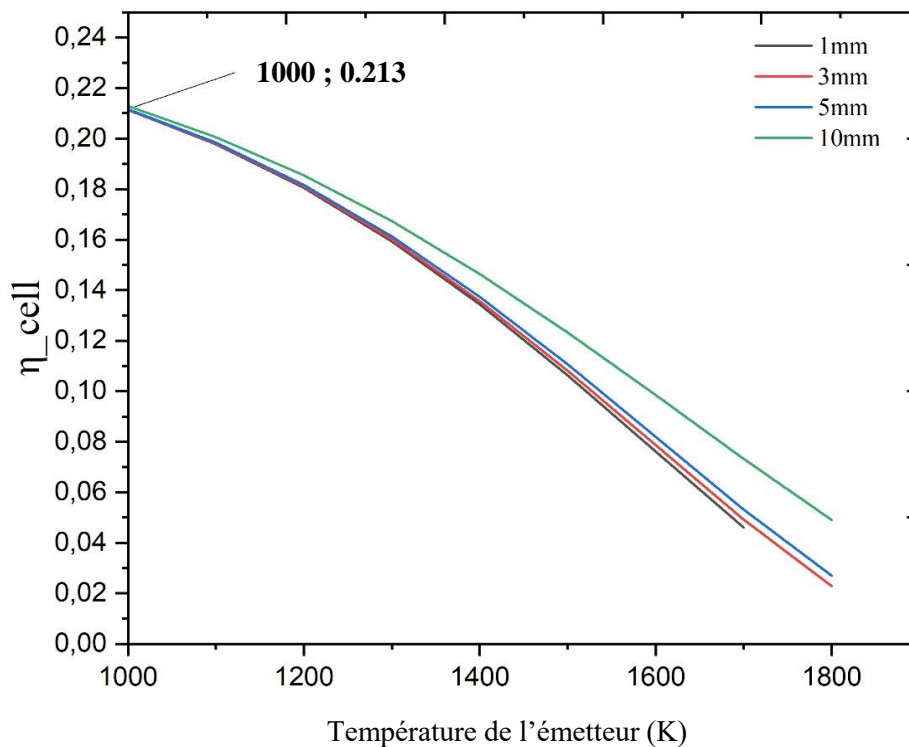


Fig. 4.2. Variation du rendement pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

4.1.3. Etude de la température de la cellule PV GaSb :

On observe une tendance similaire pour toutes les épaisseurs d'émetteur, où la température de la cellule PV augmente avec l'augmentation de la température de l'émetteur.

On peut voir dans la **figure 4.3** la variation de la température de la cellule PV dans toute la plage de $T_{\text{émetteur}}$ qui est comprise entre 1000 et 1800 K :

-Pour 1mm d'épaisseur de l'émetteur thermique, la température de la cellule PV varie entre $T_{\text{cell}} = 303.15\text{K}$ et $T_{\text{cell}} = 516.31\text{K}$.

-Pour 3mm d'épaisseur de l'émetteur thermique, la température de la cellule PV varie entre $T_{\text{cell}} = 302.81\text{K}$ et $T_{\text{cell}} = 502.75\text{K}$.

-Pour 5mm d'épaisseur de l'émetteur thermique, la température de la cellule PV varie entre $T_{\text{cell}} = 302.81\text{K}$ et $T_{\text{cell}} = 502.75\text{K}$.

-Pour 10mm d'épaisseur de l'émetteur thermique, la température de la cellule PV varie entre $T_{\text{cell}} = 301.69\text{K}$ et $T_{\text{cell}} = 469.13\text{K}$.

Interprétation :

Les différences de température de la cellule PV entre les différentes épaisseurs d'émetteur semblent être principalement dues à la capacité thermique et à la conductivité thermique des matériaux utilisés dans chaque épaisseur.

Les épaisseurs d'émetteur plus importantes semblent entraîner des températures de cellule PV légèrement élevées, dû à sa grande masse thermique.

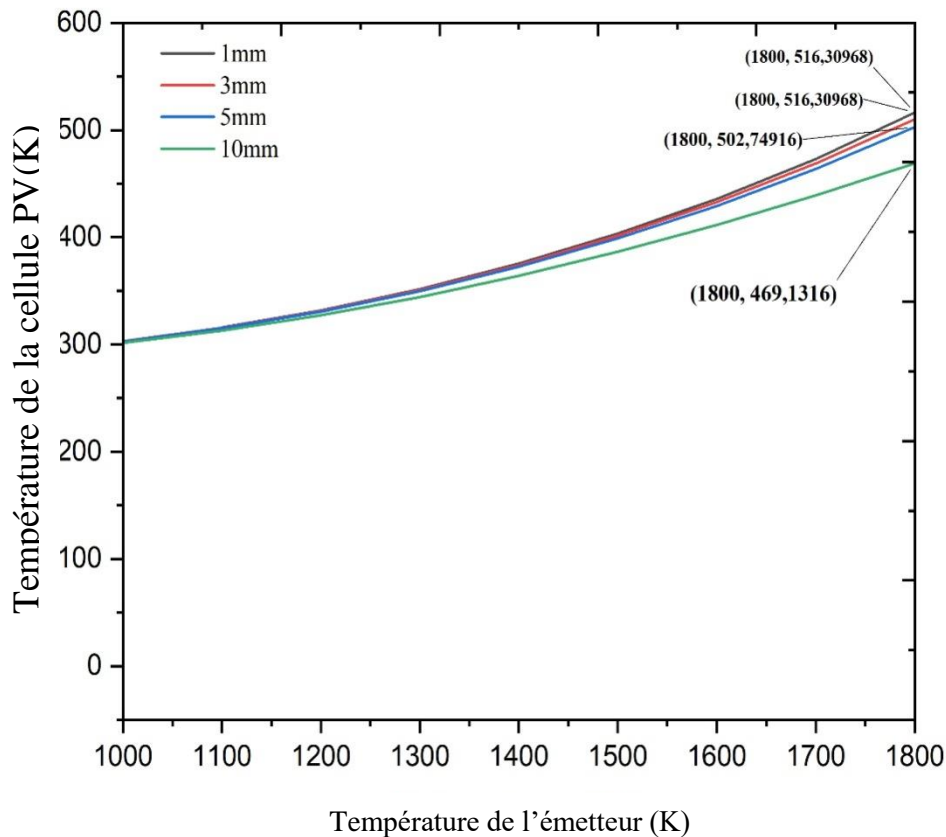


Fig. 4.3. Variation de la T_{cell} pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

4.2. Optimisation de l'épaisseur de la cellule PV GaSb :

4.2.1. Etude de la puissance de sortie :

Dans la **figure 4.4** on observe une augmentation de puissance de sortie avec l'augmentation de la température de l'émetteur pour l'épaisseur de 3 mm et de 4mm jusqu'à un pic de $P = 4909W/m^2$ à la température de 1500K, et un arrêt brusque pour l'épaisseur de 2mm à la température de 1200K. Les cellules PV plus épaisses semblent offrir une puissance de sortie maximale supérieure à des températures plus élevées, ce qui peut être attribué à une meilleure absorption de la lumière et une plus grande efficacité de conversion.

Cependant, il est important de noter que la puissance de sortie diminue à mesure que la température de l'émetteur augmente au-delà d'un certain point, ce qui est dû à des effets de saturation et à des limitations de matériaux.

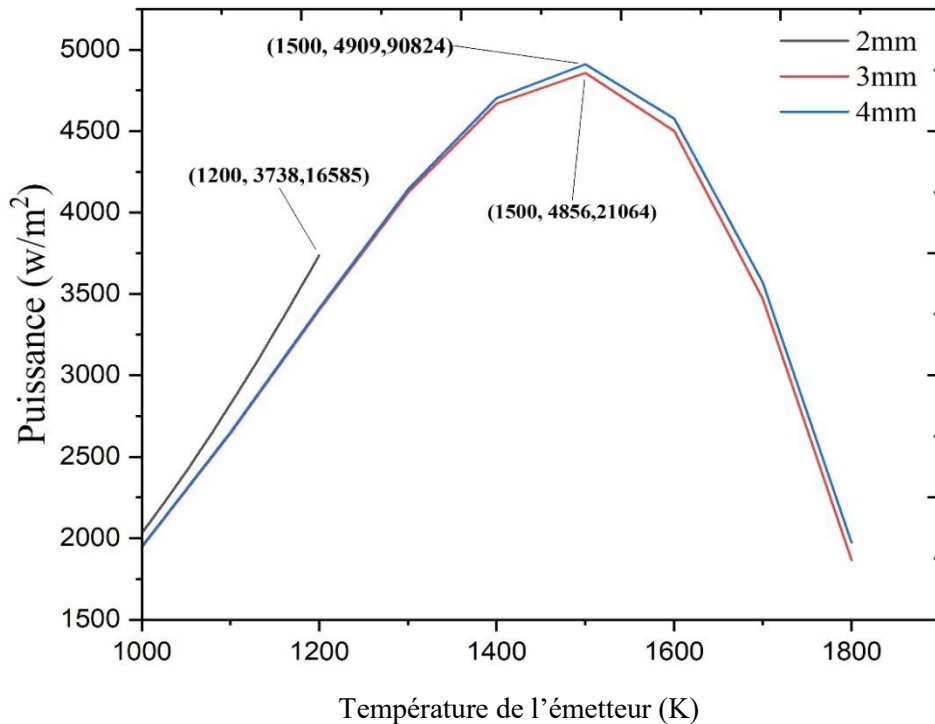


Fig. 4.4. Variation de la puissance de sortie pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

4.2.2. Etude de rendement du système TPV :

Dans la **figure 4.5** nous pouvons constater une diminution générale du rendement à mesure que la température de l'émetteur augmente. Par exemple, à 1000K, le rendement est d'environ 0.22, tandis qu'à 1800K, il diminue à environ 0.02.

En remarquant en parallèle des variations de rendement en fonction de l'épaisseur de la cellule PV. Par exemple, à 1500K, le rendement pour une épaisseur de cellule de 3mm est d'environ 0.105, tandis que pour une épaisseur de 4mm, il est d'environ 0.11. Cela indique une variation du rendement en fonction de l'épaisseur de la cellule PV.

Interprétation : Donc le rendement est différent pour une cellule plus épaisse par rapport à une cellule plus mince. Ce qui implique que Les cellules PV plus épaisses ont souvent une plus grande capacité à absorber la lumière solaire, ce qui peut entraîner une augmentation du rendement, en particulier à des températures supérieures à 1200K.

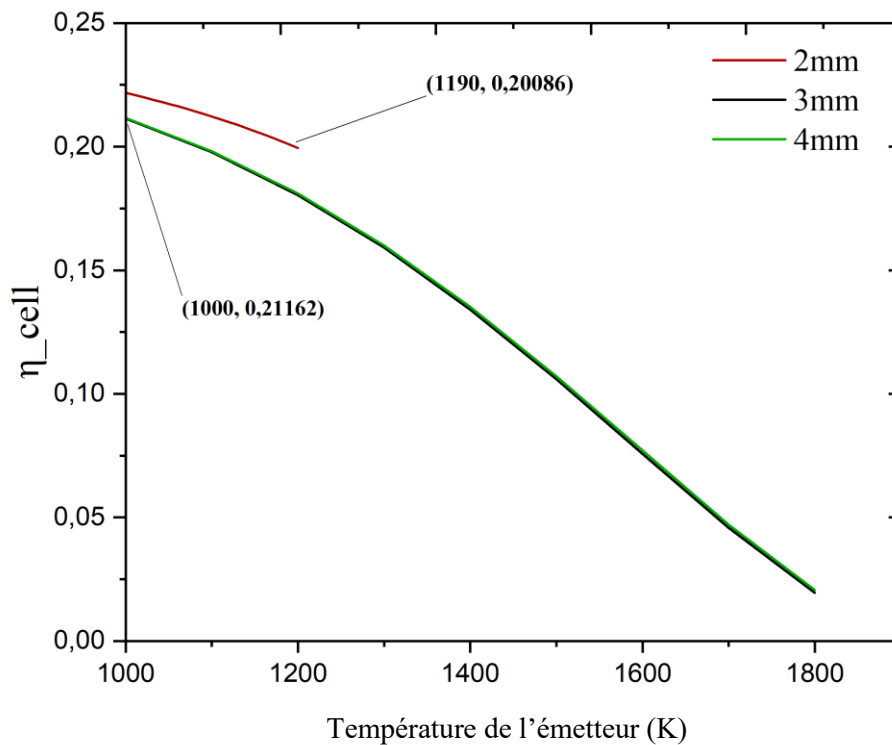


Fig.4.5. Variation du rendement pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

4.2.3. Etude de la température de la cellule PV GaSb :

Dans la figure 4.6 on peut voir que la température de la cellule augmente avec l'augmentation de la température de l'émetteur avec une manière linéaire de 1000K jusqu'à 1800K, mais avec une différence tout dépend de l'épaisseur donnée, par exemple pour une cellule de 3mm d'épaisseur sa température à 1800K d'émetteur est de 516K par contre pour une cellule de 4mm d'épaisseur sa température est de 514K.

Interprétation :

Les cellules PV plus épaisses ont généralement une plus grande masse de matériau, ce qui peut contribuer à une meilleure capacité à absorber et à dissiper la chaleur. La capacité thermique plus élevée peut aider à maintenir une température de fonctionnement plus stable à l'intérieur de la cellule, limitant ainsi les effets néfastes des températures élevées.

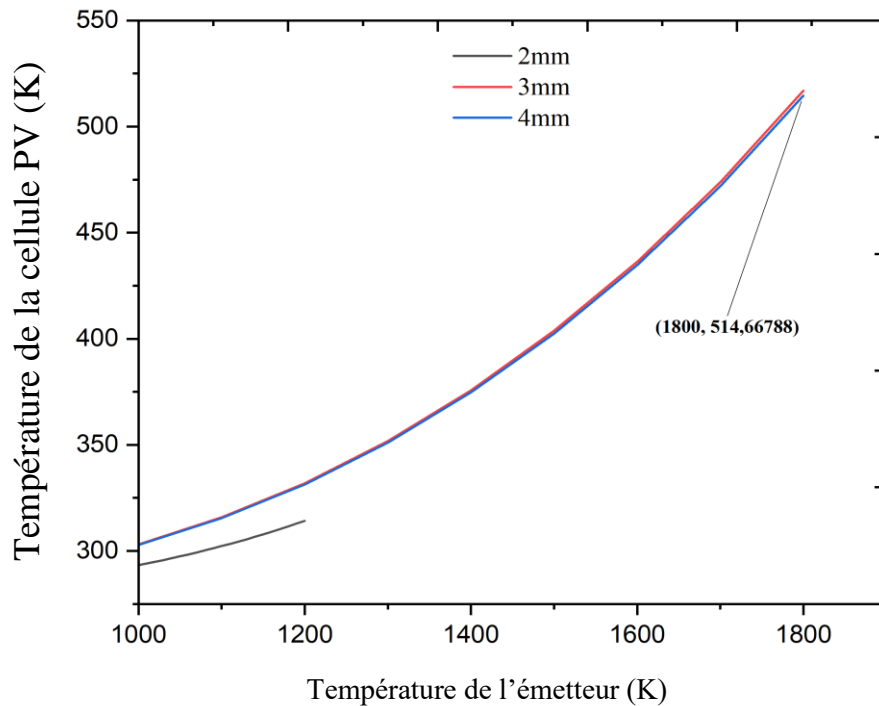


Fig. 4.6. Variation de la T_{cell} pour différentes épaisseurs de l'émetteur.

4.2.4. La défaillance de la cellule PV GaSb à partir de 1200K :

Concernant la défaillance de la cellule PV de 2mm, il est très important de noter que Les cellules photovoltaïques ont des plages de température de fonctionnement spécifiques. Au-delà de ces plages, leur efficacité peut diminuer ou elles peuvent même cesser de fonctionner. Il est possible que la température de l'émetteur ait dépassé la plage de fonctionnement optimale de la cellule PV à une épaisseur de 2 mm, entraînant une panne totale. Comme il est possible que les températures élevées peuvent endommager les composants des cellules PV, notamment les matériaux semi-conducteurs moins épais, en raison de la dilatation thermique. Cela pourrait entraîner une défaillance temporaire ou permanente de la cellule PV.

4.3. Optimisation thermique couplée cellule-émetteur :

4.3.1. Etude de la puissance de sortie :

On peut observer dans **la figure 4.7** que la puissance générée par la cellule PV augmente avec l'augmentation de la température de l'émetteur en faisant un pic de $P = 4881 \text{ W/m}^2$ environ de 1600K et elle va commencer de diminuer jusqu'à

$P = 3700 \text{ W/m}^2$. Ces résultats confirment tout ce qu'on a prouvé précédemment concernant les matériaux les plus épais.

Le système TPV ayant une optimisation couplée cellule-émetteur est beaucoup mieux si on compare ces performances par les résultats obtenus pour chaque élément seul, par exemple pour la cellule de 4mm a un pic de 4900 W/m^2 mais avec une diminution jusqu'à 1972 W/m^2 , ainsi pour un émetteur de 10mm a un pic de 4841 W/m^2 mais avec une diminution jusqu'à 3600 W/m^2 .

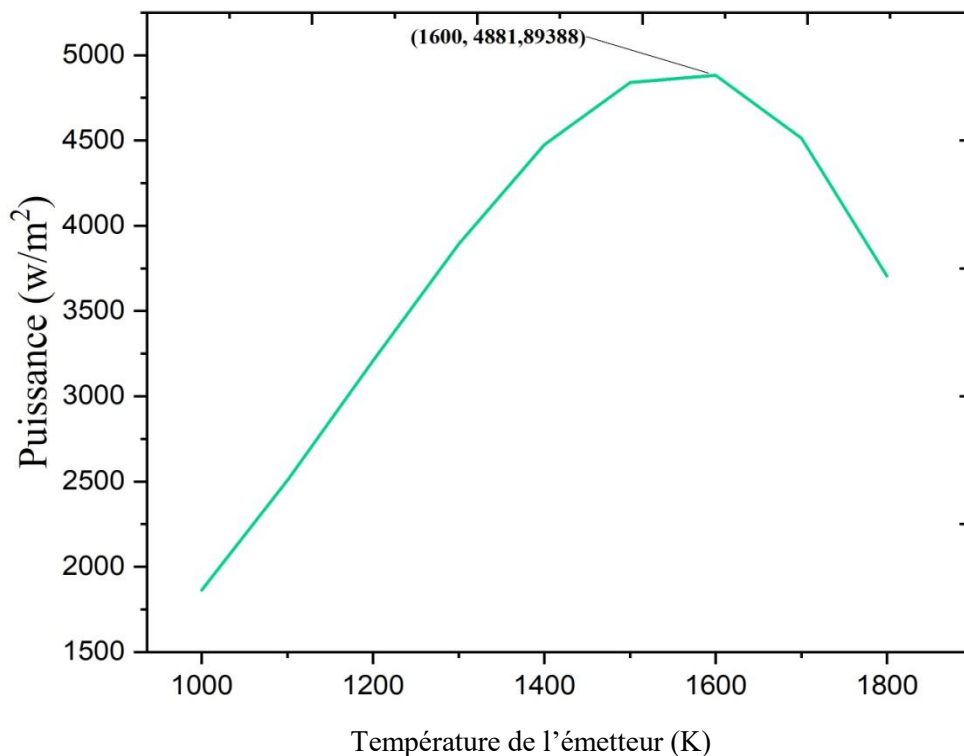


Fig.4.7. Variation de la puissance de sortie d'une cellule à 4mm d'épaisseur et d'un émetteur à 10mm d'épaisseur.

4.3.2. Etude de rendement du système TPV :

La figure 4.8 montre que le système TPV ayant une optimisation couplée cellule-émetteur est plus performant par rapport à une seule optimisation de chaque élément seul en comparant les résultats obtenus avec ce qu'on prouvé précédemment, par exemple dans ce cas le rendement varie entre 21.3% et 12% dans une plage de température de l'émetteur de 1000-1600K.

Tandis que dans le cas d'une cellule de 4mm d'épaisseur a une variation de 21% et 10% et même dans le cas d'un émetteur de 10mm d'épaisseur a une variation de 21% et 12%.

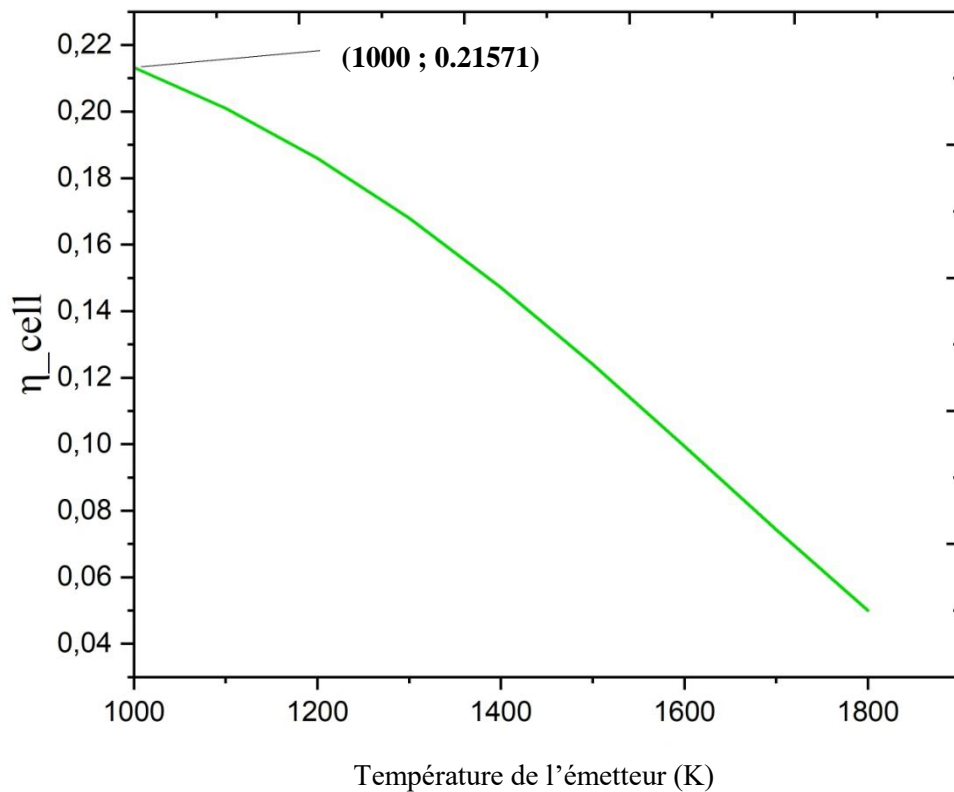


Fig.4.8. Variation du rendement d'un système TPV optimisé cellule-émetteur.

4.3.3. Etude de la température de la cellule PV GaSb :

On constate à partir de la figure 4.9 que la température de la cellule PV dans un système TPV bien optimisé cellule-émetteur a marqué une très bonne stabilité de 467 K à des températures élevées de l'émetteur thermique jusqu'à 1800 K. Ce qui implique que ce système est plus performant par contre à l'optimisation de chaque élément seul.

Par exemple dans le cas d'une cellule à 4mm d'épaisseur atteint les 514 K, et dans le cas d'un émetteur à 10mm d'épaisseur la température de la cellule atteint les 470 K.

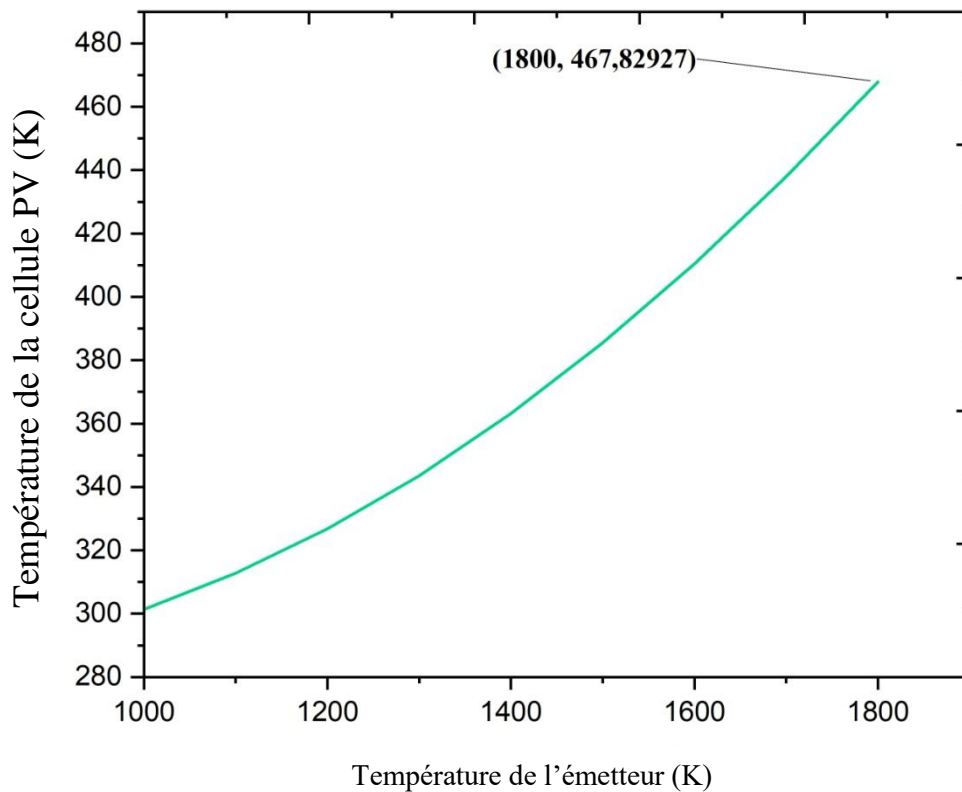


Fig.4.9. Variation de la température de la cellule PV dans un système optimisé cellule-émetteur.

Conclusion générale :

Après avoir mené une étude approfondie de simulation sur un système TPV, en explorant spécifiquement l'impact de l'épaisseur de l'émetteur thermique (**carbure de silicium SiC**) et de la cellule PV (**l'antimoniure de gallium GaSb**), nous avons obtenu des résultats remarquables qui témoignent du potentiel significatif de cette technologie. En augmentant l'épaisseur de l'émetteur thermique et de la cellule PV, nous avons observé une amélioration notable du rendement et de la puissance maximale de sortie du système TPV.

Lorsque nous avons effectué une optimisation couplée de la cellule et de l'émetteur, nous avons atteint un rendement exceptionnel de 21,57%. Ce chiffre impressionnant démontre l'efficacité accrue du système après ajustement des paramètres clés. De plus, la puissance maximale de sortie a été mesurée à 4881 W/m², soulignant la capacité de ce système à générer une quantité importante d'énergie par unité de surface.

Une des découvertes les plus significatives de notre étude est la stabilité remarquable de la température de la cellule PV, maintenue à 467 K même à des températures élevées de l'émetteur thermique. Cette constance thermique offre une fiabilité accrue au système TPV, réduisant ainsi les risques de dégradation et assurant des performances optimales sur le long terme.

Perspectives :

Pour nos futures études, nous envisageons d'explorer différents matériaux pour l'émetteur thermique et la cellule PV, ainsi que d'intégrer des approches expérimentales pour enrichir nos recherches. En évaluant une gamme variée de matériaux, et en menant des expériences en laboratoire pour valider nos simulations, nous visons à améliorer l'efficacité et la durabilité des systèmes TPV que nous étudions. Dans le cadre de nos objectifs, nous comptons également travailler sur la production de l'eau chaude en parallèle avec la conversion d'énergie thermique en électricité. L'optimisation multi-objective jouera un rôle crucial dans nos travaux, car nous chercherons à trouver un équilibre entre le rendement, la puissance de sortie, la production d'eau chaude et la température de la cellule PV.

ملخص

تتمركز هذه الأطروحة حول التحسين الهندسي لنظام الطاقة الحرارية الضوئية (TPV) من خلال استكشاف المعلومات الرئيسية لسمك المصدر الحراري وخلية الطاقة الضوئية. يتمتع هذا النظام بإمكانيات واعدة كمصدر بديل للطاقة حيث يجمع بين مبادئ الديناميكا الحرارية مع التحويل الضوئي الكهروضوئي لتعزيز الكفاءة الطاقية.

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو تحليل كيفية تأثير سمك المصدر الحراري (1 مم، 3 مم، 5 مم و 10 مم) وخلية الطاقة الضوئية (2 مم، 3 مم، و 4 مم) المختلفة على الأداء الشامل لنظام TPV. باستخدام أدوات النمذجة والمحاكاة المتقدمة logiciel **COMSOL Multiphysics**، قمنا باستكشاف مجموعة واسعة من التكوينات الهندسية لتحديد التركيبات الأمثل للسمك.

تظهر نتائجنا أن تحسين سمك المصدر الحراري يمكن أن يعزز بشكل كبير كفاءة تحويل الطاقة من خلال تعزيز امتصاص أفضل للإشعاع الحراري وتقليل الخسائر الحرارية. وبالمثل، يمكن أن يزيد ضبط سمك خلية الطاقة الضوئية بدقة من امتصاص الضوء الشمسي وتوليد التيار الكهربائي، مما يزيد من الكفاءة الشاملة.

في الختام، تسلط هذه الدراسة الضوء على أهمية التحسين الهندسي في تصميم أنظمة TPV فعالة ومستدامة وتقدم توصيات محددة بشأن السمك المثلى للمصدر الحراري وخلية الطاقة الضوئية لتحقيق الأداء الأمثل.

Résumé

Ce mémoire se concentre sur l'optimisation géométrique du système thermophotovoltaïque (TPV) en explorant les paramètres cruciaux de l'épaisseur de l'émetteur thermique et de la cellule photovoltaïque (PV). Le TPV présente un potentiel prometteur en tant que source d'énergie alternative, combinant les principes de la thermodynamique avec la conversion photovoltaïque pour maximiser le rendement énergétique.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser comment différentes épaisseurs de l'émetteur thermique (1mm, 3mm, 5mm et 10mm) et de la cellule PV (2mm, 3mm et 4mm) influencent les performances globales du système TPV. En utilisant des outils de modélisation et de simulation avancés logiciel **COMSOL Multiphysics**, nous avons exploré un large éventail de configurations géométriques pour identifier les combinaisons optimales d'épaisseurs. Nos résultats démontrent que l'optimisation de l'épaisseur de l'émetteur thermique peut significativement améliorer l'efficacité de la conversion énergétique, en favorisant une meilleure absorption du rayonnement thermique et en réduisant les pertes thermiques. De même, l'ajustement précis de l'épaisseur de la cellule PV peut maximiser l'absorption de la lumière solaire et la génération de courant électrique, augmentant ainsi le rendement global du système TPV.

Abstract

This thesis focuses on the geometric optimization of the thermophotovoltaic (TPV) system by exploring the crucial parameters of the thermal emitter and photovoltaic cell thickness. TPV holds promising potential as an alternative energy source, combining thermodynamic principles with photovoltaic conversion to maximize energy efficiency.

The main objective of this study is to analyze how different thicknesses of the thermal emitter (**1mm, 3mm, 5mm, and 10mm**) and the PV cell (**2mm, 3mm, and 4mm**) influence the overall performance of the TPV system. Using advanced modeling and simulation tools logiciel **COMSOL Multiphysics**, we explored a wide range of geometric configurations to identify optimal thickness combinations.

Our results demonstrate that optimizing the thickness of the thermal emitter can significantly improve energy conversion efficiency by promoting better absorption of thermal radiation and reducing thermal losses. Similarly, precise adjustment of the PV cell thickness can maximize solar light absorption and electrical current generation, thereby increasing the overall TPV system efficiency.

Références bibliographiques

- [1]: Isobe, K. Okino, R & Hanamura, K. (2020). Spectral absorptance of a metal-semiconductor-metal thin-multilayer structured thermophotovoltaic cell. *Optics Express*, 28(26), 40099-40111.
- [2]: Ni, Q. Ramesh, R. Chen, C. A., & Wang, L. (2021). Semiconductor-based selective emitter with a sharp cutoff for thermophotovoltaic energy conversion. *Optics Letters*, 46(13), 3163-3166.
- [3]: C. Lucchesi, D. Cakiroglu, J.-P. Perez, T. Taliercio, E. Tournié, P.-O. Chapuis, R. Vaillon, *Nano Letters*, asap (2021), Near-Field Thermophotovoltaic Conversion with High Electrical Power Density and Cell Efficiency above 14%.
- [4] : Luque, A., Martí, A., Stanley, C., Tibbits, T., Bett, A., van Roosmalen, J., & Burgers, A. (2005). FULLSPECTRUM: A new PV wave making more efficient use of the solar spectrum. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87(1-4), 467-479. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.07.034>.
- [5] : Nelson, R. E. (2003). A brief history of thermophotovoltaic development. *Semiconductor Science and Technology*, 18(5), S141-S143. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/18/5/301>.
- [6] : Brosseau, F. (2022, 19 avril). Une cellule thermophotovoltaïque bat un nouveau record de rendement énergétique.
- [7] : Arfy. (2022, 22 avril). *Ecologie, Techno*.
- [8] : Sun, X., & Bermel, P. (2016, septembre). Radiative cooling for thermophotovoltaic systems (p. 997308). <https://doi.org/10.1117/12.2236174>.
- [9] : Valls, R., & Frèze, R. *Chimie du solide : Relations structure-propriété*.
- [10] : S. Rinner et al., "Gallium Arsenide Thermophotovoltaic Cells," *Applied Physics Letters*, 76(22), 1999).
- [11] : R. Scheer et al. "High-Efficiency InGaP/GaAs Tandem Solar Cells for Thermophotovoltaic Energy Conversion," *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(1), 2014).

Références bibliographiques

[12] : S. Nakamura et al., "InGaN/GaN/AlGaIn-Based Laser Diodes with High-Performance Characteristics," *Journal of Applied Physics*, 76(3), 1994).

[13] : A. Freundlich et al., "High-Efficiency Thermophotovoltaic Conversion of Photons to Electrical Power Using III-V Semiconductors," *Journal of Applied Physics*, 78(1), 1995).

[14] : M. C. Wu et al., "Arsenic Antimonide Nanowires as Efficient Thermoelectric Materials," *Nano Letters*, 4(3), 2004).

[15] : W. Jin et al., "Epitaxial growth of GaSb layers on GaAs (100) for thermophotovoltaic cells," *Journal of Crystal Growth*, 311(14), 2009).

[16] : H. Yonezu et al., "Thermophotovoltaic Power Conversion Using a Vertical-Emission n-p-i-p Structure Silicon Diode," *Japanese Journal of Applied Physics*, 47(8), 2008).

[17] : D. Lackner et al., "High-Performance Thermophotovoltaic Germanium Photodiodes," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 43(9), 2007).

[18] : Amy, C., Seyf, H. R., Steiner, M. A., Friedman, D. J. & Henry, A. Thermal energy grid storage using multi-junction photovoltaics. *Energy Environ. Sci.* 12, 334–343 (2019).

[19] : Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques. (2010, 9 août). Récupéré de <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>.

[20] : 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.

[21] : 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, no 1, Art. no 1, avr. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-86175-5.

Références bibliographiques

- [22] : M. M. A. Gamel et al. « A Review on Thermophotovoltaic Cell and Its Applications in Energy Conversion: Issues and Recommendations », *Materials* (Basel), vol. 14, no 17, p. 4944, août 2021, doi: 10.3390/ma14174944.
- [23] : Z. Utlu, « Thermophotovoltaic applications in waste heat recovery systems: example of GaSb cell », *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 15, no 2, p. 277-286, mai 2020, doi: 10.1093/ijlct/ctz049.
- [24] : 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.
- [25] : A. Schock, C. Or, et V. Kumar, « Small radioisotope thermophotovoltaic (RTPV) generators », vol. 358, p. 81-97, févr. 1996, doi: 10.1063/1.49711.
- [26] : L. Broman et J. Marks, « Co-generation of electricity and heat from combustion of wood powder utilizing thermophotovoltaic conversion », *AIP Conference Proceedings*, vol. 321, no 1, p. 133-138, janv. 1995, doi: 10.1063/1.47062.
- [27] : 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, no 1, p. 327-334, févr. 2007, doi: 10.1063/1.2711750.
- [28] : 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.
- [29] : J. R. Howell, M. P. Menguc, et R. Siegel, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 5e éd. Boca Raton: CRC Press, 2010. doi: 10.1201/9781439894552.

Références bibliographiques

[30] : Quotidien d'information indépendant - n° 7871 - Lundi 22 Janvier 2024

Professeur des universités, expert international Dr Abderrahmane Mebtoul.

[31] : 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, no 8, p. 620-625,

août 2007, doi: 10.1134/S0040601507080058.

[32] : 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.

[33] : 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, no 1, p. 52-60, mars 2018, doi:

10.1093/ijlct/ctx019.

[34] : R. G. Mahorter, B. Wernsman, R. M. Thomas, et R. R. Siergiej, «

Thermophotovoltaic system testing », *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 18, no 5, p.

S232, avr. 2003, doi: 10.1088/0268-1242/18/5/314.

[35] : 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, no 5, p. S262, avr. 2003, doi: 10.1088/0268-1242/18/5/318.

[36] : (résumé) : De l'économie de l'exploitation agricole à la politique

scientifique régionale de l'INRA. L'itinéraire d'un homme du « service public »

[Texte intégral]

Hommage à Jean-Claude TIREL

Paru dans *Économie rurale*, 302 | Novembre-décembre 2007.

Références bibliographiques

- [37] : David Jugieu : Conception et réalisation d'une matrice de micro éjecteur thermique adressable individuellement pour la fonctionnalisation de biopuce. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique, Toulouse, mars 2005.
- [38] : Sylvaine Muratet : Conception, caractérisation et modélisation : Fiabilité prédictive de MEMS à actionnement électrothermique. Thèse doctorat de l'Institut National des Sciences appliquées, Toulouse, Novembre 2005.
- [39] : Haddadi Manel : Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère. Thème de Master en physique, (LPEA) Université de Batna, 2011.
- [40] : A. Chateaneuf : Comprendre les éléments finis Principes, formulations et exercices corrigés, 2005.
- [41] : "COMSOL Multiphysics 6.1" <http://www.comsol.com>.
- [42] : <https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/news-articles/using-silicon-carbide-components-wafer-handling-inspection>.
- [43]: « High Performance Hot Mirrors | Edmund Optics ». <https://www.edmundoptics.com/f/high-performance-hot-mirrors/13824/>.
- [44]: Disponiblesur:<https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>.
- [45]: « Fumed silica and other components for regular and medium temperature insulation panel ». <https://abc-456.com/low-temp-insulation-panel/>.
- [46] : « 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](https://dspace.univbba.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/744/Rahmani%20Hemza.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Références bibliographiques

[47]: COMSOL Blog Optimizing Thermophotovoltaic Designs with Heat Transfer Simulation, January 31, 2018.

[48]: « Heat Transfer Modeling Software for Analyzing Thermal Effects », COMSOL 6.1. <https://www.comsol.com/heat-transfer-module>.

[49] : “RABHINE Houssameddine.pdf ;
Modélisation, simulation numérique et optimisation d'un système thermo photovoltaïque à base de cellules en GaSb ».