



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : « Master »

Filière : Génie mécanique
Option : Génie des composants photovoltaïques

THÈME
ETUDE NUMERIQUE D'UN SYSTEME
THERMOPHOTOVOLTAIQUE (TPV)

Préparé par : Mr. Rahmani hemza

Soutenu le : 26/06/2013

Devant le jury :

Président :	Dr.DAOUDI Salim	M.C.B	UBBA
Rapporteur :	Mr. TAYEBI Tahar	M.A.B	UBBA
Examineur:	Dr.RAOUACHE Elhadj	M.C.B	UBBA

Année Universitaire 2012-2013

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents, mes frères, ma sœur, et
A tous ceux qui me sont chers.

A tous mes amis : A.hakim, Melouk, Stoph, Akram, Hichem, Ramzi, Josef,
Marwa, Manel, Yasmine, Sara et Wahiba

Sur tous : Malek, Yousef Rahmani et tous les gens de CEM Mouhamed
Guidome à RAS EL OUED.

Remerciement

الحمد لله رب العالمين

Mes reconnaissance éternelle et mes vifs remerciements à ma grand créateur, « ALLAH », qui ma donné la santé et la volonté afin d'accomplir ce travail.

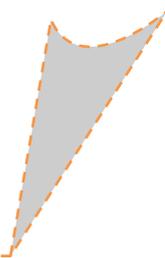
Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Mr : TAYEBI TAHAR, Maitre assistant classe B à l'université d'El-Bachir El-Ibrahimi (BBA), pour sa disponibilité, son aide et ses conseils qui j'ai servis de référence, ainsi que pour sa patience et sa contribution précieuse dans l'élaboration de ce travail.

Je remercie également tous les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon respect.

J'adresse mes remerciements aux enseignants et administrateurs de la filière de génie mécanique sur tous : Dr.Gouidmi, Dr.Daoudi, Dr.Rouabah, Mr.Djabou, Mr.Hanafi, Mr.Bechiche, Dr.Saad Saoud, Mm.Kbir, Dr.Raouache et tous les gens de faculté ST.

Je tiens à remercier tous mes amis qui m'ont aidé de loin ou de près dans la réalisation de ce travail: Abedalbaki, Samir, Si mouhamed, Khaled, Cherif, Fatima.Z, Meriem et Ahlem.

Sommaire



Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction 1

Chapitre I : Cellules thermophotovoltaïques (TPV)

I.1. Cellules photovoltaïques 3

I.1.1. Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 3

I.1.1.1. Structure 3

I.1.1.2. Principe de fonctionnement 4

I.2.2. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque 6

I.2. Thermophotovoltaïques 8

I.2.1 Une brève histoire 8

I.2.2. Définition du principe de conversion TPV 9

I.2.3. Système TPV 9

I.2.3.1. Source de chaleur 11

I.2.3.2 Emetteur sélective 12

I.2.3.3. Filtre 13

I.2.3.4 Les cellules TPV 13

Cellules en Ge 13

Cellules en GaSb 14

Cellules en InGaAsSb 14

Cellules en InGaAs 14

Cellules en InPAsSb 15

I.2.4. Applications TPV 15

I.2.5. Etude bibliographique 16

Chapitre II : Rappel sur le transfert de chaleur par rayonnement

II.1. Rappel sur les transferts de chaleur 18

II.1.1. La conduction 18

II.1.2. La convection 19

II.1.3. Le rayonnement 20

II.2. Transfert de chaleur par rayonnement	21
II.2.1. Le spectre électromagnétique	21
II.2.2. Grandeurs relatives aux surfaces émettant un rayonnement.....	23
II.2.2.1. Flux d'une source	23
II.2.2.2. Emittance d'une source.....	23
II.2.2.3. Intensité d'une source dans une direction « Ox ».....	24
II.2.2.4. Luminance d'une source dans une direction « Ox ».....	25
II.2.2.5 Loi de Lambert	26
II.2.3 Grandeurs relatives aux surfaces recevant un rayonnement.....	26
II.2.3.1 Eclairage.....	26
II.2.3.2 Radiosité et flux nette perdue	26
II.3 Rayonnement des corps noirs	27
II.3.1 Définition du corps noir.....	27
II.3.2. Loi de Planck.....	27
II.3.3 Lois de WIEN	29
1 ^{ère} Loi de WIEN ou lois du déplacement.....	29
2 ^{ème} Loi de WIEN.....	29
II.3.4. Loi de Stefan Boltzmann	29
II.4. Rayonnement des corps réels.....	30
II.4.1. Emission des corps réels.....	30
II.4.2. Réflexion, absorption et transmission du rayonnement par un corps.....	30
II.4.3. Loi de KIRCHHOFF	31
II.4.4. Notion de corps gris.....	33

Chapitre III : Modélisation numérique

III.1. Introduction aux méthodes numériques	34
III.2. Les trois grandes familles de méthodes.....	34
III.2.1. Les différences finies.....	35
III.2.2. Les volumes finis	35
III.2.3 Les éléments finis.....	35
III.3. La méthode des éléments finis	35
III.3.1. Introduction	35
III.3.2. Principe.....	36
III.3.3 Domaines d'application.....	36

III.3.4 Avantages et inconvénients de la méthode..... 36
III.4 Présentation du logiciel COMSOL 37
III.5. Modélisation le problème physique 38

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Température du système 42
IV.2. Température des cellules TPV 43
IV.3. La radiosité..... 44
IV.4.Flux radiatif..... 46
IV.5.La puissance électrique 47
Conclusion..... 49

Bibliographies

Liste des figures

Fig. I.1 : schéma de jonction PN	3
Fig.I.2 : spectre solaire	5
Fig.I.3 : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque sous éclairement.....	6
Fig.I.4 : caractéristiques courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	7
Fig.I.5 : les composants d'un système TPV	9
Fig.I.6 : Illustration schématique d'un système TPV	10
Figure.I.7: Émittance hémisphérique d'un corps noir à 5800K (modèle pour le rayonnement solaire) et d'un corps noir à 1000K (a) et densité spectrale de flux reçue du soleil au voisinage de la terre et d'un émetteur d'un système TPV à 1000K (b).....	11
Figure.I.8 : Système TPV avec un émetteur sélectif	12
Figure.I.9 : Système TPV avec un émetteur corps noir filtré.....	13
Fig.II.1 : Schéma du transfert de chaleur par conduction	18
Fig.II.2 : Schéma du transfert de chaleur convectif	19
Fig.II.3 : Schéma du transfert de chaleur radiatif.....	20
Fig.II.4 : Le spectre électromagnétique.....	22
Fig.II.5 : Emittance d'une source	24
Fig.II.6 : intensité de la source dans la direction Ox.....	24
Fig.II.7 : Luminance d'une source dans une direction Ox	25
Fig.II.8 : Schématisation des flux de rayonnement sur une surface.....	27
Fig.II.9 : Loi de Planck distribution spectrale de la luminance d'un corps noir en fonction T	28
Fig.II.10 : Processus d'interaction rayonnement/matière.....	31
Fig .III .1: Présentation de géomètre étudié dans COMSOL Multiphysics 4.3	38
Fig.III.2 : Un système prototype	39
Fig. III.3 : La géométrie du système TPV modélisé	39
Fig.IV.1 : distribution stationnaire de la température de dispositif. (a) : $T_{source}= 1000K$, (b) : $T_{source}= 2000K$ et (c) : $T_{source}= 3000K$	42
Fig. VI.2 : Température des cellules TPV en fonction de la température de l'émetteur	44
Fig.IV.3 : Radiosité des surfaces dans le système TPV. (a) : $T_{source}= 1000K$, (b) : $T_{source}= 2000K$ et (c) : $T_{source}= 3000K$	44
Fig. IV.4. Flux radiatif le long de surface de l'isolation et les cellules PV pour $T_{source}= 2000K$ et différents valeurs de h_{ref}	46
Fig. IV.5. Flux radiatif le long de surface de l'isolation et les cellules PV pour $T_{source}= 2000K$ et différents valeurs de ϵ_{emit}	47

Fig. IV.6. La puissance électrique en fonction de la température d'émetteur pour différents valeurs de ε_{emit} 48

Fig. IV.7. La puissance électrique en fonction de la température d'émetteur pour différents valeurs de h_{ref} 48

Liste des tableaux

Tab. II.1 : l'émissivité de quelques substances 33
Tab III.1 les propriétés du matériau et les paramètres utilisés 41

Nomenclature

Lettres normales :

L_n : La longueur de diffusion photogénérée d'électron

L_p : La longueur de diffusion photogénérée des trous

P : puissance (Watt)

V : tension (Volt)

I : courant (A)

G : la quantité des paires électron-trou créé

P_0 : La puissance du rayonnement solaire incident (W/m^2)

I_s : Courant inverse de la jonction PN (A)

T : température (K)

FF : Le facteur de forme

k : Le coefficient de conductivité thermique ($W/(m \cdot K)$)

Q : Quantité de chaleur (W/m^3)

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

n : Le vecteur normal à la surface

h : Le coefficient de transfert convectif ($W/(m^2 \cdot K)$).

J : La radiosité de surface (W/m^2)

G : Le flux d'irradiation (W/m^2)

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

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

M : Emittance (W/m^2)

I : Intensité de la source (W/sr)

L : Luminance d'une source ($W/m^2 \cdot sr$)

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

E : Eclairement (W/m^2)

Lettres grecques :

τ : Facteur de transmission.

ρ : Facteur de réflexion (réflectivité)

α : Le facteur d'absorption

β : L'angle (radian)

Ω : angle solide (sr)

λ : la longueur d'onde (μm)

ρ : La densité (kg. m^{-3})

ε : L'émissivité de la surface

η : Le rendement

φ : Flux de chaleur (W)

k : Conductivité thermique (W/m. K)

Les constants :

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

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

σ : La constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$)

c : la vitesse de la lumière ($299\,792\,458 \text{ m / s}$)

Les indices :

ox : direction suivant l'axe x

ph : photogénérés

con : conductif

cov : convectif

ray : rayonnement

is : isolant

m : miroir

source : source de chaleur

émet : émetteur

réf : refroidissement

pv: cellule PV

net : Nette perdue

M : maximal

i : incident

r : réfléchi

t : transmis

a : absorbé

p : paroi (surface)

∞ : Loin de surface

s : saturation de la diode

cc : court-circuit

co : circuit ouvert

obs : obscurité

c : conversion

Les abréviations :

STC : Standard Test Condition

Ph = photogénérés

ZCE : zone de charge d'espace

PV : photovoltaïque

MIT : Laboratoire Lincoln

TPV : thermophotovoltaïque

semi-conducteur III-V : matériaux à base d'une combinaison de groupe III et du groupe V des éléments du tableau périodique

GaSb : le gallium antimonide

EM : spectre électromagnétique

RTPV : forçage radiatif isotopes

STPV : concentration la lumière du soleil

ES : émetteur sélectif

Ge : germanium

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

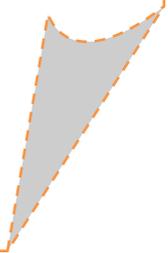
EDP : Les équations aux dérivées partielles

1D : une dimension

2D : deux dimensions

3D : trois dimensions

Introduction



Introduction

Hormis les énergies nucléaire et géothermique, le soleil est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'humanité pour ses besoins alimentaires, domestiques et industriels : biomasse, vent, hydraulique, combustibles fossiles. Le Soleil fournit ainsi chaque jour à la Terre, par son rayonnement, l'équivalent de plusieurs milliers de fois la consommation énergétique totale de l'humanité pour ses activités d'aujourd'hui.

En fait, l'énergie solaire est par nature une énergie répartie, ce qui constitue un handicap car sa densité, en moyenne de quelques kilowattheures par mètre carré est faible, mais aussi un atout que l'on peut mettre à profit dès que les distances rendent exorbitants l'installation et l'entretien d'un réseau de distribution d'énergie électrique à partir d'une unité de production centralisée. L'énergie solaire devient alors compétitive sur le long terme et la technologie photovoltaïque est aujourd'hui suffisamment mûre et maîtrisée pour prendre un véritable essor dans le domaine des applications de puissance sur sites isolés, car tel apparaît son créneau privilégié. Sont alors concernés les zones d'accès difficile des pays industrialisés et, bien plus encore, les pays en développement qui représentent un immense marché potentiel, car plus de deux milliards d'habitants du tiers-monde sont encore privés d'électricité.

L'énergie photovoltaïque désigne la transformation d'une source d'énergie lumineuse en électricité et son utilisation. Elle est à distinguer de l'énergie solaire thermique, qui est une autre technique destinée au chauffage de l'eau par conversion directe de l'énergie solaire en calories à l'aide de capteurs plans.

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

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

Le travail sera présenté comme suit :

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

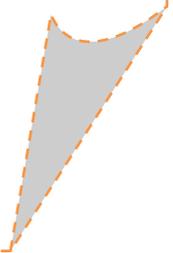
Nous avons présenté dans le chapitre III, les méthodes d'optimisation utilisées pour étudier le système TPV, L'approche numérique suivie pour étudier le système TPV en intégrant dans la première partie à la méthode des éléments finis, la deuxième partie est consacrée à la présentation du logiciel COMSOL, ainsi que la démarche à suivre pour la modélisation numérique.

Dans le quatrième chapitre, nous avons exposé les résultats de la simulation pour la visualisation de la compréhension du comportement thermique du système.

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

CHAPITRE I

Cellules thermophotovoltaïques (TPV)



I.1. Cellules photovoltaïques

Son fonctionnement est basé sur les propriétés des semi-conducteurs. C'est le seul convertisseur direct pour transformer la lumière en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque découvert par A. Becquerel en 1839 [1,2]. Une bonne compréhension des phénomènes mis en jeu lors de la conversion nécessite d'abord de rappeler quelques propriétés sur le potentiel solaire et sur la jonction PN. On va donner un aperçu sur la cellule photovoltaïque (sa structure et le principe de fonctionnement) et ses caractéristiques.

I.1.1. Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.1.1.1. Structure

Pour obtenir une cellule photovoltaïque il faut réaliser une structure de diode, c'est-à-dire réaliser une jonction du type p-n dans un matériau (Fig.1.1). Par exemple le silicium dopé en volume avec un élément tel que le bore qui le rend positif (zone p) et contre-dopé dans une zone superficielle avec du phosphore qui le rend négatif (zone n) [3]. Le champ électrique qui règne à la jonction de ces deux zones dopées différemment sépare les charges électriques photo-générées par la lumière solaire (paires d'électrons-trous) et assure leur évacuation du cristal (les électrons par la cathode et les trous par l'anode) sous une tension de l'ordre de 0,5 Volt et un courant continu de l'ordre de 30 mA pour chaque 1 cm² de capteur sous un ensoleillement maximum de 1 kW/m² [4].

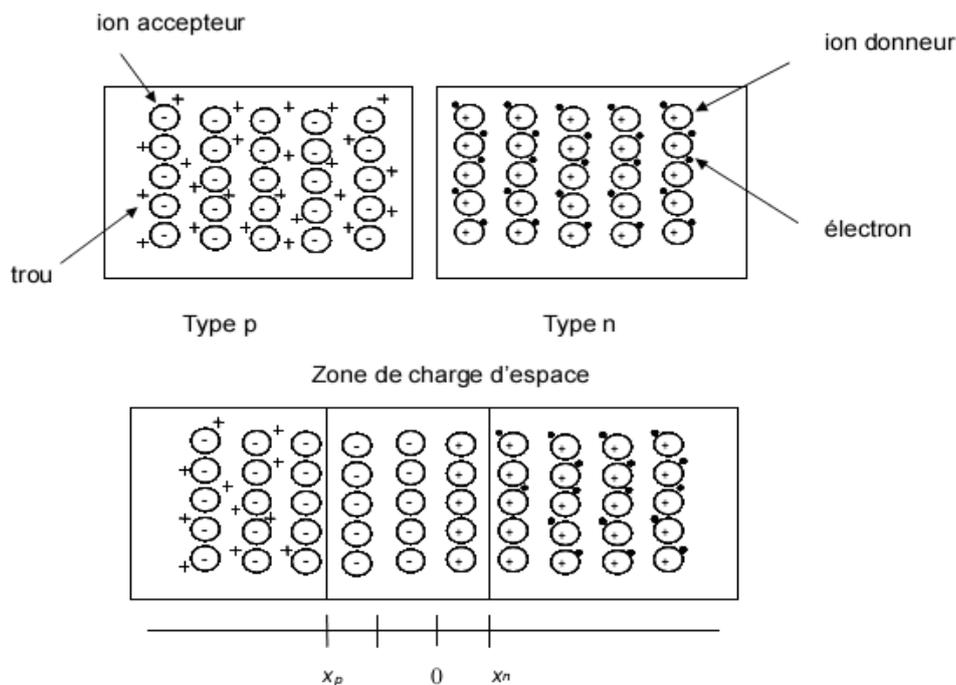


Fig. I.1 : schéma de jonction PN [3]

Alors la structure d'une cellule solaire est similaire à celle d'une jonction P-N, le courant sous obscurité dans une telle structure est donné par la formule :

$$I_{obs} = I_s \left(\exp\left(\frac{qv}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (I-1)$$

Le facteur I_s appelé courant inverse de la jonction PN, a deux composantes :

- le courant de diffusion des porteurs minoritaires, constitué par les électrons de la région P et les trous de la région N qui parviennent à atteindre la zone de charge d'espace par diffusion.
- le courant de génération thermique dû aux paires électrons-trous créées thermiquement dans la zone de charge d'espace.

Le facteur n , compris entre 1 et 2, représentant le coefficient d'idéalité de la jonction P-N, permet de tenir compte des différentes composantes du courant direct circulant dans la jonction P-N :

- les composantes dues aux recombinaisons dans les régions N et P constituent les courants de la diffusion des électrons et des trous ($n=1$).
- la composante due aux recombinaisons dans la zone de charge d'espace constitue le courant de recombinaison de la jonction ($n=2$).

I.1.1.2. Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Par définition, Il a été démontré que le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle même, à la relation suivante [5] :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (I.2)$$

Où

E_{ph} : La quantité d'énergie (J)

λ : la longueur d'onde (μm) (m)

h : la constante de Planck ($6.62.10^{-34}$ J.s)

c : la vitesse de la lumière (299792458 m/s)

D'après la relation (1.2), on voit que cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre ainsi que le montre la figure I.2. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère [6].

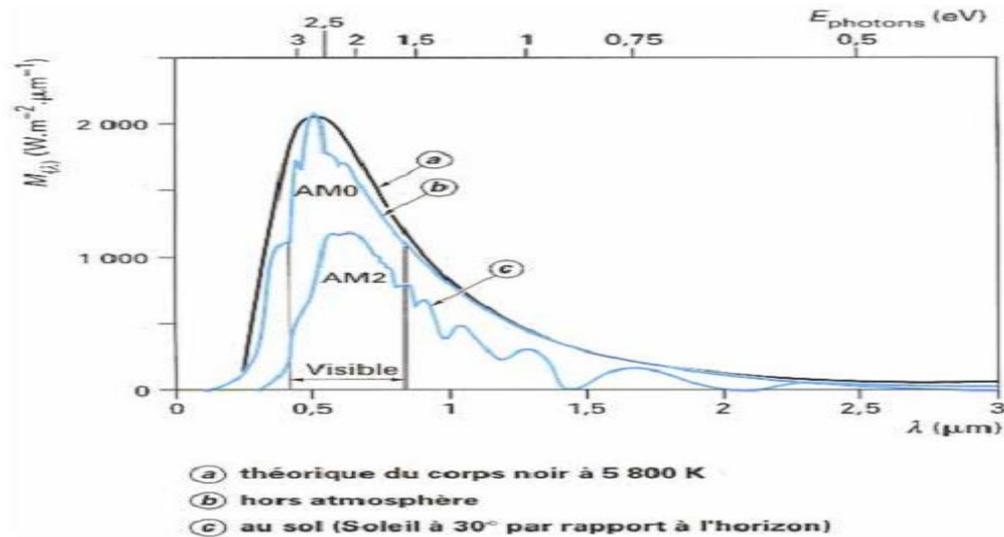


Fig. I.2 : spectre solaire [5].

La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule.

La cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [7] :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou (excitant en cellule organique) dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I.3

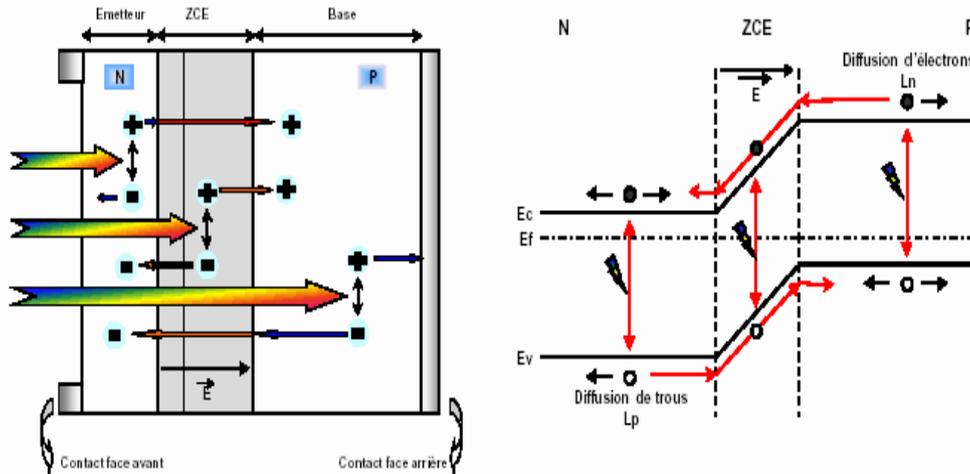


Fig.I.3 : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque sous éclairage [7]

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont « envoyés » par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) ou ils seront majoritaires. On aura un photocourant de diffusion ;
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

La présence de contact ohmique assure la collecte des porteurs d'où la création d'un courant photogénéré I_{ph} , somme des deux contributions précédentes, et qui participe au courant total selon la relation : [7]

$$I = I_{ob} - I_{ph} = I_{obs} = I_s \left(\exp\left(\frac{qv}{nKT}\right) - 1 \right) - I_{ph} \quad (I.3)$$

Comme la longueur de diffusion photogénérée (L_n) d'électron est supérieure à celle des trous photogénérés (L_p), on dope préférentiellement la base de type P. De plus elle est faiblement dopée (10^{15} à 10^{16} at/cm³) afin de limiter la recombinaison.

Le fort dopage de la zone N, appelée émetteur, assure l'existence d'un champ électrique suffisant dans la ZCE et minimise la résistance série au niveau du contact métallique.

I.2.2. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes.

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension (Fig. I.4). Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa

caractéristique courant-tension, qui lui est propre. Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension, ainsi qu'illustré ci-dessous :

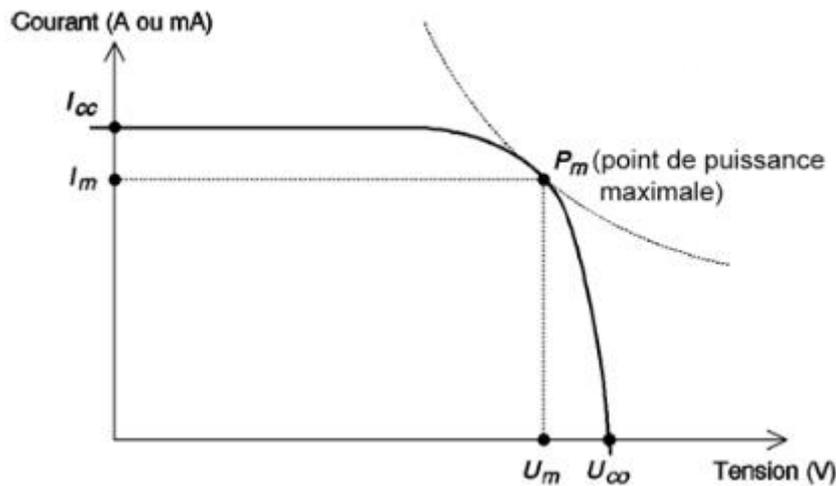


Fig.I.4 : caractéristiques courant-tension d'une cellule photovoltaïque [8]

Cette caractéristique courant-tension est une relation entre la tension et le courant délivrés par la cellule PV.

Des données importantes sont à relever [8, 9,10] :

- ✓ **Le courant de court-circuit noté I_{cc}** : il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) est relié au pôle (-). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P = V \times I$) est nulle. Ou bien, il définit la quantité des paires électron-trou créé « G » et qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) respectivement :

$$I_{ph} = q G (L_n + L_p) \quad (I.4)$$

- ✓ **La tension en circuit ouvert notée V_{co}** : il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P = V \times I$) est nulle. Ou bien c'est la tension pour laquelle la cellule à l'obscurité fournit un courant égal au courant de court-circuit I_{cc} . Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.5)$$

I_s = courant de saturation de la diode.

- ✓ **La puissance maximum P_M** : Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit :

$$P_M = I_M \cdot V_M \quad (I.6)$$

- ✓ **Le facteur de forme FF** : Il définit l'efficacité de la cellule solaire, et qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique, ou bien c'est le facteur de remplissage.

$$FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.7)$$

- ✓ **Le rendement de conversion d'énergie η** : C'est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire incident.

$$\eta_c = FF \cdot \frac{I_{cc} \cdot V_{co}}{P_o} = \frac{V_M \cdot I_M}{P_o} \quad (I.8)$$

Avec :

P_o : La puissance du rayonnement solaire incident.

$P_M = V_M I_M$: Puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : Standard Test Condition), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de $1000W/m^2$, à la température de $25^\circ C$ sous un spectre AM 1,5.

I.2. Thermophotovoltaïques

Un système thermo-photovoltaïque est un système qui vise à convertir l'énergie thermique rayonnée par un corps à une température d'émission en électricité de la même façon qu'un système photovoltaïque convertit le rayonnement solaire. Le système généralement appelé « thermophotovoltaïque » qui est souvent abrégé en TPV [11] , qui sera utilisé dans ce travail.

I.2.1 Une brève histoire

Bien que le «Père» de thermophotovoltaïque est inconnue, le champ peut être tracée au moins aussi loin que 1956 pour le Dr Henry H. Kolm [12]. Tout en travaillant au MIT Lincoln Laboratory, Dr Kolm construit un dispositif primitif TPV en utilisant une lanterne de camping Coleman comme un radiateur et cellules solaires en silicium pour photoconverters. Bien que son système ne produise un watt de puissance, c'était un début. Tout au long des années 1960, les chercheurs du MIT ont continué la recherche sur les dispositifs TPV se concentrant sur les cellules de germanium [12]. Dans les années 1970, thermophotovoltaïque a été étudiée comme un moyen de fournir une source d'énergie portable pour l'armée américaine [12]. Les premiers générateurs TPV se composait de la norme de silicium ou de germanium cellules solaires autour d'une source de chaleur [12]. Vers 1980, un intérêt général pour la région a été perdu à cause de l'efficacité extrêmement faible de ces cellules TPV début. Avec les récents progrès en semiconducteur III-V technologies (matériaux à base d'une combinaison de groupe III et du groupe V des éléments du tableau périodique), il y avait une possibilité pour significativement l'efficacité des cellules supérieures [12]. Des recherches récentes ont montré que le gallium antimonide (GaSb) et arséniure de gallium indium (InGaAs) sont deux des plus prometteurs matériaux pour les cellules TPV nouvelles.

I.2.2. Définition du principe de conversion TPV

La conversion thermophotovoltaïque (TPV) est similaire à la conversion d'énergie solaire à partir de cellules photovoltaïques (PV). La cellule PV composée à partir de matériaux semiconducteurs est commune aux deux technologies (bien sûr, les gammes de conversion diffèrent). Dans le cas de la conversion TPV la source est un émetteur thermique terrestre dont la température est de l'ordre de 1500 à 2000 K [13]. Comparé au soleil la plupart de l'énergie de ce corps chaud est émise dans une gamme de longueur d'onde plus grande.

La difficulté du processus de conversion est d'accorder la cellule PV, l'émetteur est la température de la source chaude. D'une part la cellule doit fonctionner avec des photons de longueur d'onde correspondant à la température de la source. D'autre part, la cellule ne convertit que les photons dépassant une certaine énergie et le reste du rayonnement chauffe la cellule dont les qualités se dégradent. Une solution à ce problème est d'utiliser un filtre qui laisse passer la partie d'énergie qui correspond au gap et qui renvoie les photons inutiles vers l'émetteur. Ainsi un minimum de rayonnement est perdu car le rayonnement réfléchi sert à maintenir la température de l'émetteur ou de la cellule. Une bonne partie du problème est donc concentrée dans le dimensionnement des matériaux, celui de l'émetteur d'une part et celui de la cellule d'autre part. [13]

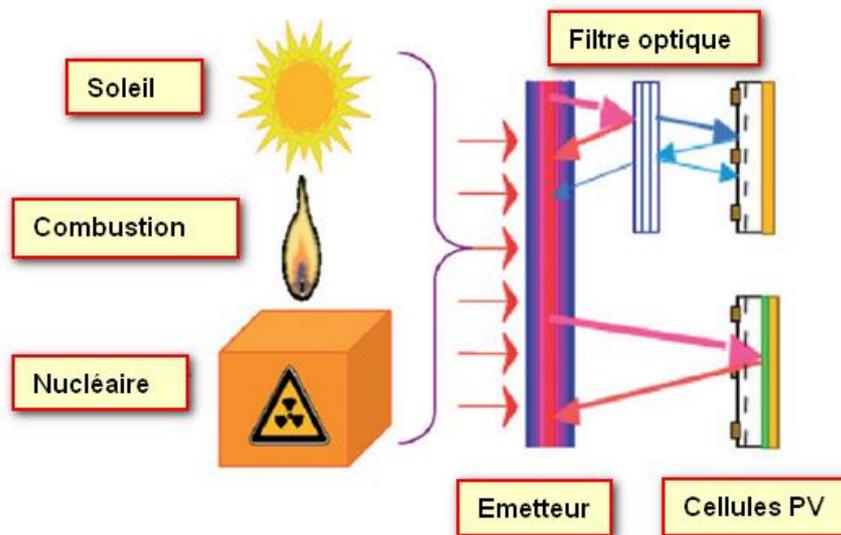


Fig. I.5 : les composants d'un système TPV [14]

I.2.3. Système TPV

A la différence des systèmes photovoltaïques usuels qui convertissent le rayonnement solaire, un système TPV convertit le rayonnement thermique d'un corps chaud quelconque : l'émetteur (Fig. I.6).

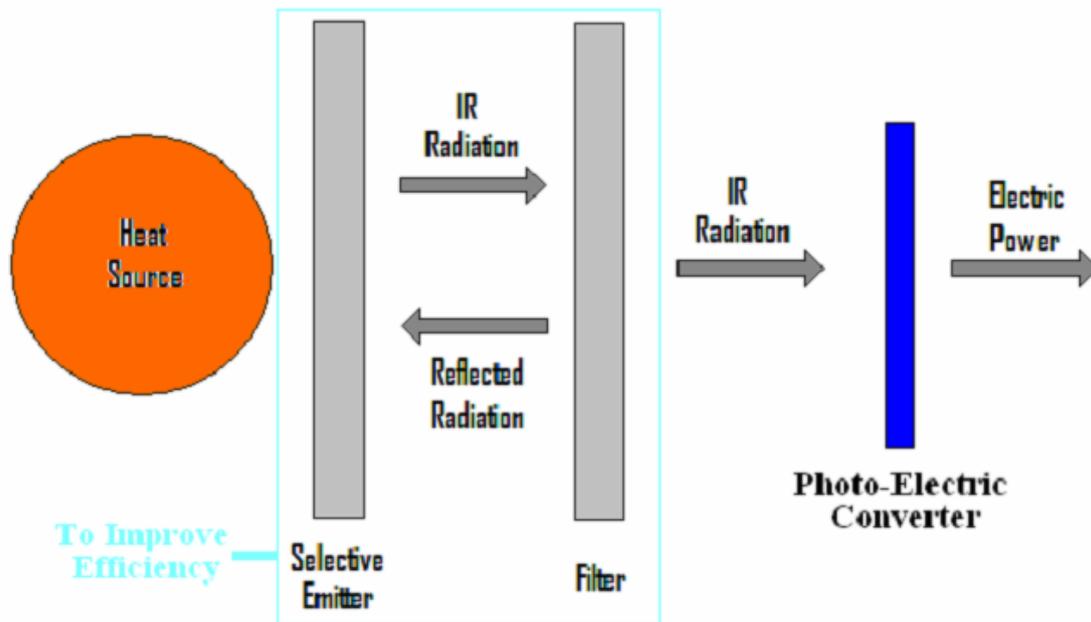


Fig. I.6 : Illustration schématique d'un système TPV. [11]

Cette configuration du système TPV induit plusieurs différences par rapport à un système PV solaire traditionnel, qui contribuent à un rendement et une puissance électrique plus élevés :

- La densité de flux que peut recevoir une cellule dans un système TPV est supérieure de plusieurs ordres de grandeurs à celle reçue par une cellule d'un système PV solaire sans concentration malgré la différence de température entre l'émetteur du système TPV et la surface solaire, en faveur de celle-ci. Cet avantage du système TPV est dû à une différence de facteurs de forme. En effet, alors que tout le rayonnement émis par l'émetteur TPV peut être reçu par la cellule, une infime portion ($\cong 10^{-5}$) du rayonnement solaire parvient à la cellule PV sur terre ou à son voisinage du fait du rapport des angles solides entre le soleil et la cellule. On présente sur la figure I.7a, la densité du flux émis par un corps noir à 5800K (équivalent de la surface solaire) et un corps noir à 1000K en échelle logarithmique. Celui-ci est largement dépassé de plusieurs ordres de grandeur. On présente sur la figure I.7 b les flux reçus par les cellules des systèmes PV et TPV. Le rapport s'inverse en faveur du corps noir à 1000K. Les températures considérées pour les émetteurs TPV varient généralement entre 1000K et 2000K. On s'attend à des rapports encore plus avantageux pour le TPV si des températures supérieures à 1000K sont considérées.
- Le grand facteur de forme d'échanges radiatifs de l'émetteur à la cellule dans un système TPV conduit à des densités de flux équivalentes à celles qu'on obtient dans le solaire à concentration avec des concentrations de plusieurs centaines de soleils. Or, on sait depuis Shockley, que le rendement théorique maximal sous concentration est plus élevé (41% pour 2000 soleils) que sous rayonnement solaire direct (30%)
- La loi de Planck du rayonnement du corps noir (chapitre 2) donne la distribution spectrale du rayonnement émis par un corps noir à l'équilibre thermique à une température donnée.

La majeure partie du rayonnement solaire se situe dans la partie visible du spectre EM. En revanche, pour les émetteurs des systèmes TPV, la plus grande partie du rayonnement s'effectue dans le proche et moyen infrarouge. Les meilleurs convertisseurs du rayonnement solaire (cellule en silicium cristallin) n'étant pas très sensibles au rayonnement IR ne sont plus convenables pour le TPV. De nouveaux matériaux développés durant les années 1990, le GaSb notamment, ont permis une exploitation plus efficace de cette zone du spectre EM et un développement rapide du TPV.

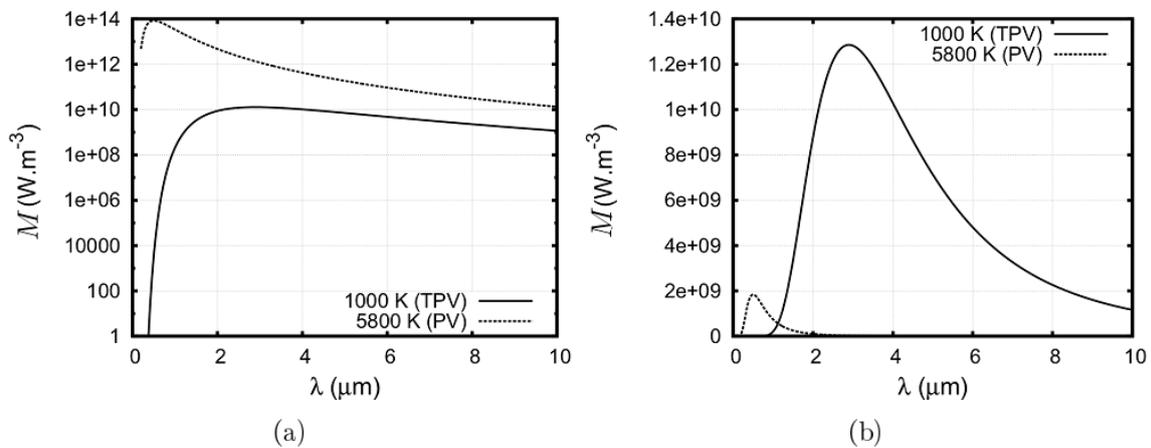


Figure.I.7: Émittance hémisphérique d'un corps noir à 5800K (modèle pour le rayonnement solaire) et d'un corps noir à 1000K (a) et densité spectrale de flux reçue du soleil au voisinage de la terre et d'un émetteur d'un système TPV à 1000K (b) [15]

Les composants d'un système thermophotovoltaïque sont généralement :

I.2.3.1. Source de chaleur

Le premier composant est une source de chaleur. La température de la source de chaleur est un facteur très important dans l'efficacité du système. En principe, toute source de chaleur ayant une température de fonctionnement supérieure à 1000 °C peut être utilisée en systèmes TPV. De ce fait, beaucoup de différents types de sources de chaleur peut être utilisé en systèmes TPV variant de flammes de combustion, forçage radiatif isotopes (RTPV), et concentre la lumière du soleil (STPV). La plupart sources de chaleur utilisée dans TPV systèmes sont basés sur la combustion systèmes pour atteindre une température suffisamment élevée.

La température de la source de chaleur provoque également un changement dans la gamme de longueurs d'onde plus longues. Cet effet est décrit par la loi de déplacement de Wien qui est donné par :

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \tag{I.9}$$

Où :

λ_{max} : est la longueur d'onde (μm)

T : la température du corps noir (K)

b : est constante de Wien, et est égal à $2,898 \times 10^{-3} \text{mK}$

✓ Cette loi est bien détaillée dans le titre II.3.3

I.2.3.2 Emetteur sélective

Comme décrit dans la section précédente, le spectre d'émission d'une source de chaleur est fortement dépendant de la température. Depuis les sources de chaleur ont une température dans la gamme de 1000 °C et 1500 °C et parce que les cellules PV sera seulement absorber les photons qui ont l'énergie au-dessus de l'écart de bande, seule une petite partie du rayonnement émis peut être convertie en électricité. Afin d'améliorer l'efficacité du système, l'utilisation d'un émetteur sélectif est très importante. Le rôle de l'émetteur sélective est d'absorber la chaleur entrant et émettent un spectre d'émission adaptés à la sensibilité du cellule PV [15], ce qui signifie que des émissions sélective est nécessaire avec l'énergie du photon sur une bande étroite juste au-dessus de l'écart de bande de la cellule. La figure I.8 représente un système TPV à émetteur sélectif (ES)

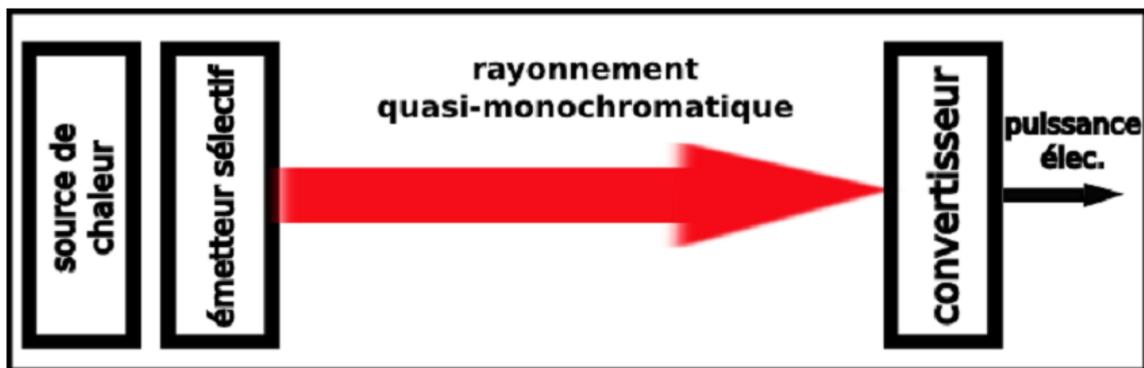


Figure.I.8 : Système TPV avec un émetteur sélectif. [15]

On montrera alors l'intérêt de ce système par rapport à un système PV / TPV à filtre ou à source quelconque.

Une méthode permettant d'obtenir des émissions sélective est l'utilisation de cristaux photoniques qui sont matériaux structurées où l'indice de réfraction est modulé sur une, deux ou trois dimensions. Tungstène (W) peuvent être choisis [4] comme substrat en raison de sa haute température de fusion et de son optique et les propriétés structurales. Émetteurs sélective basé sur tungstène nécessitent toujours un oxyde-environnement libre pour éviter l'oxydation pendant le chauffage de l'émetteur. Une méthode pour résoudre ce problème est l'intégration de l'ordinateur de poche tungstène émetteur dans un fermé chambre remplie à l'argon. L'émittance radiative d'un cristal unique peut être modifié par l'application d'un motif périodique des cavités dans le substrat. Ces cavités peuvent être considérées comme une

forme cylindrique métallique guide d'onde, caractérisé par une unique relation dispersion résultant en une augmentation de l'émittance à certaines longueurs.

I.2.3.3. Filtre

Le principal phénomène limitant le rendement d'une cellule PV est la discordance entre le spectre solaire et le spectre de sensibilité maximale du convertisseur. Une solution pour pallier ce problème consiste à filtrer le rayonnement incident pour ne laisser parvenir à la cellule PV que la partie qui sera convertie avec un rendement maximal. Il est primordial, pour augmenter le rendement global du système, de récupérer l'énergie du rayonnement non transmis, par exemple en la renvoyant à l'émetteur d'un système TPV pour augmenter sa température et par conséquent, l'intensité de son rayonnement thermique. On présente, sur la figure I.9 une illustration schématique d'un système TPV. Pour optimiser le rendement, le filtre utilisé doit avoir une forte transmission dans la région des photons 'utiles' : pour $\lambda \leq \lambda_g$ et une grande réflectance partout ailleurs ($\lambda \geq \lambda_g$). Une grande variété de filtres peut être utilisée, tels que les filtres interférométriques à une ou plusieurs couches, des filtres plasma, des combinaisons des deux, ou encore des filtres à réseaux résonnants. Des réflecteurs au dos de la cellule PV peuvent également être utilisés pour récupérer l'énergie du rayonnement non absorbé. Pour une présentation détaillée, leur consacre un chapitre entier... [15]

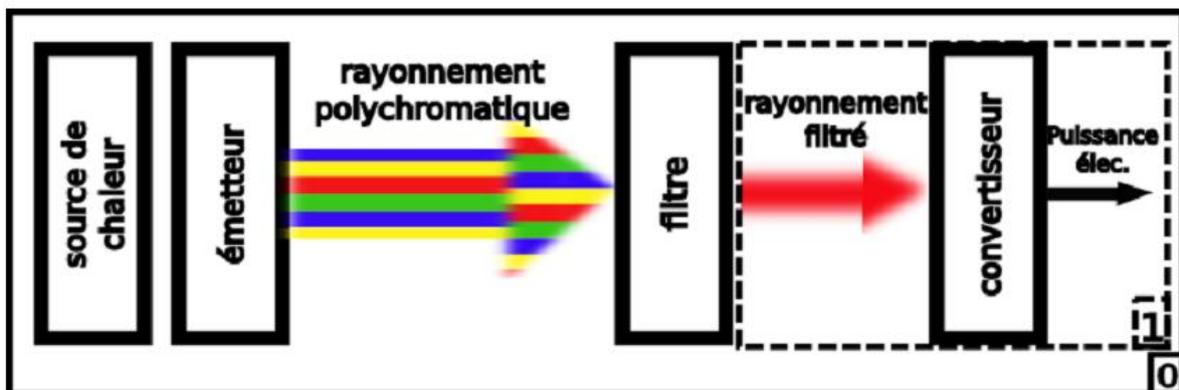


Figure.I.9 : Système TPV avec un émetteur corps noir filtré. [15]

I.2.3.4 Les cellules TPV. [16,17]

Afin d'être efficace dans une application thermophotovoltaïque, un matériau semi-conducteur doit avant tout être caractérisé par une largeur de bande interdite aussi faible que possible. Les valeurs usuelles sont de 1,44 eV pour le tellurure de cadmium, 1,424 eV pour l'arséniure de gallium, ou encore 1,1 eV pour le silicium, ce qui est bien trop élevé puisque la majeure partie du spectre infrarouge échappe à la conversion en électricité par ce type de matériaux. Des valeurs moitié moindres seraient nécessaires pour couvrir une fraction suffisante des longueurs d'onde infrarouges.

❖ Cellules en Ge

Le germanium présente une largeur de bande interdite de seulement 0,66 eV, de sorte qu'il a très tôt été étudié quant à ses possibles applications thermophotovoltaïques. Il n'a

malheureusement pas tenu ses promesses en raison de la masse effective très élevée des électrons dans ce matériau et du courant d'obscurité qui réduit sensiblement la tension de sortie du composant. De plus, il s'est avéré très difficile de passiver la surface du germanium, ce qui compromet fortement la possibilité de réaliser un jour industriellement des cellules thermophotovoltaïques dans ce matériau.

❖ Cellules en GaSb

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

La réalisation de telles cellules en GaSb est assez simple, dans la mesure où des wafers en GaSb dopé n au tellure sont disponibles dans le commerce. Le dopage de type p peut alors être réalisé sur ces composants par diffusion en phase vapeur d'impuretés de zinc à environ 450 °C. Les contacts sont déposés à l'avant et à l'arrière par métallisation à travers des motifs gravés par photolithographie selon les techniques habituelles, avant traitement antireflet.

Les rendements actuels de ce type de cellules thermophotovoltaïques avec un corps noir à 1 000 °C sont estimés autour de 20 %, pour un rendement limite théorique de 52 % dans cette configuration, ce qui signifie que des progrès sont encore réalisables.

❖ Cellules en InGaAsSb

La composition relative des constituants des matériaux InGaAsSb (antimoniure et arséniure mixte de gallium et d'indium) peut être ajusté afin d'obtenir une bande interdite large de 0,55 eV, permettant d'atteindre un rendement quantique interne de 79 % avec un facteur de remplissage de 65 % pour un spectre d'émission d'un corps noir à 1 100 K. De tels composants ont été réalisés sur substrat GaSb par épitaxie en phase vapeur aux organométalliques, épitaxie par jet moléculaire et épitaxie phase liquide, permettant d'obtenir des rendements quantiques internes de 95 % par les deux premières méthodes et de 90 % par la troisième.

La grande difficulté de ce matériau est sa propension à l'hétérogénéité interne, par inconsistance de sa composition entraînant l'apparition de phases distinctes dans le matériau, qui nuisent fortement aux qualités électroniques de l'ensemble du composant.

❖ Cellules en InGaAs

La bande interdite du InGaAs de composition à adaptée au paramètre de maille du substrat InP vaut 0,74 eV, ce qui est un peu plus élevé (et donc moins adapté aux infrarouges) que celle des composants à GaSb. On a pu produire des composants de ce type avec un rendement interne de 15 % et un facteur de remplissage de 69 %. Afin d'absorber des photons

de plus grande longueur d'onde, il faut ajuster la composition du matériau de l'indium vers le gallium, ce qui permet de jouer sur une largeur de bande interdite allant de 0,4 eV à 1,4 eV. Cela conduit naturellement à faire varier également le paramètre de maille du réseau cristallin, d'où des contraintes à l'interface avec le substrat. On peut remédier à cela en ajustant la composition de la couche InGaAs de façon à la faire varier progressivement au cours de sa croissance sur le substrat : en procédant ainsi par épitaxie par jet moléculaire, on a pu obtenir des composants ayant un rendement quantique interne de 68 % et un facteur de remplissage de 68 %. Ce composant avait également une bande interdite de 0,55 eV obtenue avec la composition $\text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{As}$.

L'avantage des composants en InGaAs est de reposer sur un matériau à la technologie bien maîtrisée, dont on est capable d'ajuster avec une grande précision la composition afin d'obtenir le paramètre de maille ou la largeur de bande interdite souhaitée. On peut ainsi faire croître de telles couches minces sur substrat germanium avec un parfait accord de maille pour la composition $\text{In}_{0,015}\text{Ga}_{0,985}\text{As}$ et très peu de défauts cristallins, un tel substrat présentant un indéniable avantage en termes de coût par rapport à des substrats plus élaborés et difficiles à produire.

❖ Cellules en InPAsSb

L'alliage quaternaire InPAsSb a été obtenu par épitaxie en phase vapeur aux organométalliques et épitaxie en phase liquide. Ajusté au paramètre de maille du substrat InAs, sa bande interdite a une largeur allant de 0,3 eV à 0,55 eV. L'intérêt de systèmes thermophotovoltaïques à base de matériaux ayant une bande interdite aussi étroite n'a pas encore été suffisamment investigué, de sorte que les cellules correspondantes n'ont pas été optimisées et que leurs performances n'ont pas été rendues compétitives. Néanmoins, l'obtention de rendements quantiques internes élevés aux grandes longueurs d'onde avec les matériaux à bande interdite étroite est rendue difficile par l'augmentation des phénomènes de recombinaison Auger.

I.2.4. Applications TPV [14]

Outre le développement de nouvelles cellules PV et la technologie de l'émetteur, les nombreuses applications TPV pour la conversion de l'énergie sont également une force motrice dans la résurgence du TPV intérêt. La simplicité et la haute efficacité de potentiel de la conversion TPV sont les deux caractéristiques intéressantes que conduire à de nombreuses applications potentielles. Depuis TPV est un processus direct de conversion de l'énergie, les seules parties mobiles dans le système sont les ventilateurs ou les pompes qui peuvent être utilisés pour le refroidissement des cellules PV. Les composants du système sont la source thermique, l'émetteur (et éventuellement un filtre), les cellules PV. Chacun de ces composants est dans l'état solide avec seulement les cellules PV et éventuellement le filtre étant un peu complexe dispositif à état solide. Outre la simplicité et le potentiel de rendement de conversion, TPV peut facilement être associée à toute source thermique. Les demandes de TPV existent où la source thermique peut être l'énergie solaire, l'énergie nucléaire, ou la combustion. À première vue, il semblerait que l'énergie solaire un TPV (STPV) système n'aurait aucun avantage sur un système classique solaire PV. L'ajout d'un émetteur sélectif ou émetteur thermique plus filtre, le spectre solaire, ce qui correspond approximativement à un

6000 K émetteur corps gris, peut être déplacé en fonction de la bande écart l'énergie des cellules PV. En conséquence, le système STPV permettra d'accroître l'efficacité de système classique d'énergie solaire PV. Outre l'efficacité, une même raison, plus importante à l'intérêt pour STPV l'énergie conversion est la capacité de stockage de l'énergie thermique et l'énergie de combustion d'entrée pour que le système puisse fonctionner lorsque le soleil n'est pas disponible. Avec une capacité de 24 heures sur 24 de fonctionnement, STPV est viable pour utilitaire électrique utilisé. un TPV système alimenté par radio-isotope decay (RTPV) est l'une des possibilités du système d'alimentation de missions dans l'espace lointain où le rayonnement solaire densité d'énergie est trop faible pour un PV classiques système de pouvoir être utilisé. Le premier radio-isotope alimentation décroissance systèmes thermoélectriques utilisés convertisseurs d'énergie (RTG). Toutefois, TPV a le potentiel pour plus d'efficacité thermoélectriques de ; par conséquent, il est considéré comme étant un remplacement. La combustion entraînée TPV a de nombreuses applications commerciales potentielles. Pour le gaz naturel, ont tiré les appareils tels que les chaudières et réservoirs à eau chaude, TPV peut être ajouté pour la cogénération d'électricité. Dans de telles applications, atteindre un haut l'efficacité TPV n'est pas indispensable étant donné que la perte de chaleur du processus de conversion TPV est complètement utilisée. Blocs d'alimentation pour ordinateurs portables pour les secteurs commercial et militaire est un autre important la combustion TPV application. Un important avantage TPV existantes de combustion interne-driven applications est fonctionnement silencieux. Cela est particulièrement vrai en missions militaires qui exigent que la mission d'être inaperçues. Un autre combustion-driven TPV application présentant un potentiel commercial est l'alimentation de véhicules électriques hybrides.

Dans le cas d'une telle application TPV le système est dimensionné pour fournir suffisamment de puissance pour le fonctionnement en vitesse de croisière et de charge de la batterie. Pour l'accélération puissance les batteries sont utilisées.

Un avantage important de toutes les applications TPV c'est qu'ils sont respectueux de l'environnement. Le système TPV est pratiquement silencieux et émet aucune pollution. C'est évident dans le cas de l'énergie solaire un système d'entraînement. Pour une propulsion nucléaire système il n'y a aucun produit de combustion ; cependant, soins doivent être pris pour assurer que des matières radioactives ne soient libérées. Pression atmosphérique combustion se produit lors de la combustion-driven systèmes TPV. Par conséquent, la température de combustion peut être bien contrallée afin que la production de toxiques oxydes nitreux (NOX) est petit.

I.2.5. Etude bibliographique

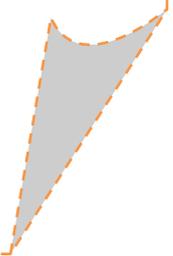
Le thermo-photovoltaïque est une extension de la conversion photovoltaïque, initialement utilisée pour convertir le rayonnement solaire (Becquerel [1839]) [20], au rayonnement thermique d'un corps chaud quelconque. Le poitevin de naissance, Pierre Aigrin, a été souvent cité (Bro-man [1995]; Coutts [1999]; White et al. [1961]) [23, 25,29] comme étant le père du convertisseur thermo-photovoltaïque. Il en fit effectivement une présentation dans le cadre de cours qu'il dispensa en 1960 au MIT (Aigrin [1960]) [18]. Nelson, dans sa brève histoire du

développement du TPV (Nelson [2003]) [28], relevant cependant l'incertitude qui plane sur la date et le lieu exacts de l'invention des systèmes TPV, est le premier à corriger cette information en reconnaissant sa primauté au système proposé par Kolm (Kolm [1956]) [26] dans le même établissement où Aigrin donna ses conférences. Le système de Kolm utilisait des composants du commerce : une lampe de camping à gaz pour source thermique et une cellule en silicium. Il obtint en sortie une puissance de 1 watt électrique et proposa des améliorations qui permettraient d'atteindre un rendement de 10% (Nelson [2003]) [28]. Or, quelques années plus tôt, les laboratoires de la RCA avaient déjà effectué la première réalisation d'un système TPV ayant pour émetteur un déchet radioactif, du strontium-90, avec des rendements très faibles toutefois, ne dépassant très probablement pas le pour-cent. C'était là, l'ancêtre des systèmes TPV GTR (Générateur Thermique à Radio-isotope) proposés des décennies plus tard pour des applications spatiales (Anderson et al. [2005] ; Murray et al. [2004]) [19, 27].

Par ailleurs, les systèmes TPV ont reçu depuis le début des années 1990, grâce à la mise au point de convertisseurs photovoltaïques à bande interdite étroite particulièrement pertinents pour la conversion du rayonnement infrarouge, un intérêt croissant (Nelson [2003]). Les réalisations expérimentales présentent toutefois à ce jour, avec des rendements ne dépassant pas les quelques pourcents (4%), des performances limitées (Bermel et al. [2010]; Bitnar et al. [2013]; Chan et al.[2013]) [21,22]. Les principaux verrous pour accéder à des performances plus élevées résident dans le contrôle spectral du rayonnement thermique en premier lieu, la maximisation du facteur de forme de la source de chaleur à la cellule ensuite, et en dernier lieu, la conception de réacteurs à rendement élevé lorsque la chaleur est issue d'une réaction chimique (Chan et al. [2013]). [15, 24].

CHAPITRE II

*Rappels sur transfert de
chaleur par rayonnement*



II.1. Rappel sur les transferts de chaleur

Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid. Le flux de chaleur dont la densité locale est noté φ est une grandeur vectorielle, ce qui signifie qu'un flux de chaleur est caractérisé non seulement par son intensité mais aussi par sa direction. Il est défini en chaque point de l'espace et à l'unité d'une densité surfacique de puissance (W/m^2).

Il y existe trois modes de transfert de chaleur :

II.1.1. La conduction

La conduction représente le processus de propagation de la chaleur par le contact direct entre les particules du corps dont les différentes parties ne sont pas isothermes. Dans les solides diélectriques la conduction se fait par les ondes élastiques (les phonons) et dans les solides conducteurs électriques par la diffusion des électrons ou porteurs de charge mobiles en parallèle avec les ondes élastiques. Dans les liquides en l'absence de convection, la conduction de la chaleur se fait également par l'intermédiaire des ondes élastiques. Dans les gaz en l'absence de convection, la conduction s'effectue par la diffusion moléculaire.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier [30] : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température (fig. II.1) :

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

Ou sous forme algébrique :

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

Avec :

- φ_{con} : flux de chaleur transmis par conduction (W)
- k_{con} : conductivité thermique du milieu (W/mK)
- x : variable d'espace dans la direction du flux (m)
- S : aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

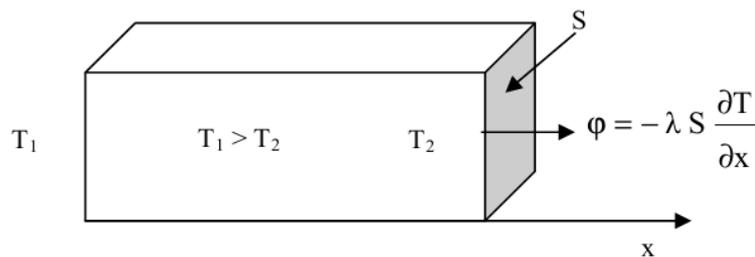


Fig. II.1 : Schéma du transfert de chaleur par conduction

II.1.2. La convection

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

On distingue :

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

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide (fig. II.2), l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton [30, 31] :

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

Avec :

- φ_{cov} : flux de chaleur transmis par convection (W)
- h_{cov} : coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
- T_p : température de surface de solide (K)
- T_∞ : température de fluide loin de la surface (K)
- S : aire de surface de contact solide/fluide (m^2)

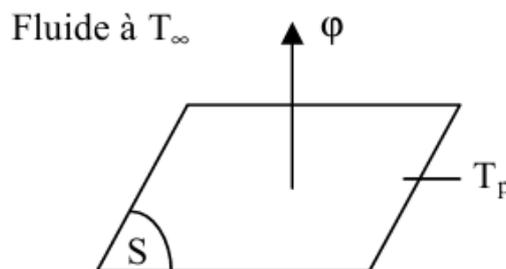


Fig. II.2 : Schéma du transfert de chaleur convectif

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

II.1.3. Le rayonnement

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

Lorsque le feu est mourant, les flammes et les braises prennent une coloration rouge sombre et donnent moins de lumière et à peine moins de chaleur. Au bout d'un moment, les flammes disparaissent, les braises encore rouges se ternissent, s'assombrissent et finalement ne rougeoient plus du tout. Les braises tièdes n'émettent plus de clarté, mais elles continuent à rayonner de la chaleur. On ressent la douce tiédeur du feu mourant pendant des heures, alors qu'il n'éclaire plus et émet de la chaleur seulement sous forme de radiations infrarouges [32].

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation (fig. II.3) :

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

Avec :

- φ_{ray} : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)
- σ : Constante de Stefan ($5.67 \cdot 10^{-34}$ J.s)
- ε : Facteur d'émission de la surface
- T_p : Température de la surface (K)
- T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K)
- S : Aire de la surface (m^2)

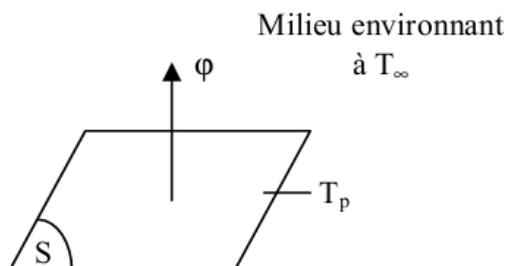


Fig. II.3 : Schéma du transfert de chaleur radiatif

II.2. Transfert de chaleur par rayonnement

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

II.2.1. Le spectre électromagnétique

Dans la transmission de chaleur par rayonnement, le transfert thermique s'effectue par des vibrations électromagnétiques qui se propagent en ligne droite sans aucun support de matière. Le rayonnement thermique concerne les ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde couvre le spectre ultraviolet et le spectre infrarouge (0,1 à 100) en passant le spectre visible (0,38 à 0,76). Le rayonnement peut être décomposé en radiations monochromatiques qui concernent une longueur d'onde déterminée. Aux températures des applications industrielles, le rayonnement est surtout constitué par de l'infrarouge. Lorsqu'un flux d'énergie rayonnée rencontre un corps, une partie de l'énergie est absorbée, une partie est réfléchi, une partie continue son trajet après avoir traversé le corps. Si toute l'énergie incidente est absorbée, le corps est appelé corps noire ou radiateur intégral. Si une partie de l'énergie est absorbée, mais que cette partie est constante quelle que soit la longueur d'onde de l'énergie incidente, on dit que l'on a affaire à un corps gris (dans le cas contraire, à un corps coloré). Si la proportion d'énergie absorbée est indépendante de l'angle d'incidente du rayonnement reçu, on dit que le corps est mat (dans le cas contraire, on dit qu'il est poli). Si aucune énergie ne traverse le corps, on dit que ce dernier est opaque (le contraire de transparent). Contrairement à l'œil humain qui n'est capable de capter le rayonnement que dans une fenêtre très étroite du spectre électromagnétique, celle correspondent au domaine du visible (longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,7), les capteurs satellitaires utilisent une fraction beaucoup plus étendue du spectre.

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

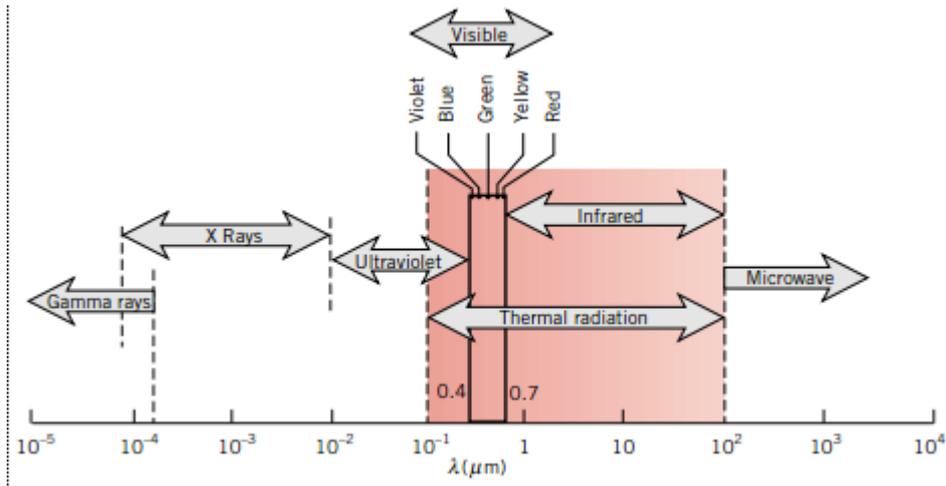


Fig. II.4 : Le spectre électromagnétique [33].

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

✓ **Les rayons gamma (γ) :** ils sont dus aux radiations émises par les éléments radioactifs. Très énergétiques, ils traversent facilement la matière et sont très dangereux pour les cellules vivantes. Leurs longueurs d'onde s'étendent d'un centième de milliardième (10^{-14} m) à un milliardième (10^{-12} m) de millimètre.

✓ **Les rayons X :** rayonnements très énergétiques traversant plus ou moins facilement les corps matériels et un peu moins nocifs que les rayons gamma, ils sont utilisés notamment en médecine pour les radiographies, dans l'industrie (contrôle des bagages dans le transport aérien), et dans la recherche pour l'étude de la matière. Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre un milliardième (10^{-12} m) et un cent millième (10^{-8} m) de millimètre.

✓ **Les ultraviolets :** rayonnements qui restent assez énergétiques, ils sont nocifs pour la peau. Heureusement pour nous, une grande part des ultraviolets est stoppée par l'ozone atmosphérique qui sert de bouclier protecteur des cellules. Leurs longueurs d'onde s'échelonnent d'un cent millième (10^{-8} m) à quatre dixièmes de millième ($4 \cdot 10^{-7}$ m) de millimètre.

✓ **Le domaine visible :** correspond à la partie très étroite du spectre électromagnétique perceptible par notre œil. C'est dans le domaine visible que le rayonnement solaire atteint son maximum ($0,5 \mu\text{m}$) et c'est également dans cette portion du spectre que l'on peut distinguer l'ensemble des couleurs de l'arc en ciel, du bleu au rouge. Il s'étend de quatre dixièmes de millième ($4 \cdot 10^{-7}$ m) - lumière bleue à huit dixièmes de millième ($8 \cdot 10^{-7}$ m) de millimètre - lumière rouge.

✓ **L'infrarouge :** rayonnement émis par tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu (-273°C). En télédétection, on utilise certaines bandes spectrales de l'infrarouge pour mesurer la température des

surfaces terrestres et océaniques, ainsi que celle des nuages. La gamme des infrarouges couvre les longueurs d'onde allant de huit dixièmes de millièmètre de millièmètre ($8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$) à un millièmètre (10^{-3} m).

✓ **Les ondes radar ou hyperfréquences** : Cette région du spectre est utilisée pour mesurer le rayonnement émis par la surface terrestre et s'apparente dans ce cas à la télédétection dans l'infrarouge thermique, mais également par les capteurs actifs comme les systèmes radar. Un capteur radar émet son propre rayonnement électromagnétique et en analysant le signal rétrodiffusé, il permet de localiser et d'identifier les objets, et de calculer leur vitesse de déplacement s'ils sont en mouvement. Et ceci, quelque soit la couverture nuageuse, de jour comme de nuit. Le domaine des hyperfréquences s'étend des longueurs d'onde de l'ordre du centimètre jusqu'au mètre.

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

II.2.2. Grandeurs relatives aux surfaces émettant un rayonnement

II.2.2.1. Flux d'une source

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

II.2.2.2. Emittance d'une source

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

$$M = \frac{d\varphi}{dS} \quad (W/m^2) \quad (II.5)$$

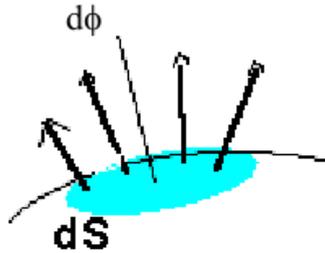


Fig. II.5 : Emittance d'une source [36]

Cette émittance peut aussi être définie en fonction de la longueur d'onde, il s'agit alors de l'émittance monochromatique « M_λ » telle que :

$$M = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda \quad (\text{II.6})$$

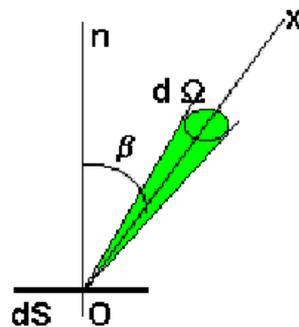
Nous verrons ultérieurement l'importance de cette grandeur dans la loi fondamentale du rayonnement.

II.2.2.3. Intensité d'une source dans une direction « Ox »

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

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

$$I_{Ox} = \frac{d\varphi_{Ox}}{d\Omega} \quad (\text{W/sr}) \quad (\text{II.7})$$

Fig. II.6 : intensité de la source dans la direction Ox [36]

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

$$I_{Ox} = \int_0^\infty I_{Ox,\lambda} d\lambda \quad (\text{II.8})$$

II.2.2.4. Luminance d'une source dans une direction « Ox »

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

$$L_{Ox} = \frac{I_{Ox}}{dS'} \quad (W/m^2.sr) \quad (II.9)$$

Avec :

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

Et

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

On trouve :

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

Remarque :

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

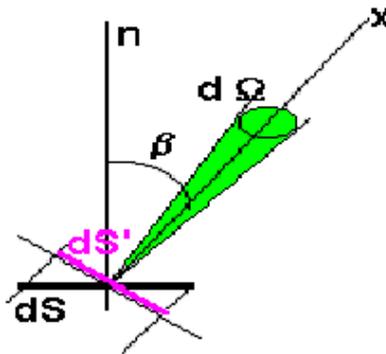


Fig. II.7 : Luminance d'une source dans une direction Ox

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

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

II.2.2.5 Loi de Lambert

Les sources dont la luminance est indépendante de la direction sont dites obéir à la loi de LAMBERT, ou encore source à émission isotrope ou diffuse. Dans ce cas : $L_{Ox} = L$, indépendante de la direction Ox

$$\text{Donc : } L_{Ox} = \frac{I_{Ox}}{dS \cos \beta}$$

Dans ces conditions une relation simple lie la luminance et l'émittance d'un corps :

$$M = \frac{d\varphi}{dS} = \pi L \quad (\text{II.12})$$

II.2.3 Grandeurs relatives aux surfaces recevant un rayonnement

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

II.2.3.1 Eclairement

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

$$E = \frac{d\varphi}{dS} \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{II.13})$$

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

II.2.3.2 Radiosité et flux nette perdue

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

$$J_i = \varepsilon_i \sigma T^4 + (1 - \varepsilon_i) E_i \quad (\text{II.14})$$

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

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

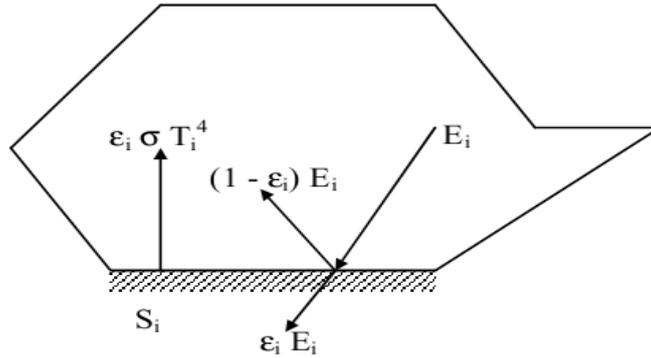


Fig.2.8 : Schématisation des flux de rayonnement sur une surface

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

$$\varphi_{i_{\text{net}}} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \varepsilon_i E_i \quad (\text{II.15})$$

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

$$E_i = \frac{1}{1 - \varepsilon_i} (J_i - \varepsilon_i \sigma T_i^4) \quad (\text{II.16})$$

Nous obtenons :

$$\varphi_{i_{\text{net}}} = \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (\sigma T_i^4 - J_i) = \varepsilon_i (\sigma T_i^4 - E_i) = J_i - E_i \quad (\text{II.17})$$

II.3 Rayonnement des corps noirs

II.3.1 Définition du corps noir

L'émetteur idéal est le corps qui, pour une température donnée, émet le maximum d'énergie, ce corps s'appelle 'le corps noir'. Pour les corps noir, le facteur d'absorption est donc égal à l'unité pour toutes les directions et pour toutes les longueurs d'onde. Ce corps absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit sans en réfléchir ni transmettre une quelconque fraction, c'est le corps de référence [35].

Pour corps noir : $\alpha = \alpha_\lambda = 1$

Remarque : par convention toutes les grandeurs relatives au corps noir auront l'exposant °. (Ex : M° , L° , ...).

II.3.2. Loi de Planck

A partir de la théorie des quantas, Planck a établi la relation liant l'émittance monochromatique M_λ° du corps avec sa température et la longueur d'onde λ [36].

$$M_{\lambda,T}^\circ = \frac{2\pi c^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

- $c = C_0/n$, et n : l'indice de réfraction du milieu et $C_0 = 2,9979 \cdot 10^8$ m/s.
- h : est la constante de Planck, $h = 6,6255 \cdot 10^{-34}$ J.s.
- k : est la constante de Boltzmann, $k = 1,3805 \cdot 10^{-23}$ J/K.
- T : température en K.
- λ : longueur d'onde en m ou μ .

Un corps noir vérifiant par définition la loi de Lambert, son luminance monochromatique (ou spectrale) vaut :

$$L_{\lambda,T}^{\circ} = M_{\lambda,T}^{\circ} / \pi . \quad (\text{II.19})$$

Donc, la luminance monochromatique s'exprime sous la forme :

$$L_{\lambda,T}^{\circ} = \frac{2c^2\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1} \quad (\text{II.20})$$

La figure suivante montre le tracé de $L_{\lambda,T}^{\circ}$ pour différentes valeurs de T .

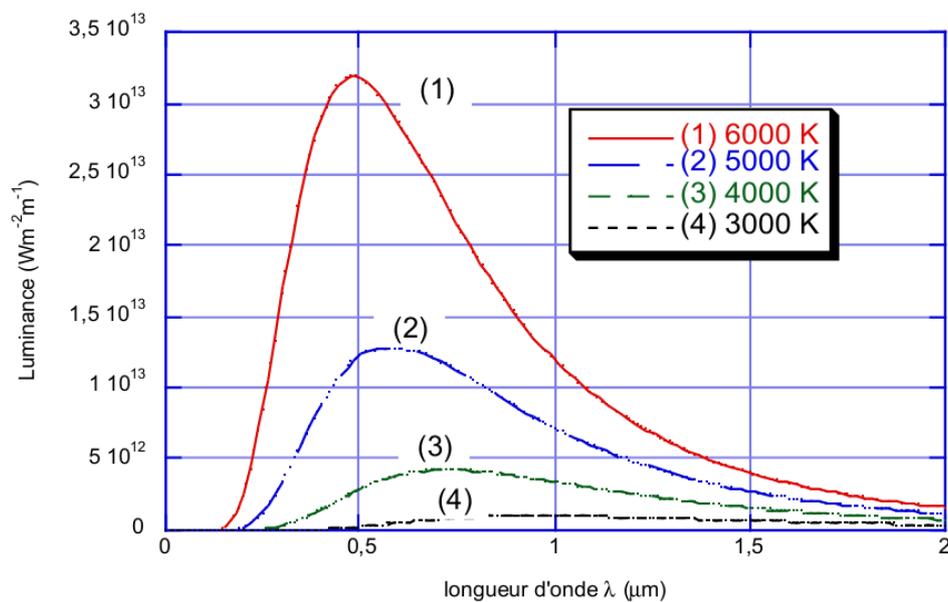


Fig. II.9 : Loi de Planck distribution spectrale de la luminance d'un corps noir en fonction T [36].

II.3.3 Lois de WIEN

➤ 1^{ère} Loi de WIEN ou lois du déplacement

L'émittance spectrale présente un maximum pour une valeur λ_m qui obéit simplement à la loi du déplacement de Wien (dit aussi constante de Wien) [35]:

$$\lambda_m T = 2898 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (\text{II.21})$$

Cette loi est fondamentale pour comprendre un certain nombre de phénomènes faisant appel au rayonnement comme, par exemple, l'effet de serre.

➤ 2^{ème} Loi de WIEN

Cette loi fournit la valeur du maximum $M_{\lambda,m}^\circ$ en fonction de T. Elle s'exprime sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} M_{\lambda,m}^\circ &= 1,287 \cdot 10^{-5} T^5 && (\text{W/m}^3) \\ M_{\lambda,m}^\circ &= 1,287 \cdot 10^{-11} T^5 && (\text{W/m}^2\mu\text{m}) \end{aligned} \quad (\text{II.22})$$

Remarque :

- Le déplacement de λ_m vers les courtes longueurs d'onde, lorsque T croît explique le fait que, pendant son échauffement, un corps n'émet d'abord que dans l'infrarouge (radiations non visibles), puis commence à rougir avant de blanchir ("chauffé au rouge" ou "chauffé à blanc").
- Il n'y a pratiquement pas de recouvrement entre la partie utile du spectre du rayonnement solaire ($T \approx 5780 \text{ K}$) et celui d'un corps de température peu supérieure à l'ambiante ; cette propriété est exploitée dans des applications de type serres, vérandas, capteurs solaires...

II.3.4. Loi de Stefan Boltzmann :

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

$$M^\circ = \sigma T^4 \quad (\text{II.23})$$

Avec
$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15C^2 h^3}$$

C'est la loi de Stefan Boltzmann où :

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

II.4. Rayonnement des corps réels

II.4.1. Emission des corps réels

L'évaluation des propriétés émissives des substances réelles se fait à partir de celles du corps noir placé dans les mêmes conditions de température et de longueur d'onde à l'aide de coefficients appelés émissivités, monochromatiques ou totales, directionnelles ou hémisphériques.

On définit :

- ❖ Émissivité monochromatique directionnelle

$$\varepsilon_{n,\lambda} = \frac{L_{n,\lambda}}{L_{\lambda}^{\circ}} \quad (\text{II.24})$$

- ❖ Émissivité totale directionnelle

$$\varepsilon_n = \frac{\int_0^{\infty} L_{n,\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{\lambda}^{\circ} d\lambda} = \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \varepsilon_{n,\lambda} L_{\lambda}^{\circ} d\lambda \quad (\text{II.25})$$

- ❖ Émissivité monochromatique hémisphérique

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{M_{\lambda}}{M_{\lambda}^{\circ}} \quad (\text{II.26})$$

- ❖ Émissivité totale hémisphérique

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{\lambda}^{\circ} d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} M_{\lambda}^{\circ} d\lambda}{\sigma T^4} \quad (\text{II.27})$$

II.4.2. Réflexion, absorption et transmission du rayonnement par un corps :

Soit φ_i le flux incident, « φ_r » le flux réfléchi, « φ_t » le flux transmis et « φ_a » le flux absorbé, la conservation de l'énergie s'écrit :

$$\varphi_i = \varphi_r + \varphi_a + \varphi_t \quad (\text{II.28})$$

Posons :

$$\rho = \frac{\varphi_r}{\varphi_i} = \text{Facteur de réflexion (réflectivité)}.$$

$$\alpha = \frac{\varphi_a}{\varphi_i} = \text{Facteur d'absorption (absorptivité)}.$$

$$\tau = \frac{\varphi_t}{\varphi_i} = \text{Facteur de transmission}.$$

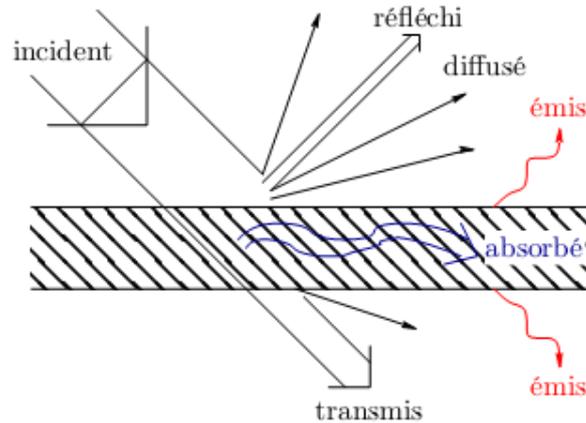


Fig. II.10 : Processus d'interaction rayonnement/matière

La conservation de l'énergie s'écrit :

$$\rho + \alpha + \tau = 1. \quad (\text{II.29})$$

Ces paramètres caractérisent le comportement d'un corps vis-à-vis du rayonnement reçu, le coefficient « α » est important en thermique. Il mesure la proportion de conversion de rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique.

☞ Remarque :

Le coefficient α est faible pour les surfaces métalliques polis et non oxydées, il augmente pour les corps qui apparaissent noirs mais reste toujours inférieur à l'unité.

II.4.3. Loi de KIRCHHOFF

Cette loi établit un rapport entre les propriétés émissives et absorbantes d'un corps. Pour la démontrer, on considère un corps placé dans une enceinte fermée dont les parois possèdent les propriétés d'un corps noir. Tout le système est en équilibre thermique à une température uniforme T , et le corps considéré n'enregistre donc ni gain ni perte thermique [36].

Dans ces conditions, un élément de surface dS du corps émet dans un angle solide élémentaire $d\Omega$ entourant une direction Ox inclinée d'un angle β sur la normale un flux monochromatique :

$$(d^2\varphi_{Ox,\lambda})_{\text{émis}} = \varepsilon_{Ox,\lambda} L_{\lambda}^{\circ} dS \cos\beta d\Omega \quad (\text{II.30})$$

Simultanément, la surface dS reçoit dans le même angle solide $d\Omega$, et à la même longueur d'onde λ , un flux émis par l'enceinte noire qui a pour valeur : $L_{\lambda}^{\circ} dS \cos\beta d\Omega$

Le corps considéré en absorbera donc une partie :

$$(d^2\varphi_{Ox,\lambda})_{\text{absorbé}} = \alpha_{Ox,\lambda} L_{\lambda}^{\circ} dS \cos\beta d\Omega \quad (\text{II.31})$$

L'équilibre thermique du corps implique l'égalité des flux émis et absorbé, d'où la relation suivante qui exprime la Loi de KIRCHHOFF :

$$\epsilon_{0x,\lambda} = \alpha_{0x,\lambda} \quad (\text{II.32})$$

Dans le cas où les rayonnements émis et reçus par le corps sont parfaitement répartis sur l'ensemble des directions de l'espace hémisphérique (cas d'une émission et d'un éclairage diffus), la loi de KIRCHHOFF précédente est également applicable aux propriétés monochromatiques hémisphériques :

$$\epsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$$

Il n'est généralement pas possible d'étendre la loi de KIRCHHOFF au rayonnement total émis et absorbé par un corps quelconque, et donc de considérer que $\epsilon = \alpha$.

Cette fonction $\epsilon(T)$ est une propriété caractéristique du seul corps émetteur, dépendant de son émissivité monochromatique ϵ_{λ} , et variant avec sa température T . Par contre, le coefficient d'absorption total de ce même corps est la fraction « α » absorbée par le corps, sur l'ensemble des longueurs d'ondes incidentes. Si E_{λ} est l'éclairage monochromatique tombant sur le corps, on a :

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda}{E} \quad (\text{II.33})$$

Le coefficient d'absorption α dépend donc lui aussi du corps considéré, par l'intermédiaire des α_{λ} , mais aussi de la composition spectrale du rayonnement reçu E_{λ} , et donc en définitive de la nature et de la température du corps qui a émis le rayonnement absorbé. C'est pourquoi le coefficient d'absorption total α ne saurait être une caractéristique intrinsèque d'un corps, comme l'est son émissivité totale $\epsilon(T)$.

D'une manière générale, on aura donc : $\alpha \neq \epsilon$

Il y a deux exceptions importantes à cette situation :

- ➔ Le corps noir, défini par les propriétés ;

$$\epsilon_{\lambda} = 1 \quad \text{et} \quad \alpha_{\lambda} = 1 \quad \text{quel que soit } \lambda.$$

Il en résulte immédiatement que ; $\epsilon = \alpha$

- ➔ Le corps gris, défini par la propriété ;

$$\epsilon_{\lambda} = \epsilon \quad \text{quel que soit } \lambda$$

La relation : $\epsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$ entraîne donc : $\alpha_{\lambda} = \epsilon$ quelque soit λ

C'est-à-dire encore : $\epsilon = \alpha$

II.4.4. Notion de corps gris

Hypothèse simplificatrice : toutes les surfaces en présence auront une émissivité indépendante de la direction d'émission et de la longueur d'onde, tout comme un corps noir, mais à des niveaux d'énergie moindres. De tels corps pourront alors être qualifiés de gris, et seront caractérisés du point de vue de leurs propriétés radiatives par les relations suivantes :

$$\varepsilon_{Ox} = \varepsilon_{Ox,\lambda} = \varepsilon = \text{constante}$$

L'émittance totale d'un corps gris sera alors déduite celle du corps noir donnée par la loi de STEFAN-BOLTZMANN :

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad \text{W/m}^2$$

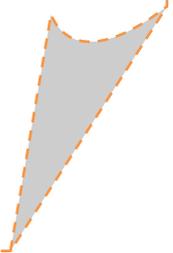
Le tableau suivant donne quelques valeurs d'émissivités ε

Nature de la substance	Emissivité ε
Réfractaire	0,8
Peinture réfléchissante	0,3
Fer poli	0,15 (20°C) à 0,35 (900°C)
Aluminium poli	0,05
Aluminium oxydé	0,15

Tableau II.1 : l'émissivité de quelques substances [36].

CHAPITRE III

Modélisation numérique



III.1. Introduction aux méthodes numériques

Le principe d'un modèle est de remplacer un système complexe en un objet ou opérateur simple reproduisant les aspects ou comportements principaux de l'original (ex : modèle réduit, maquette, modèle mathématique ou numérique, modèle de pensée ou raisonnement).

Dans la nature, les systèmes et phénomènes physiques les plus intéressants sont aussi les plus complexes à étudier. Ils sont souvent régis par un grand nombre de paramètres non-linéaires interagissant entre eux (la météorologie, la turbulence des fluides...).

L'une des solutions est de recourir à une série d'expériences pour analyser les paramètres et grandeurs du système. Mais les essais peuvent s'avérer très coûteux (essais en vol, essais avec matériaux rares, instrumentations très chères...) et ils peuvent être très dangereux (essais nucléaires, environnement spatial...). Enn il peut être difficile de mesurer tous les paramètres : échelles du problème trop petites (chimie du vivant, couche limite en fluide...) ou trop grandes (astrophysique, météorologie, géophysique...).

On peut aussi construire un modèle mathématique permettant la représentation du phénomène physique. Ces modèles utilisent très souvent des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) non-linéaires dont on ne connaît pas de solutions analytiques en général. Il faut alors résoudre le problème numériquement en transformant les équations continues de la physique en un problème discret sur un certain domaine de calcul (le maillage). Dans certains cas il s'agit de la seule alternative (nucléaire, astrophysique, spatial...). Dans d'autres cas, les simulations numériques sont menées en parallèle avec des expérimentations.

Les différentes étapes pour modéliser un système complexe :

- Recherche d'un modèle mathématique représentant la physique. Mise en équation.
- Elaboration d'un maillage. Discrétisation des équations de la physique.
- Résolution des équations discrètes (souvent systèmes linéaires à résoudre).
- Transcription informatique et programmation des relations discrètes.
- Simulation numérique et exploitation des résultats.

III.2. Les trois grandes familles de méthodes

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation consiste à ramener la résolution de l'équation aux dérivées partielles (EDP) dans un domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution des champs à l'intérieur du domaine d'étude. Pour passer d'un problème exact continu régis par une EDP au problème approché discret, il existe trois grandes familles de méthodes :

➤ III.2.1. Les différences finies.

La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre n_i de points discrets ou nœuds du maillage.

- **Avantages** : grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul.
- **Inconvénients** : limitation à des géométries simples, difficultés de prise en compte des conditions aux limites de type Neumann.

➤ III.2.2. Les volumes finis.

La méthode intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle des approximations discrètes conservatives et est particulièrement bien adaptée aux équations de la mécanique des fluides. Sa mise en œuvre est simple avec des volumes élémentaires rectangles.

- **Avantages** : permet de traiter des géométries complexes avec des volumes de forme quelconque, détermination plus naturelle des conditions aux limites de type Neumann.
- **Inconvénient** : peu de résultats théoriques de convergence

➤ III.2.3 Les éléments finis

La méthode des éléments finis a pris un essor considérable avec le développement des moyens informatiques. Dès années 1960, elle est devenue, par sa souplesse d'emploi et sa très grande généralité, une méthode numérique indispensable pour la résolution des problèmes aux dérivées partielles [37]. On va discuter sur cette méthode dans les titres suivants.

III.3. La méthode des éléments finis

III.3.1. Introduction

Les origines de la méthode des éléments finis remontent aux années 1950 lorsque des ingénieurs l'utilisèrent afin de simuler des problèmes de mécanique des milieux continus déformables. Depuis, le champ d'applications s'est considérablement étendu et les fondements théoriques de la méthode se sont amplement consolidés. Il existe de nos jours un nombre important de logiciels commerciaux et académiques qui utilisent la méthode des éléments finis comme un outil de simulation robuste pour des problèmes de mécanique des milieux continus, de mécanique des fluides, de thermique, d'électromagnétisme ou de finance, pour ne citer que quelques exemples.

L'essor de la méthode des éléments finis repose sur deux ingrédients fondamentaux. D'une part, les propriétés d'interpolation des éléments finis : ceux-ci permettent d'approcher des fonctions définies sur un domaine en maillant ce domaine puis en choisissant sur chaque maille des combinaisons linéaires de fonctions de forme (par

exemple polynômiales). D'autre part, la méthode de Galerkin, qui fournit un cadre d'approximation général pour une large classe de problèmes où l'inconnue est une fonction qui doit satisfaire une ou plusieurs équations aux dérivées partielles et des conditions aux limites.

III.3.2. Principe

La méthode de résolution par éléments finis permet de calculer des grandeurs physiques pour tous les points d'une structure donnée. Pour obtenir un résultat sur un domaine continu, il est nécessaire de discrétiser le volume ou la surface d'étude par un maillage, en la subdivisant en sous éléments : les éléments finis. Tous ces éléments sont interconnectés entre eux par des points particuliers appelés des nœuds [38].

Les solutions sont calculées uniquement pour chaque nœud, et l'approximation de la solution finale est interpolée dans chaque élément en partant des résultats obtenus pour les nœuds les délimitant. On ramène ainsi le problème d'un milieu continu à un ensemble de problèmes discrets contenant un nombre fini d'inconnues, elle permet ainsi de transformer les équations aux dérivées partielles en système d'équations algébriques. Le problème est alors exprimé sous forme matriciel [39].

III.3.3 Domaines d'application

La méthode des éléments finis est appliquée dans la majorité des domaines de la physique [40] ; la mécanique à l'électronique, en passant par la thermique et la météorologie [41] :

- ✓ Mécanique du solide
- ✓ Mécanique des sols
- ✓ Biomécanique
- ✓ Mécanique des fluides
- ✓ Mécanique quantique
- ✓ Transfert de chaleur
- ✓ Acoustique
- ✓ Electrostatique
- ✓ Réaction chimique
- ✓ Circuits électrique
- ✓ Electromagnétisme

III.3.4 Avantages et inconvénients de la méthode

La méthode des éléments finis est la plus utilisée puis que [45]:

- Elle peut traiter des problèmes géométriques complexes,
- Elle couvre de nombreux domaines de la physique,
- Les moyens informatiques actuels (puissance des calculateurs, outils de visualisation) la rende facile de mis en œuvre,
- De plusieurs logiciels généraux ou dédiés sont disponibles sur le marché,
- Le temps de calcul est relativement avantageux.

Cependant l'inconvénient majeur de cette méthode est la difficulté à modéliser des systèmes domaine ouvert.

III.4 Présentation du logiciel COMSOL

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

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

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

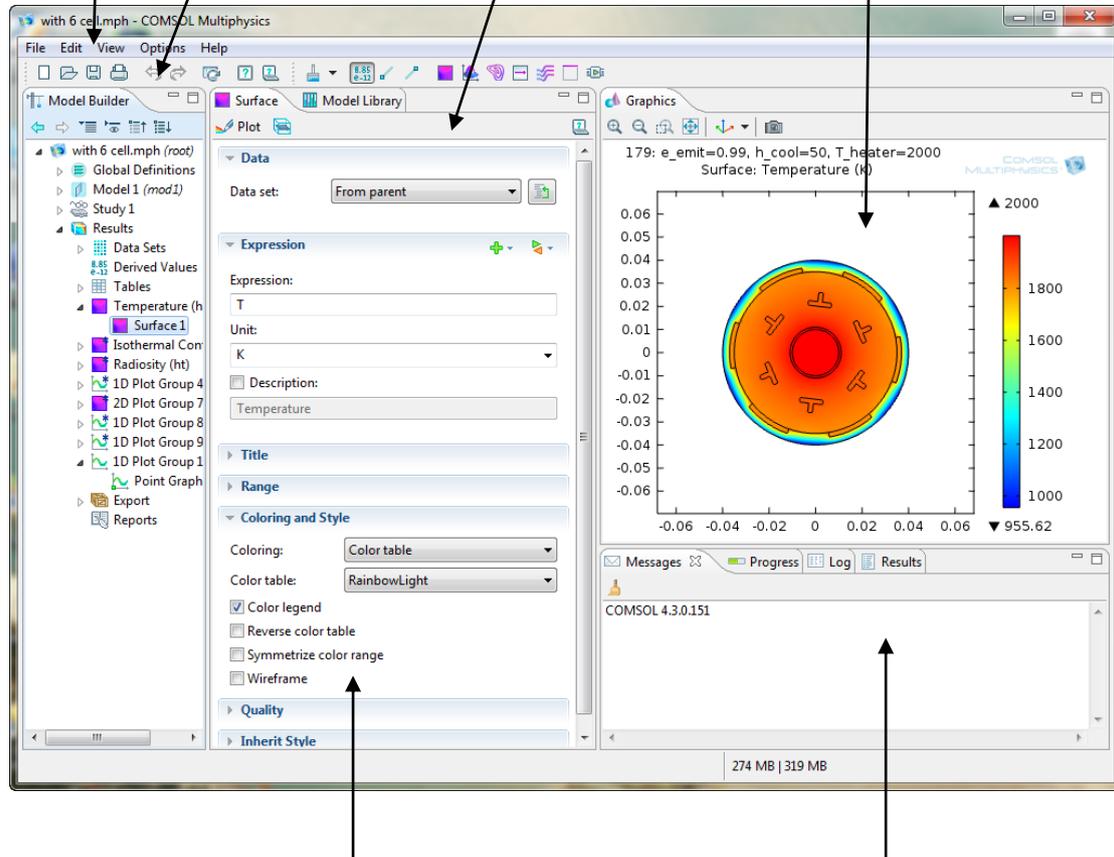
Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes multiphysiques. Il est ainsi possible d'étudiée un système thermophotovoltaïque (TPV) comme notre étude (Fig.III.1).

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

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

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

Menu principal Barre d'outils principal Fenêtre Paramètres fenêtre Graphique



Model Builder avec arbre du modèle

Messages, résultats, Progrès

Fig .III .1: Présentation de géomètre étudié dans COMSOL Multiphysics 4.3 [42].

III.5. Modélisation le problème physique

La géométrie du système étudié est représentée en figure. III.3. Ce système se compose de 6 miroirs pour concentrer le rayonnement du faisceau sur 6 cellules PV. Le combustible brûle à l'intérieur d'un dispositif émetteur qui émane intensément. Pour réduire la température des cellules, les cellules TPV sont refroidies entre le côté arrière et la surface de l'isolant.

Pour comprendre bien le système qui nous sommes étudié dans ce travail, la figure III.2 donne un aperçu sur système en réalité.



Fig.III.2 : Un système prototype [43].

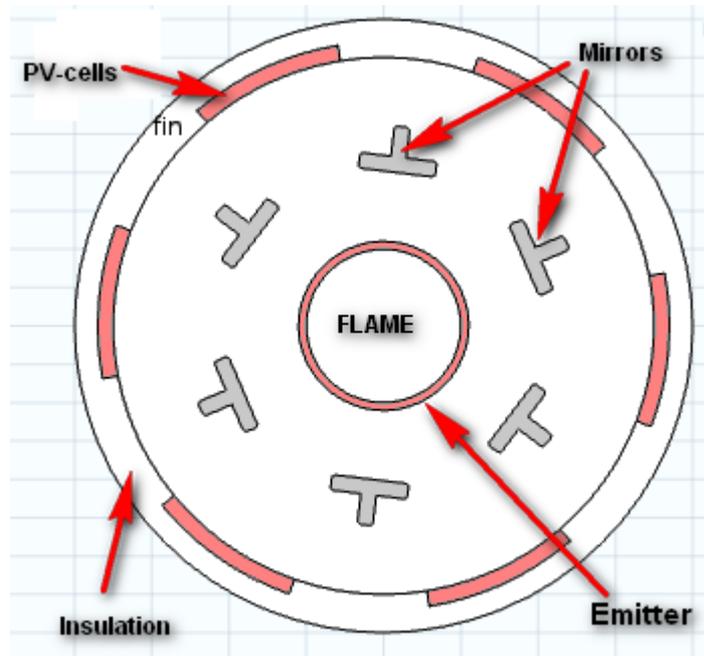


Fig. III.3 : La géométrie du système TPV modélisé

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

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k\nabla T) = Q \tag{III.1}$$

Avec :

ρ : La densité (kgm^{-3})

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

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

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

Pour les conditions aux limites, la conduction est toujours supposée, dans ces conditions, équation (III.1) donne :

$$-n(-k\nabla T) = h(T_{inf} - T) + (\varepsilon/(1 - \varepsilon))(J_0 - \sigma T^4) + q \quad (III.2)$$

Avec :

n : Le vecteur normal à la surface

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

T_{inf} : La température du liquide de refroidissement par convection (K)

ε : L'émissivité de la surface

J_0 : La radiosité de surface (W/m^2)

σ : La constante de Stefan Boltzmann.

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

$$q = G \eta_{pv} \quad (III.3)$$

Avec :

G : Le flux d'irradiation (W/m^2),

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

Celui-ci (η_{pv}) dépend de la température locale, avec un maximum de 0,2 à ($T_{PV-cell}=800$ K) et ($T_{source} = 1300$ K) [46] :

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

Le tableau III.1 résume les propriétés des matériaux et les paramètres utilisés :

<i>Paramètre</i>	<i>Expression</i>	<i>Description</i>
T_{source}	Entre (1000 à 3000) K	Température de l'émetteur
C_{p-air}	1100(Jkg ⁻¹ k ⁻¹)	Capacité thermique spécifique de l'air
h_{air}	5 (W/m ² K)	Coefficient de transfert de chaleur de l'air
T_{air}	293 K	Température de l'air
k_{ins}	0.05 (W/m.K)	Conductivité thermique de l'isolant
ρ_{is}	700 ($\frac{kg}{m^3}$)	Densité de l'isolant
C_{p-is}	100 (J/kg.K)	Capacité thermique spécifique de l'isolant
ϵ_{is}	0.1	Emissivité de l'isolant
k_m	10(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Conductivité thermique du miroir
ρ_m	5000 (kg.m ⁻³)	Densité du miroir
C_{p-m}	840 (J/kg.K)	Capacité thermique spécifique du miroir
ϵ_m	0.01	Emissivité du miroir
k_{emet}	10(W/m.K)	Conductivité thermique de l'émetteur
ρ_{emet}	2000 (kgm ⁻³)	Densité de l'émetteur
C_{p-emet}	900 (J/kg.K)	Capacité thermique spécifique de l'émetteur
ϵ_{emet}	entre (0.79 – 0.99)	Emissivité de l'émetteur
k_{pv}	93 (W/kg.K)	Conductivité thermique de cellule PV
ρ_{pv}	2000 ($\frac{kg}{m^3}$)	Densité de la cellule PV
C_{p-pv}	840 (J/kg.K)	Capacité thermique spécifique de la cellule PV
ϵ_{pv}	0.99	Emissivité de la cellule PV
h_{ref}	entre (30 , 50)(W/m ² K)	Coefficient de transfert de chaleur, l'eau de refroidissement
T_{ref}	273 K	Température de l'eau de refroidissement

Tab III.1 les propriétés du matériau et les paramètres utilisés

la solution stationnaire pour une gamme de températures d'émetteur (1000 K et 3000 K) a été calculer pour deux cas :

1^{ère} cas :

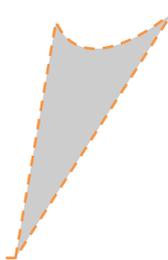
Émissivité de l'émetteur entre (0.79 et 0.99) et h_{ref} égale à 50 W/m²K

2^{ème} cas :

Coefficient de transfert de chaleur, l'eau de refroidissement « h_{ref} » entre (30 et 50) W/ m²K et émissivité de l'émetteur correspondant le cas typique : (0.99).

CHAPITRE IV

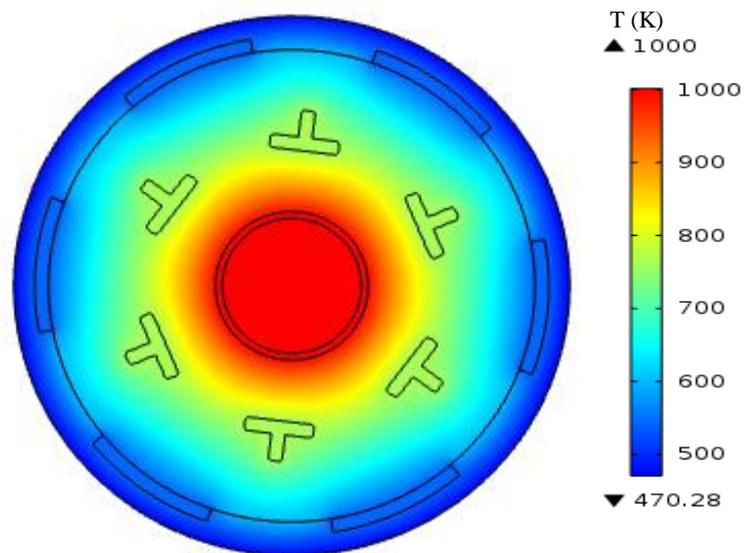
Résultats et discussion



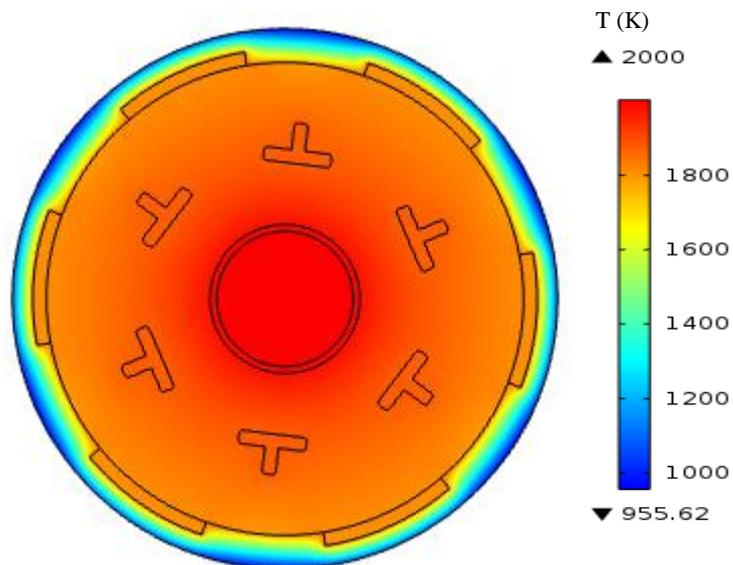
Une solution stationnaire pour une gamme de températures d'émetteur à partir de 1000 K à 3000 K est calculée en utilisant le code commercial COMSOL.

IV.1. Température du système

La figure IV.1 (a, b et c) représente la distribution de la température du système pour différentes températures d'émetteur : 1000K, 2000K et 3000K respectivement et pour $\varepsilon_{emit}=0.99$, $h_{ref}=50 W/m^2K$. On peut voir que le dispositif subit une répartition de température important et sa température augmente par en augmentant de la température d'émetteur.



(a)



(b)

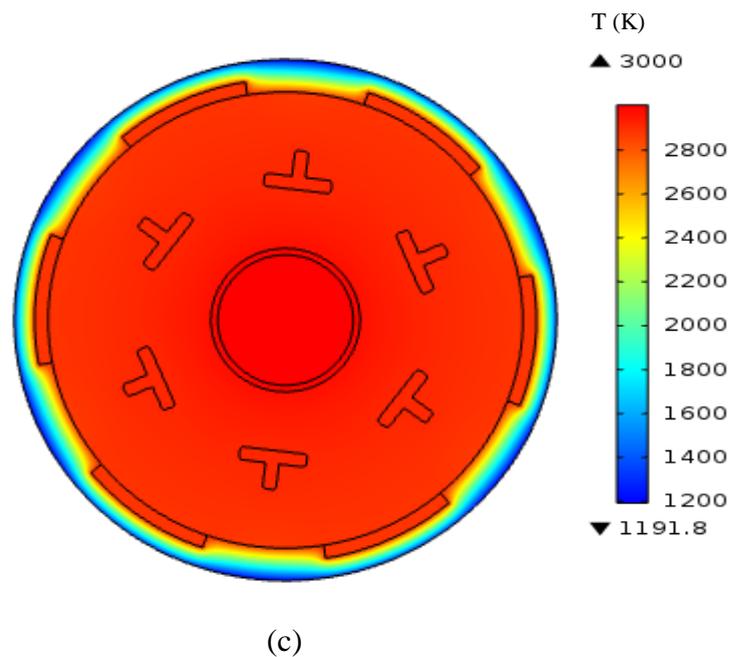


Fig.IV.1 : distribution stationnaire de la température de dispositif. (a) : $T_{source} = 1000K$, (b) : $T_{source} = 2000K$ et (c) : $T_{source} = 3000K$.

IV.2. Température des cellules TPV

La température des cellules TPV est illustrée dans la figure (IV.2) pour différentes valeurs de température d'émetteur. Les cellules TPV atteignent les températures suivantes :

$$T_{pv} = \begin{cases} 600 \text{ K pour} & T_{source} = 1000 \text{ K} \\ 1800 \text{ K pour} & T_{source} = 2000 \text{ K} \\ 2900 \text{ K pour} & T_{source} = 3000 \text{ K} \end{cases}$$

Nous remarquons aussi que la température des cellules PV égal 2900 K lorsque $T_{source} = 3000K$ et. Ceci est très supérieur à leur température de fonctionnement maximale.

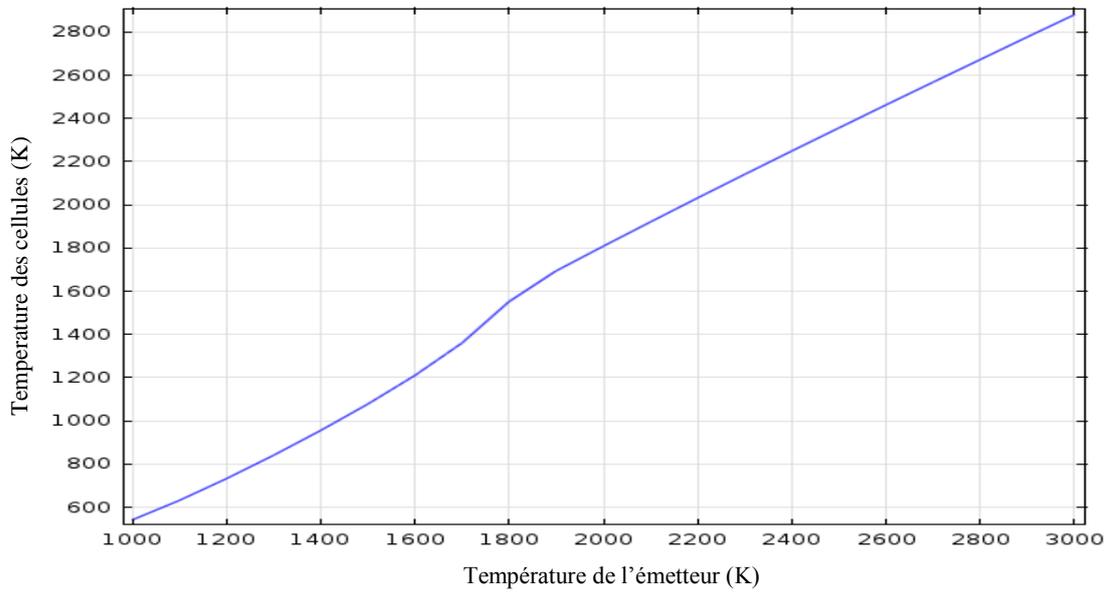
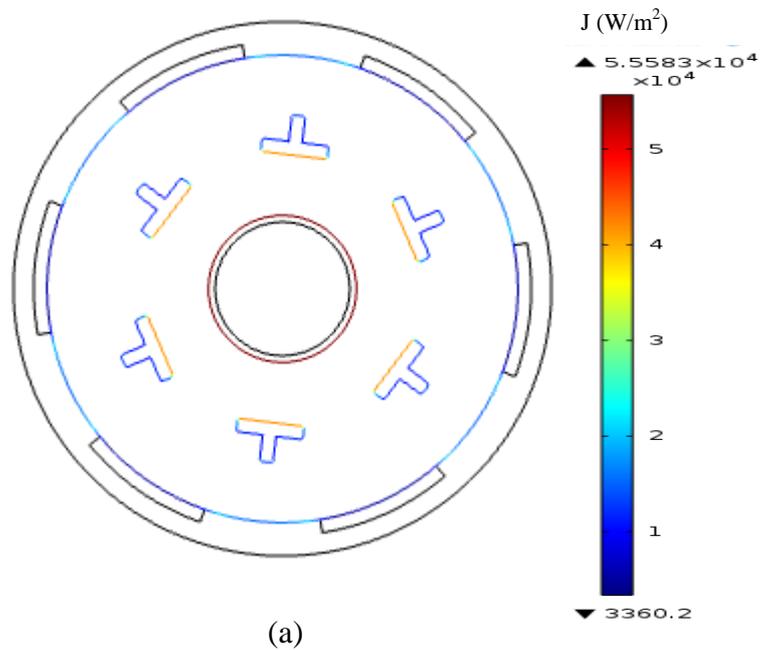


Fig. VI.2 : Température des cellules TPV en fonction de la température de l'émetteur

IV.3. La radiosité

La figure IV.3 (a, b et c) montre la radiosité de surface pour différents composants de système et pour différentes températures d'émetteur : 1000K, 2000K et 3000K respectivement. On peut voir que le miroir et l'émetteur ayants des valeurs maximales de la radiosité à cause de la réflectivité (pour le miroir) et émissivité (pour l'émetteur) élevées. On peut voir aussi que les valeurs de la radiosité augmentent en augmentant de la température d'émetteur.



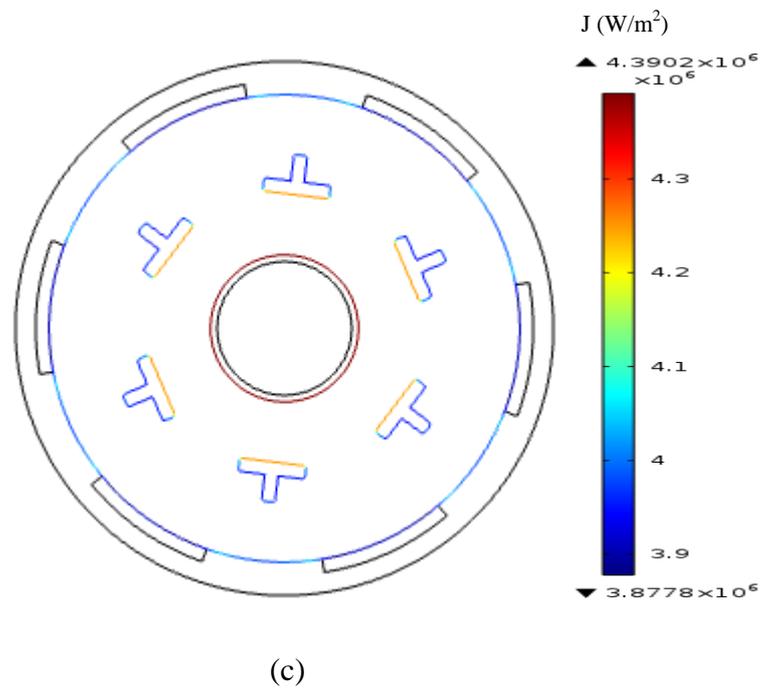
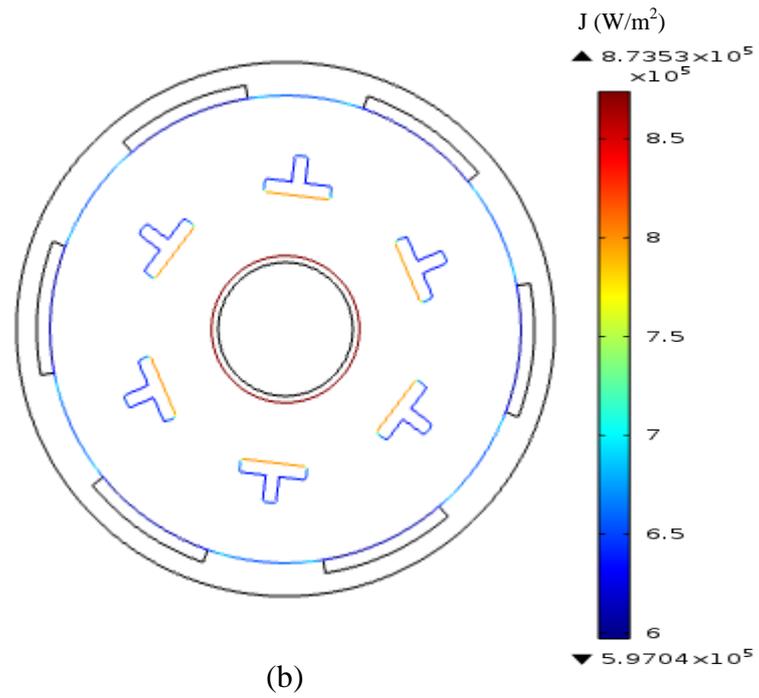


Fig.IV.3 : Radiosité des surfaces dans le système TPV. (a) : $T_{source} = 1000K$, (b) : $T_{source} = 2000K$ et (c) : $T_{source} = 3000K$.

IV.4. Flux radiatif

✚ influence de ε_{emit} et h_{ref}

Le flux radiatif dans un quart de la circonférence séparément à 2000°K de la température de l'émetteur pour différents valeurs de h_{ref} et de ε_{emit} est décrit à la Fig. IV.4 et Fig. IV.5. Le flux radiatif varie de façon significative le long de la surface de l'enveloppe d'isolation et la cellule TPV. Cette tendance est due à la position des miroirs et est un effet de l'ombrage.

Pour une même position, l'augmentation ε_{emit} provoque une augmentation du flux radiatif mais une augmentation de h_{ref} suivie par une diminution du flux.

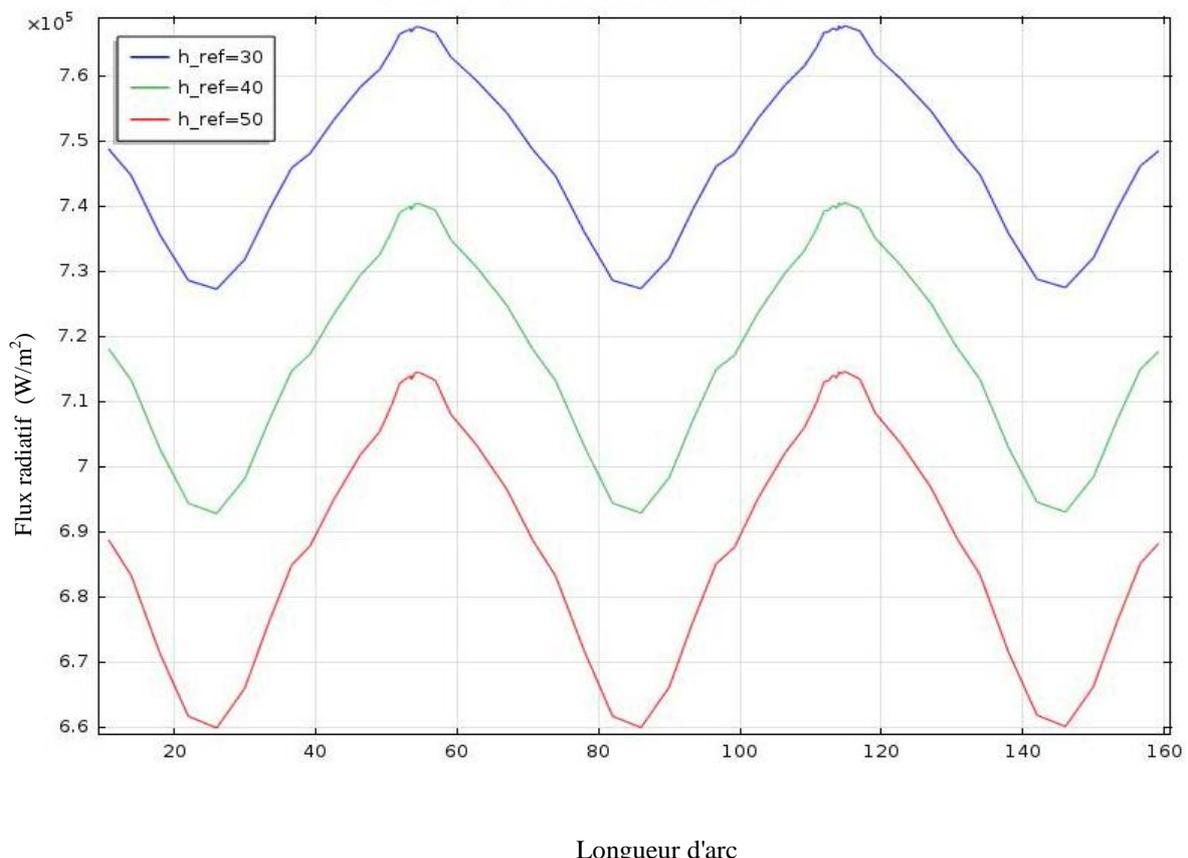


Fig. IV.4. Flux radiatif le long de surface de l'isolation et les cellules PV pour $T_{source}=2000\text{K}$ et différents valeurs de h_{ref} .

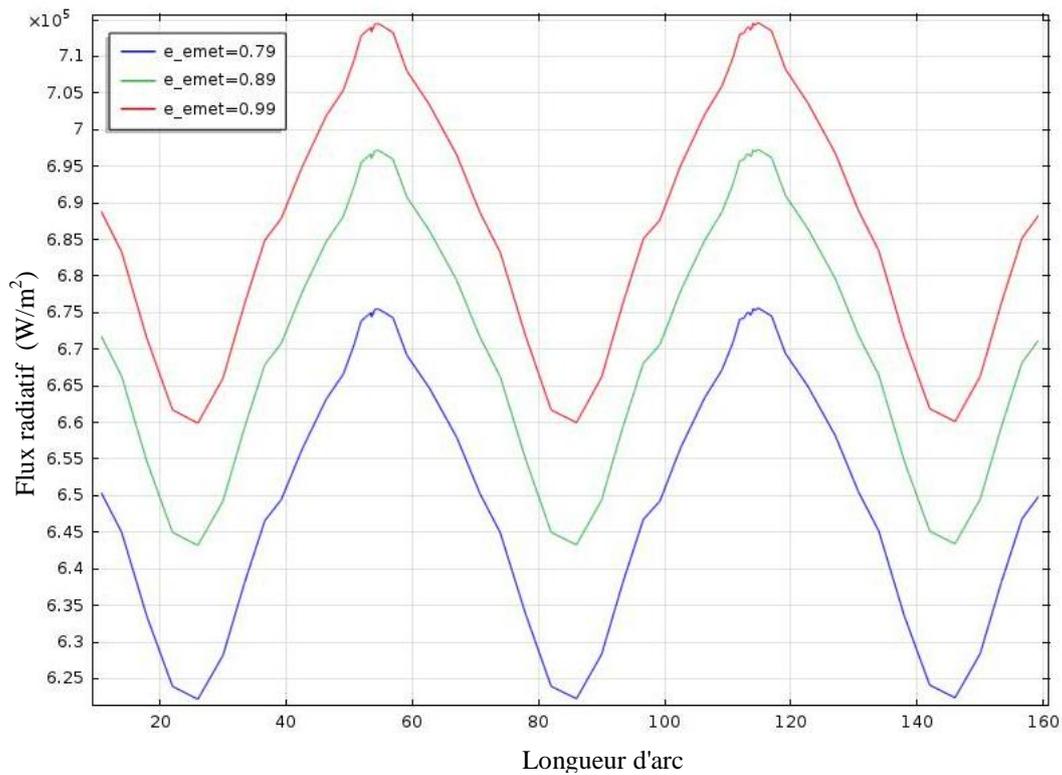


Fig. IV.5. Flux radiatif le long de surface de l'isolation et les cellules PV pour $T_{source} = 2000K$ et différents valeurs de ϵ_{emit} .

IV.5. La puissance électrique

🔗 influence de ϵ_{emit} et h_{ref}

La puissance électrique de sortie est représentée sur la Fig. IV.6 et Fig. IV.7 en fonction de la température d'émetteur et pour différents valeurs de h_{ref} et de ϵ_{emit} .

Dans la Fig. IV.6 Nous pouvons remarquer que la température optimale de l'émetteur du système est de 1600 K pour $\epsilon_{emit} = 0.99$, entre 1600 et 1800 K pour $\epsilon_{emit} = 0.89$ et 1800 K pour $\epsilon_{emit} = 0.79$, où la puissance électrique présente ses valeurs maximales.

Dans la Fig. IV.7 Nous remarquons que la température optimale de l'émetteur du système est toujours 1600K mais la puissance électrique augmente en augmentant de h_{ref} .

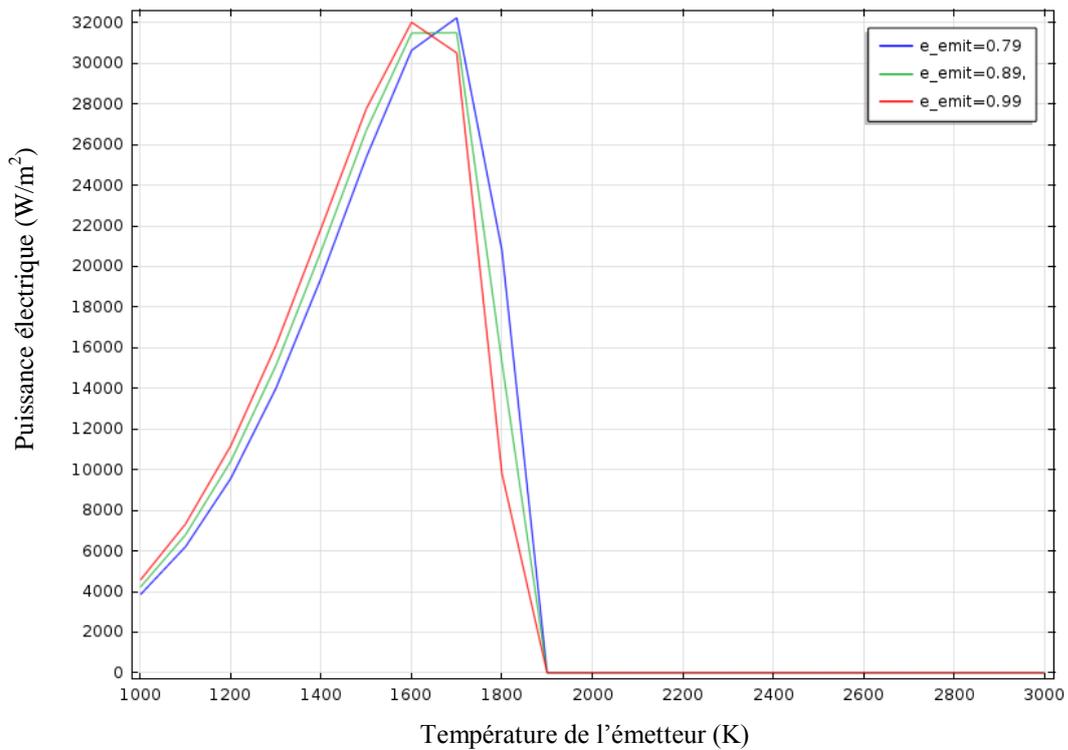


Fig. IV.6. La puissance électrique en fonction de la température d'émetteur pour différents valeurs de ϵ_{emit} .

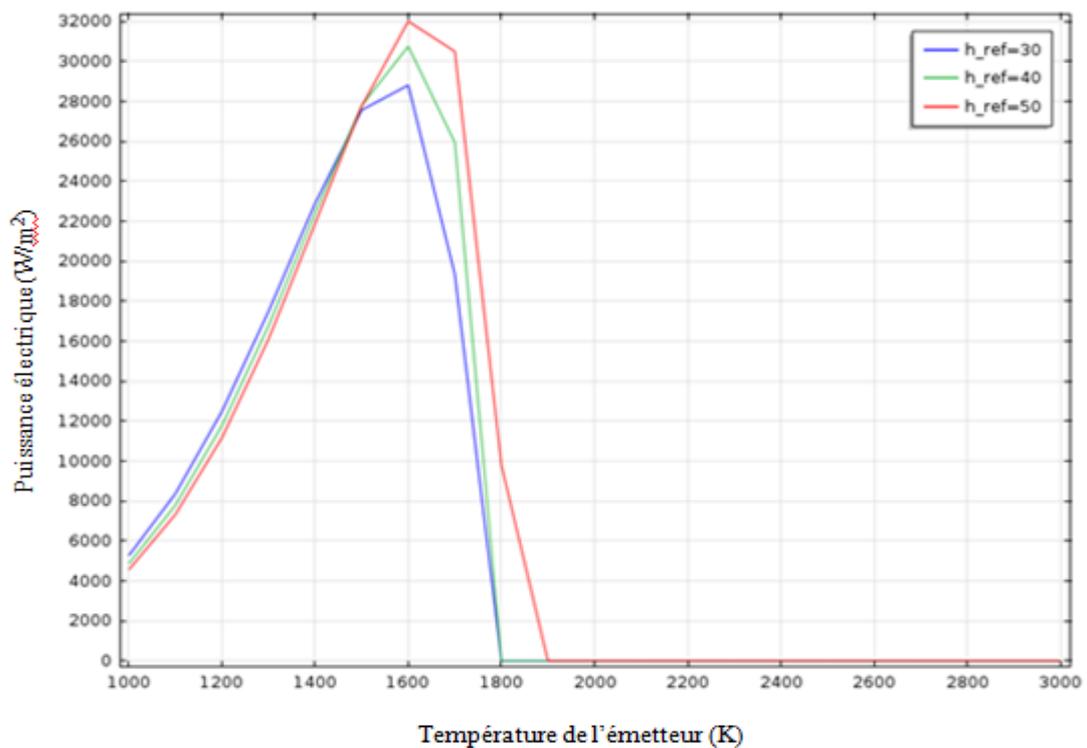
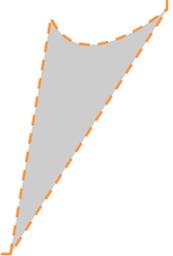


Fig. IV.7. La puissance électrique en fonction de la température d'émetteur pour différents valeurs de h_{ref} .

Conclusion



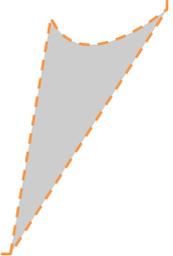
Conclusion

Une analyse numérique sur un système typique TPV a été effectuée. L'influence des conditions opérationnelles sur l'efficacité du système et la température des composants a été étudiée.

Les résultats ont été présentés pour différentes températures d'émetteur. Les principales observations de la présente étude peuvent être résumées comme suit :

- La température de fonctionnement optimale pour avoir un rendement maximal se situe entre 1600 et 1800 °K.
- Le flux radiatif varie de façon significative le long de la surface de l'enveloppe d'isolation et de la cellule TPV en raison de la position des miroirs.
- Les cellules TPV atteignent une température d'environ 2900 ° K quand la température de l'émetteur est de 3000°K, ce qui est très supérieure à leur température de fonctionnement maximale de 1600 ° K.
- L'augmentation de l'émissivité d'émetteur provoque une augmentation de l'éclairement des cellules PV ce qui provoque une augmentation du rendement.
- Le système de refroidissement influe sur le fonctionnement du système TPV.

Bibliographie



Bibliographies

- [1] **Luque.A et Hegedus.S:** Handbook of photovoltaic science and engineering. JohnWiley&Sons, United Kingdom, 2011(2).
- [2] **Labouret.A et al :** Cellules solaire : Les bases de l'énergie photovoltaïques. Dunod, Paris, 2010(5).
- [3] **Henry.M et Franet.H :** Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques. Dunod, Paris, 2009.
- [4] **La lettre des sciences physique :** Procédés propres et rapides de fabrication de photopile. N°31, Novembre 1996.
- [5] **Protin.L et Astier.S :** Convertisseurs photovoltaïques. Techniques de l'ingénieur, d3360, 2007.
- [6] **Makhlof Messaoud :** Modélisation et optimisation de systèmes de production d'énergie renouvelables couples au réseau. Thèse Doctorat en électrotechnique, Université Mantouri de Constantine, 2012.
- [7] **Nichiporuk Oleksiy :** Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière inter-digités. Thèse doctorat en génies électriques, N° d'ordre-ISAL-0028, L'INSA de Lyon France, 2005.
- [8] **Fatima Abdo :** Croissance de couche minces de silicium par épitaxie en phase liquide. Thèse de Doctorat, N° d'ordre-ISAL-0015. Université de Lyon France, 2007.
- [9] **Slaoui Abdelilah :** Electricité photovoltaïque : principes. Techniques de l'ingénieur, traité génie énergétique, be8578, 2013.
- [10] **W.C. Benmoussa et al :** Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin. Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen, 2007, pp : 301 – 306.
- [11] **Elyes NEFZAOUI et al,** "Conception et optimisation d'émetteurs sélectifs pour applications thermophotovoltaïques", CNRS-Université de Poitiers-ENSMA, Cedex, France.
- [12] **Bradley P. Davenport:** Advanced thermophotovoltaic cells modeling, Optimized for radioisotope thermoelectric generators (RTGS) for mars and deep space missions. Master of Science in electrical engineering, NAVAL postgraduate school, June 2004.
- [13] **Philippe Ben-Abdallah et Gilberto Domingues :** Matériaux nanostructurés pour la conversion thermophotovoltaïque. Laboratoire de thermocinétique de Nantes-UMR 6607.
- [14] **Donald L. Chubb:** Fundamentals of THERMOPHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION. ELSEVIER, NASA Glenn Research Center 21000 Brookpark Road, USA, 2007.

-
- [15] **Elyes Nefzaoui** : Conception et optimisation de sources thermiques cohérentes pour applications thermo-photovoltaïques. Thèse Doctorat, École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, 8 mars 2013.
- [16] **J van der Heide** : Thermophotovoltaic. imec vzw, Leuven, Belgium, pp:600-617.
- [17] **Thomas Bauer**: Thermophotovoltaics: Basic Principles and Critical Aspects of System Design. Springer Heidelberg Dordrecht, New York, pp: 5-7.
- [18] **P. Aigrin**: The thermophotovoltaic converter. Laboratoires de MIT, Cambridge,1960.
- [19] **D.J. Anderson, W.A. Wong, and K.L. Tuttle**,: An overview and status of nasa's radioisotope power conversion technology. Technical report, NRA, NASA/TM-2005-213980, 2005.
- [20] **A.E. Becquerel** : les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. C. R. Acad. Sci., 9:561 -567, 1839b.
- [21] **Peter Bermel et al**: Design and global optimization of high-efficiency thermophotovoltaic systems. Opt. Express, Sep 2010.
- [22] **B. Bitnar, W. Durisch, and R. Holzner**: Thermophotovoltaics on the move to applications. Applied Energy, 2013.
- [23] **L. Broman**: Thermophotovoltaics bibliography. Prog. Photovoltaics Res. Appl, 1995(1), pp: 65-74.
- [24] **D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson**: A New Silicon p n Junction Photo cell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. J. Appl. Phys, 1954(25), pp: 676.
- [25] **T.J. Coutts**: A review of progress in thermophotovoltaic generation of electricity. Renewable Sustainable Energy Rev, 1999, pp: 77 -184.
- [26] **H. H. Kolm**: Solar battery power source. Quarterly Progress Report Solid State Research, (Lexington, MA: MIT Lincoln Laboratory), 1956, pp: 13.
- [27] **C. S. Murray, C. J. Crowley, S. Murray, N. A. Elkouh, R. W. Hill, and D. E. Chubb**: Thermophotovoltaic converter design for radioisotope power systems. AIP Conference Proceedings, 2004.
- [28] **Nelson R. E**: A brief history of thermophotovoltaic development.Semicond. Sci. Tech, 2003.
- [29] **White D. C, B. D. Wedlock, and J. Blair**: Recent advance in thermal energy conversion. 1961, pp: 125-132,
- [30] **Holman.J.P**: Heat transfer. Kin Keong Printing Co, PTE,LTD, Singapore, 1986(6), pp: 2-3.

- [31] **DONALD R. et al**: THEORY AND PROBLEMS OF HEAT TRANSFER. SCHAUM'S OUTLINE SERIES, 1997(2), pp: 184-232.
- [32] **DONALD R. et al**: THEORY AND PROBLEMS OF HEAT TRANSFER. SCHAUM'S OUTLINE SERIES, 1997(2), pp: 289-309.
- [33] **William S.Janna**: Engineering heat transfer. CRC Press LLC, United States of America, 2000(2), pp: 547-578.
- [34] **Frank Kreith**: The CRC Handbook of Thermal Engineering. CRC Press LLC, United States of America, 2000.
- [35] **David Alonso Cañadas** : ETUDE DE TRANSFERT ET D'ECHANGES THERMIQUES DIPHASIQUES. Thème master d'Ingénieur Civil électromécanicien, Université libre de Bruxelles, 2011.
- [36] **J.Brau** : Rayonnement. INSA de Lyon, 2006, pp : 9-25.
- [37] **Michel Kern** : Introduction à la méthode des éléments finis. Ecole Nationale Supérieure des mines de Paris, 2004-2005.
- [38] **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.
- [39] **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.
- [40] **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.
- [41] **A. Chateaufneuf** : Comprendre les éléments finis Principes, formulations et exercices corrigés, 2005.
- [42] **"COMSOL Multiphysics 4.3,"** <http://www.comsol.com>.
- [43] Courtesy of **Dr. D. Wilhelm**, Paul Scherrer Institute, Switzerland.
- [44] **Habra Wasim** : Développement de modèle thermique compacts en vue de la modélisation électrothermique des composants de puissance. Thèse doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, Juin 2007.
- [45] **Tahnout cherifa** : Etude, Simulation électrothermique d'un Micro Capteur de gaz à base d'Oxyde semi-conducteur. Thèse de Magister, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, Boumerdes, 2010.

[46] **Ali Kianifar** : Optimizing TPV System for Maximize Surface to Surface Radiation and Minimize Cells Temperature. The First TSME International Conference on Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani, 20-22 October, 2010.

Résumé : Une cellule thermophotovoltaïque (TPV) génère de l'électricité à partir de la combustion du carburant et par rayonnement. Le combustible brûle à l'intérieur d'un dispositif dit : émetteur, qui rayonne intensément. Les cellules TPV captent le rayonnement et la convertissent en électricité. Systèmes TPV, contrairement aux systèmes électroniques typiques, doivent maximiser le transfert de chaleur par rayonnement pour améliorer l'efficacité. Pour améliorer l'efficacité du système et réduire les coûts du système, les ingénieurs doivent travailler avec des cellules TPV secteurs plus restreints et ensuite utiliser des miroirs pour concentrer le rayonnement sur eux. Cependant, il ya une limite à la quantité de rayons qui peut être porté sur les cellules TPV. Si l'intensité du rayonnement devient trop élevée, les cellules peuvent surchauffer. Ainsi, il est nécessaire d'optimiser la géométrie du système et les conditions d'exploitation pour atteindre une performance maximale à un coût de matériaux minimum. Dans ce travail, nous avons examinés l'influence des conditions opératoires sur l'efficacité du système et la température des composants dans un système TPV. Les résultats montrent que le dispositif connaît une distribution significative de la température. Il a aussi, montre que la température de fonctionnement optimale est comprise entre 1600 K et 1800 K, où la puissance électrique de sortie est de maximale.

Mots-clés : Thermophotovoltaïque ; Analyse numérique ; Modélisation de rayonnement

Abstract: A thermophotovoltaic (TPV) cell generates electricity from the combustion of fuel and through radiation. The fuel burns inside an emitting device that radiates intensely. TPV cells capture the radiation and convert it to electricity. TPV systems, unlike typical electronic systems, must maximize radiation heat transfer to improve efficiency. To improve system efficiency and reduce system costs, engineers should work with smaller area TPV cells and then use mirrors to focus the radiation on them. However, there is a limit about the amount of beams that can be focused on TPV cells. If radiation intensity becomes too high, the cells can overheat. Thus, there is a need to optimize system geometry and operating conditions to achieve maximum performance at minimum material costs. The present work investigates the influence of operating conditions on the system efficiency and the temperature of components in a TPV system. The results show that the device experiences a significant temperature distribution. It also, shows that the optimal operating temperature is between 1600 K and 1800 K, where the electric output power is maximize.

Keywords: Thermophotovoltaic; Numerical Analysis; Radiation modeling

ملخص: خلية thermophotovoltaic تولد الكهرباء من احتراق الوقود والإشعاع، تتم عملية حرق الوقود داخل جهاز الإرسال، الذي يشع بشكل مكثف. الخلايا TPV تلتقط الإشعاع وتحوله إلى كهرباء. ، خلافا للأنظمة الإلكترونية نموذجية يجب تعظيم نقل الحرارة عن طريق الإشعاع لتحسين الكفاءة. لتحسين كفاءة النظام وتقليل تكاليف النظام، يجب على المهندسين العمل على الخلايا أصغر ومن ثم استخدام المرايا لتركيز الإشعاع على مرسل الإشعاع. ومع ذلك، هناك حد لكمية الإشعاع التي يمكن تركيزها على الخلايا TPV إذا أصبح كثافة إشعاعية عالية جدا، يؤدي الي ارتفاع درجة الحرارة للخلايا. وبالتالي، فمن الضروري لتحسين هندسة نظام وظروف التشغيل لتحقيق أقصى قدر من الأداء بتكلفة الحد الأدنى من المواد. في هذا العمل، درسنا تأثير ظروف التشغيل على فعالية النظام ودرجة الحرارة من المكونات في نظام TPV. وأظهرت النتائج توزيع درجة الحرارة كبيرة. لكنه يظهر أيضا أن درجة حرارة التشغيل الأمثل هو ما بين 1600K و 1800 K حيث الطاقة الكهربائية الناتج هو الحد الأقصى.

كلمات البحث: كهر وضوئية-حرارية، التحليل العددي؛ النمذجة الإشعاع