

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université SAAD DAHLEB BLIDA-1

Faculté de Technologies

Département des énergies

renouvelables



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique en :

Energies Renouvelables

Option : Conversion Photovoltaïque

Thème :

Caractérisation expérimentale d'un thermo-générateur sous forte concentration solaire.

Par :

RABAH Yazid

SADOK Maamar

Soutenu devant le jury composé par :

Mr. DOMAZ Toufik

Président

Mr. SAID Noureddine

Encadreur

Mr. BOUZAKI Mousatapha

Examineur

JUILLET 2021

Dédicace

- A nos parents et nos frères et sœurs de la famille RABAH et la famille SADOK pour leur soutien pendant toute la période d'université et pour faire ce travail.
- A tous les professeurs qui nous enseignent dans toutes les années précédentes.
- Aussi à tous nos amis spécialement AMRANE Toufik qui nous partageait les meilleurs moments et qui nous criait des bons souvenirs et une période inoubliable.

Un spécial dédicace à :

- Mr. SAID Nouredine, Mr DOMAZ Toufik et Mr CHARANE Abdelhamid pour tous ces efforts pour nous faisons un bon travail et donne tous ces connaissances.

Ce travail est dédié à l'âme de Madame HADDADI Nabila puisse-t-elle reposer en paix.

Remerciement

Tout d'abord on remercie Dieu de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nos remerciements s'adressent à mon encadreur Mr. SAID Noureddine, pour avoir accepté de diriger ce travail.

Nous tenons à remercier sincèrement Mr. DOMAZ qui nous aide et facilite ce travail du début jusqu'à la fin de ce travail, aussi Mr. CHARANE pour nous donner de l'aide et nous oriente aussi et même pour ces consultations afin de réaliser ce projet et nous partage ces expériences.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury, tout d'abord le président Mr. DOMAZ Toufik aussi l'examineur Mr. BOUZAKI Moustapha et Mr. SAID Noureddine qui nous encadrent, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs remarques.

Nos remerciements aussi au le club scientifique HELIOS pour nous accueillir et nous donne l'accès totale dans l'atelier pour faire ce travail.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, nos famille et collègues ainsi que nos enseignant qui nous ont accompagné tout le long de notre cursus.

ملخص

يعتبر اكتشاف النار او توليد الحرارة واحدة من اعظم اكتشافات البشرية فقد فتح هذا الاكتشاف ابواب للتقدم و الازدهار ، و كان للفضول البشري لمعرفة اسرار هذا الكوكب و الحياة فضل اكبر في تطوير التفكير و اساليب الحياة فلم يكتفوا بتوليد الحرار فقط للطبخ و الاضاءة بل تعدوا هذا حتا اصبح من الممكن تحويل هذه الطاقة الي طاقة كهربائية ، و لكن ثمن هذا تحويل كان علا حساب هذا الكوكب الذي يشملنا فاصبح من المهم ايجاد بديل لهذا تحويل الذي اضراره اصبحت اكثر من فوائده، الطاقة المتجددة و النظيفة احد انجع الحلول فيدمج هذان الطاقات و بالاعتماد علا احد اهم اختراعات في هذا المجال الذي تمت علا يد العالم جون سيباك و الذي اعتمد على المواد الاشباه ناقلة و علاقتها بالحرارة ، استطاع ان يولد الكهرباء بهذه المواد و لكن تبقا اشكالية الضرر مطروحة ، لهذا تم استبدال مصدر الحرارة التقليدي بمصدر متجدد و غير مضر و دون ان يلحق الضرر بالكوكب و بيئته و سكانه ، باستعمال الاطباق المقعرة يمكننا لم شمل هذه العلاقة بإعطاء هذه الوحدة من المواد نصف الناقلة ما يكفيها من الحرارة و تبريد الجهة الاخر لها و بالأخير يصبح الحصول علا الكهرباء نيفه غير مضره ممكن. و جاء هذا العمل لدراسة تأثير العوامل على هذا النظام .

الكلمات المفتاحية: سيباك، كهروحرارية، مولدات كهروحرارية شمسية، مركز شمسي مقعر.

Résumé :

L'une des plus grandes et des meilleures découvertes de l'humanité est le feu ou la génération de chaleur, car il l'a aidé à affronter et à continuer la vie, et cette découverte a ouvert les portes du progrès et de la prospérité, et la curiosité humaine de connaître les secrets de cette planète et de la vie avait un plus grand mérite. dans le développement de la pensée et des modes de vie, non seulement en produisant La chaleur n'est que pour la cuisine et l'éclairage, mais même au-delà jusqu'à ce qu'il soit devenu possible de convertir cette énergie en énergie électrique, mais le prix de cette autorisation était au détriment de cette planète qui nous inclut, il est donc devenu important de trouver une alternative à cette conversion dont les méfaits sont devenus plus que ses avantages, l'énergie renouvelable et propre est l'une des solutions les plus efficaces en combinant ces deux énergies et en s'appuyant sur l'une des inventions les plus importantes dans ce Le champ, qui a été réalisé par le scientifique John Seebeck, qui s'est appuyé sur les matériaux semi-conducteurs et leur relation à la chaleur, a pu générer de l'électricité avec ces matériaux, mais le problème des dommages reste ouvert, la source de chaleur a donc été remplacée. En utilisant les plats concaves, nous pouvons réunir cette relation en donnant à cette unité de matériaux semi-conducteurs suffisamment de chaleur et en refroidissant l'autre côté et Au final, il devient possible d'obtenir une électricité propre et inoffensive. Où on fait ce travail pour étudier les influences de ces paramètres sur ce système.

Mots clés : Seebeck, thermoélectrique, STEG, concentrateur parabolique solaire.

Abstract:

One of humanity's greatest and best discoveries is fire or the generation of heat, as it helped it to confront and continue life, and this discovery opened doors for progress and prosperity, and human curiosity to know the secrets of this planet and life had greater merit in developing thinking and ways of life, not only generating The heat is only for cooking and lighting, but even beyond this until it has become possible to convert this energy into electrical energy, but the price of this authorization was at the expense of this planet that includes us. The most effective solutions by combining these two energies and relying on one of the most important inventions in this field, which was made by the scientist John Seebeck, who relied on semiconductor materials and their relationship to heat, was able to generate electricity with these materials, but the problem of damage remains open, so the heat source was replaced Using the concave dishes, we can reunite this relationship by giving this unit of semi-conducting materials enough heat and cooling the other side of it and In the end, it becomes possible to obtain clean, harmless electricity. And here comes this work to study the characteristic of this system.

Key words: Seebeck, thermoelectric, STEG, solar parabolic concentrator.

SOMMAIRE

Dédicace	I
Remerciement	II
Résumé	III
Sommaire	V
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XII
Liste des symboles et acronymes	XIII
Introduction	XVI
CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPTE THERMOELECTRIQUE	1
I.1 Phénomènes thermoélectriques	2
I.1.1 L'effet Seebeck	2
I.1.2 L'effet Peltier	3
I.1.3 L'effet Thomson	4
I .2 Les matériaux thermoélectriques	4
I .3 Configuration des modules thermoélectrique	7
I .3.1 Modèle (idéal)	8
I.3.2 Modèle (réaliste)	11
I.4 Etat de l'art d'application thermoélectrique (les thermo-générateurs)	13
I.4.1 Radio-isotopique	13
I.4.1.1 Domaine spatial	14
I.4.1.2 Dispositifs d'alimentation électrique dans les régions rurale et isolé	15
I .4.1.3 Domaine médical	15
	V

I.4.2 Source de chaleur naturelle	16
I.4.2.1 Gaz naturel et biomasse	16
I.4.2.2 Source solaire	17
I.4.3 Source de chaleur perdue	20
I.4.3 Récupération de la chaleur perdue des systèmes de transport (Automobile)	20
CHAPITRE II : GISMENT SOLAIRE	23
II.1 introduction :	24
II.2 Rappels fondamentaux d'astronomie	24
II.2.1 Généralité sur la terre et le soleil	24
II.2.2 Les émission du soleil	25
II.2.3 La constante solaire	25
II.2.4 Déclinaison du soleil	26
II.2.5 Angle horaire ω	27
II.2.6 Les différent temps solaire	27
II.2.7 Lever et coucher du soleil	29
II.2.8 Durée du jour	29
II.2.9 Fraction d'insolation	29
II.3 Rayonnement solaire	30
II.4 Estimation du rayonnement solaire	32
II.4.1 Instrument de mesure de rayonnement	33
II.5 Concentrateur solaire	33

II.5.1 Introduction	33
II.5.2 Captation du rayonnement solaire	34
II .5 .3 Conversion thermique de l'énergie solaire [18]	35
II.5.3.1 Dispositifs 2D (sans concentration)	35
II.5.3.2 Dispositifs 0D (concentration sur un point)	35
II.5.3.3 Dispositifs 0D (concentration sur un point)	35
II.5.4 Rapport de concentration	36
II.5.5 Concentrateur parabolique	37
II.6 Analyse du Performance	39
II.6.1 Efficacité thermique du système parabole offset	39
II.6.2 Efficacité thermique du système de Transfer de chaleur	41
II.6.3 Efficacité globale du système CTEG	42
CHAPITRE III : DESCRIPTION ET EXPERIMENTATION	45
DU THERMOGENERATEUR SOLAIRE	
III.1 Conception du projet	46
III.1.1 Le concentrateur solaire parabolique	46
III.1.2 Le thermo générateur	46
III.1.3 Le système de la production	48
III.1.3.1 Coté chaud	48
III.1.3.2 Coté froid	48

III.2 Les instruments de mesure	51
III.2.1 Data acquisition (data logger)	51
III.2.2 Thermocouple	53
III.2.3 Multimètre	55
III.2.4 Pyranomètre	56
III.3 Système de suivi	57
III.4 Software	58
III.5 Mesurément et résultats	60
III.6.1 test $V_{co}(t)$	61
III.6.2 Tests de $I(V)$	66

Liste des figures :

Figure I.1.1 : Effet Seebeck.	2
Figure I.2 : Effet Peltier	3
Figure I-3 : Figures de mérite ZT pour différents matériaux thermoélectriques	6
Figure I-4 : Évolution de la figure de mérite maximale ZT	7
Figure I.5 : a) Module thermoélectrique, b) Thermocouple	8
Figure I.6 : Schéma du modèle « idéal » d'un MTE	9
Figure I.7 : Modèle (réaliste) d'un MTE : 1- plaque de céramique (coté chaud), 2- contacte de cuivre, 3-plaque de céramique (coté froid).	11
Figure I.8 vue de coupe d'un MMRTG	14
Figure I.9 RTG utilisé pour alimenter les phares et les balises de navigation	15
Figure I.10 Stimulateur cardiaque à gauche et pile RTG à droite	16
Figure I.11 Gaz Gentherm TEG	17
Figure I.12 image de le campstove	17
Figure I.13 Schéma d'un système SHP-TE intégré	18
Figure I.14 illustration d'une cellule STEG constituée d'une paire d'éléments thermoélectriques de type p et n	19
Figure I.15 Générateurs thermoélectriques solaire à concentration :	19
(a) Un prototype expérimental du système thermoélectrique solaire à concentration (b) ;(b) Détails de l'unité CTG	
Figure I.16 Intégration du TEG dans la ligne d'échappement du véhicule prototype BMW X6[122].	22
Figure II.1 : Densité spectrale de l'éclairement énergétique du rayonnement solaire direct (a) Rayonnement solaire hors de l'atmosphère. (b)Rayonnement solaire direct	25

au sol pour une hauteur du soleil de 6 degrés et une atmosphère claire standard.

Figure II.2 : Mouvement de la terre autour du soleil.	26
Figure II.3 : Déclinaison du soleil.	27
Figure II.4 : Equation de temps.	28
Figure II.5 : Transmission du rayonnement solaire.	30
Figure II.6 : Echanges énergétiques moyens entre la surface terrestre, L'atmosphère et L'espace. En W/m ² .	31
Figure II.7 : pyranomètre.	33
Figure II.8 : Type des capteurs solaire et le principe d'absorption des rayonnements solaire.	34
Figure II.9 : Principe d'une concentration 1D	35
Figure II.10 : Principe d'une concentration en un point	36
Figure II .11 : schéma de rapport de concentration.	36
Figure II.12 : La parabole.	37
Figure II.13 : Segments d'une parabole ayant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture	37
Figure II.14 : Démonstration de la dispersion du faisceau.	38
Figure II.15 : Géométrie de l'antenne parabolique (décalée) offset.	39
Figure II.16 : Schéma du flux de chaleur dans le système.	41
Figure II.17 : Schéma de la parabole avec le système de dissipation de chaleur.	42
Figure II.18 : Bilan énergétique du générateur thermoélectrique.	43
Figure II .19 : Flux d'énergie dans le module TEG.	44
Figure (III.1) : le concentrateur solaire.	46
Figure (III.2) : un module Peltier modèle TEC1-12715	47
Figure (III.3) : la plaque réceptrice du système (le coté chaud).	48
Figure (III.4) : l'ailette de refroidissement	49
Figure (III .5) : le ventilateur du système de dissipation.	49

Figure (III.6) : le système de production.	50
Figure (III.7) : la batterie du dissipateur de chaleur.	50
Figure (III.8) : le concentrateur et le système de production durant le fonctionnement.	51
Figure (III.9) : data acquisition FLUKE HYDRA SERIES II	52
Figure (III.10) : boite de connexion des fils.	52
Figure (III.11) : la répartition des fils du système dans les canaux de la boite de connexion	53
Figure (III.12) : schéma simple explique le principe d'un thermocouple.	53
Figure (III.13) : Multimètre modèle M890+.	54
Figure (III.14) : le pyranomètre KIPP&ZONEN CM6B.	57
Figure (III.15) : le réglage du concentrateur pendant l'expérience.	58
Figure (III.16) : l'affichage du data acquisition sur l'ordinateur.	59
Figure (III.17) : l'échelle de la mesure du pyranomètre.	60
Figure (III.18) : le système TEG pendant le fonctionnement.	60
Figure (III.19) : l'affichage au cours de fonctionnement du STEG.	61
Figure (III.20) : presente le changement des températures en fonction du temps.	62
Figure (III.21) : presente la variation des radiations en fonction pendant 3 heures.	63
Figure (III.22) : la variation de V_{co} en fonction du temps.	64
Figure (III.23) : la tension V_{co} en fonction du ΔT .	65
Figure (III.24) : les variations des temperatures chaude (T_h) et froide(T_f) et ΔT en fonction du temps.	66
Figure (III.25): la variation des radiation en fonction du temps durant le test.	67
Figure (III.26) : la variation de ΔT au meme période.	68
Figure (III.27) : l'intensité du courant en fonction du tension.	69

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Valeurs typique des paramètres thermoélectriques pour les isolants, les semi-conducteurs et les métaux.	5
Tableau (II.1) : albédo du sol.	31
Tableau (II.2) : Potentiel solaire en Algérie.	33
Tableau (III.1) : la fiche technique du module Peltier modèle TEC1-12715.	47
Tableau (III.2) : les types des thermocouples.	54
Tableau (III.3) : les caractéristiques du mulmètre modèle M890+.	56
Tableau (III.4) : la fiche technique du pyranomètre KIPP&ZONEN CM6B.	57
Tableau (III.5) : répartition des paramètres mesuré sur les channels.	59
Tableaux (III.6) : les conditions des deux test .	66

Liste des symboles et acronymes

TE : thermoélectriques.

GTE : Générateur thermoélectrique.

ZT : Figure de mérite.

MTE : Thermoélectrique module.

ΔV : Différence de tension (v).

ΔT : Différence de température ($^{\circ}\text{C}$) .

T_C : Température du côté froid ($^{\circ}\text{C}$).

T_H : Température du côté chaud ($^{\circ}\text{C}$).

V_{MTE} : Tension électrique d'un module thermoélectrique (V).

V_{OC} : Tension en circuit ouvert (V).

V_J : Tension Joule (V).

V_{α} : Tension Seebeck (V).

α : Coefficient de Seebeck (V.K-1).

β : Coefficient de Thomson (V.K-1).

π : Coefficient de Peltier (V).

ρ : Résistivité électrique ($\Omega\cdot\text{m}$).

λ : Conductivité thermique (W.K-1.m-1).

σ : Conductivité électrique ($\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$).

η_{MAX} : Efficacité maximale d'un module thermoélectrique enregistrée lors d'un test %

P_{MAX} : La puissance maximale d'un module thermoélectrique

A_c : surface de collecteur par unité de longueur (m^2) .

A_r : surface de récepteur (m^2).

A_w : la surface de refroidissement totale.

a : azimut du soleil ($^{\circ}$).

C : facteur de concentration.

d : durée du jours (heures).

D_h : rayonnement diffus sur un plan horizontal. (w/m^2).

$D(\beta)$: rayonnement diffus sur un plan incliné (w/m^2).

j : nombre de jours.

h : hauteur du soleil ($^\circ$).

I : constante solaire (w/m^2).

I_h : rayonnement direct sur un plan horizontal. (w/m^2).

G_h : rayonnement global sur un plan horizontal. (w/m^2).

G_i : rayonnement global sur un plan incliné (w/m^2).

L : latitude de lieu ($^\circ$).

n : durée d'insolation.

R_b : facteur d'inclinaison.

TSV : temps solaire vrai (heures).

TSM : temps solaire moyen (heures).

β : angle d'inclinaison ($^\circ$).

ρ : albédo de sol.

ω : angle horaire ($^\circ$).

δ : déclinaison solaire ($^\circ$).

η_r : Réflectance du collecteur.

h_a : coefficient de transfert de chaleur convectif ($w/m^2.k$).

T_a : température ambiante($^\circ$).

\bar{T} : température moyenne du dissipateur thermique ($^\circ$).

T_r : la température du récepteur($^\circ$).

ε : l'émissivité.

Q_d : chaleur non utilisée dissipée du coté froid du module TEG (w/m^2).

E_0 : l'énergie électrique utile produite par le module TEG (Wh).

Q_r : rayonnement solaire direct incident sur le récepteur (la plaque de aluminium) (W/m²).

Q_L : pertes de chaleur de la plaque réceptrice vers l'environnement. (W/m²).

Q_{in} : rayonnement direct qui tombe sur le capteur solaire(W/m²).

Q_w : chaleur totale dissipée par le dissipateur thermique(w/m²).

η_{teg} : l'efficacité de conversion le thermique en électrique du module TEG .

Les constantes :

La constante de Stefan-Boltzmann ($\delta = 5.679108 \text{ W/m}^2/\text{K}^\circ$).

La constante solaire $I = 1390 \text{ W/m}^2$

INTRODUCTION

Le développement économique de notre société résultera de façon inévitable en une grande croissance de la demande énergétique mondiale. Parmi les sources de production d'énergies les plus importantes, on cite les énergies fossiles. Ce type d'énergie est en épuisement progressif avec un impact polluant pour notre globe terrestre, d'où la nécessité de diversifier les sources d'énergie et d'avoir recours à d'autres alternatives. Parmi les énergies renouvelables, on retrouve le solaire photovoltaïque et thermique ou l'éolien. Ces différentes sources entraînent l'abondance de l'énergie thermique. Or, la production de la chaleur n'est pas toujours souhaitée puisqu'une grande quantité est rejetée dans l'atmosphère.

Dans ce contexte, la thermoélectricité représente un moyen de convertir l'énergie solaire thermique en énergie électrique. Ainsi, elle apparaît comme un moyen efficace pour récupérer la chaleur perdue et la transformer en énergie électrique.

Les systèmes de conversion thermoélectriques (TE) sont des dispositifs appelés modules thermoélectriques, qui sont capables soit de générer de l'électricité à partir d'une source de chaleur (modules générateurs d'électricité GTE), ou encore produire une différence de température en présence d'un courant électrique (modules de refroidissement). Ces dispositifs sont en voie de développement à grande échelle. Comme ils présentent un faible rendement, ceci les empêche d'être compétitifs et de concurrencer les systèmes de conversion à forte puissance thermique. Toutefois, ils possèdent certains atouts comme la facilité de leur intégration dans les systèmes compacts ainsi que leur fiabilité. Ces dispositifs sont formés par des matériaux semi-conducteurs de type p et n reliés électriquement en série. Les matériaux TE sont caractérisés par leur figure de mérite ZT qui doit être maximisée pour assurer une meilleure conversion TE. C'est pour cela que la recherche de nouveaux matériaux TE performants s'est fortement intensifiée ces dernières années. Ces recherches visent à améliorer les propriétés TE de ces matériaux par différents moyens : le choix de la composition des alliages, le dopage, la nano structuration, etc...

L'obtention des matériaux TE performants ouvre d'autres portes à la recherche et le développement dans le domaine de la thermoélectricité, à savoir la conception des modules de conversion plus efficaces. Pour ce faire, il devient indispensable de maîtriser la caractérisation des modules TE formés par ces matériaux qui permettra d'évaluer l'efficacité de conversion de ces dispositifs pour une différence de

température donnée. La problématique qui se présente dans ce contexte est qu'il n'existe pas, jusqu'à nos jours, de consensus sur un protocole de mesure permettant d'assurer l'exactitude des mesures des modules TE.

Le but des travaux de ce projet est de fournir des mesures fiables qui peut valider le modèle élaboré afin de maitrise la caractérisation thermoélectrique des modules générateurs, en ayant recours à une approche expérimentale basée sur la production d'une différence de températures aux surfaces du module en utilisant un concentrateur solaire parabolique et un dissipateur de chaleur , réalisée par l'utilisation de deux différents systèmes de mesure des modules TE. Plus spécifiquement, il serait question de présenter une méthode pour évaluer les paramètres fondamentaux d'un module TE générateur d'électricité en opération. Le module utilisé dans cette étude c'est un module commercial TEC1-12715 , fabriqués par des alliages à base de (Bi_2Te_3) élaborés au laboratoire de thermoélectricité de la society chinoise HBA

CHAPITRE I :

**PHENOMENES ET CONCEPT
THERMOELECTRIQUE**

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

I.1 Phénomènes thermoélectriques :

La thermoélectricité est la transformation de la chaleur en électricité. Elle fut découverte en 1821 par le physicien allemand Seebeck [1]. On peut définir l'effet thermoélectrique comme étant un effet qui lie le flux de chaleur traversant le matériau au courant électrique qui le parcourt. On cite alors l'effet Seebeck, l'effet Peltier et l'effet Thomson. Ces effets ne doivent pas être confondus avec l'effet piézoélectrique, qui est défini comme l'apparition d'une différence de potentiel temporaire suite à un changement de température, et qui disparaît après le temps de relaxation diélectrique.

I.1.1 L'effet Seebeck :

Le physicien Thomas Johann Seebeck a observé l'effet Seebeck quand il a remarqué la déviation d'une aiguille placée entre deux matériaux conducteurs de natures différentes dont les jonctions étaient exposées à des températures $T_1 \neq T_2$. Au début, il attribua ce phénomène au magnétisme, mais c'est plus tard qu'il expliqua que ceci était dû à l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction des deux matériaux.

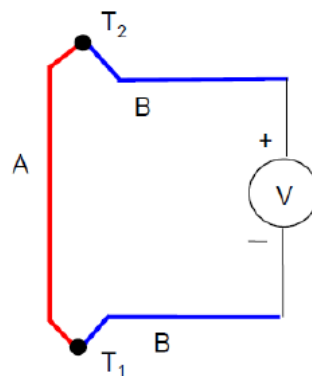


Figure I.1 : Effet Seebeck.

En effet, quand il existe une différence de température entre deux jonctions formées par deux matériaux différents, il y a création d'une différence de potentiel électrique ΔV [2] (figure I.1). Le coefficient de Seebeck α_{21} mesuré à une jonction représente la différence entre les coefficients de Seebeck des deux matériaux α_1 et α_2 formant la jonction. Ils sont liés par la relation suivante :

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

$$\Delta V = (\alpha_2 - \alpha_1)(T_H - T_C) = \alpha_{21}\Delta T \quad (\text{équation I.1})$$

Où $T_H - T_C$ représente la différence ΔT entre la température chaude et la température froide.

I.1.2 L'effet Peltier :

L'effet Peltier fut découvert en 1834 par Jean Charles Peltier. Il représente l'inverse de l'effet Seebeck. Un courant électrique circulant à travers les jonctions de deux matériaux de nature différente génère une hausse de la température pour l'une des jonctions et une baisse de la température pour l'autre [1]. Ainsi, une quantité de la chaleur est absorbée à une jonction tandis qu'à l'autre jonction, il y a libération de la chaleur. (La figure I.2) montre qu'une jonction est chauffée et que l'autre est refroidie lors du passage du courant.

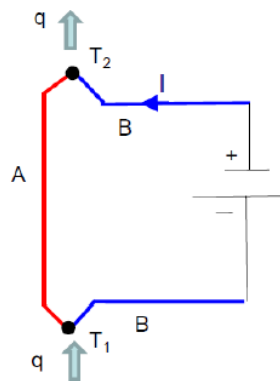


Figure I.2 : Effet Peltier

Les coefficients Peltier des deux matériaux 1 et 2, noté respectivement π_1 et π_2 peuvent être définis :

$$Q_1 = \pi_1 \cdot I \text{ et } Q_2 = \pi_2 \cdot I \quad (\text{équation I.2})$$

Si on considère la quantité de chaleur Q_{21} à une jonction, on écrit :

$$Q_{21} = (\pi_2 - \pi_1) I = \pi_{21} I \quad (\text{équation I.3})$$

Avec Q : Quantité de chaleur dégagée ou absorbée.

I : Courant qui circule à travers la jonction.

Comme l'effet Seebeck est l'inverse de l'effet Peltier [3], il existe une relation qui relie les deux phénomènes :

$$\alpha_{21} = \frac{\pi_{21}}{T} \quad (\text{équation I.4})$$

I.1.3 L'effet Thomson :

L'effet Thomson fut découvert en 1851 par William Thomson. Cet effet résulte de l'apparition simultanée d'un courant électrique et d'un gradient de température à travers un matériau qui génère l'absorption ou l'émission de la chaleur dans chacune de ses parties [4].

On note la chaleur générée par unité de longueur :

$$Q = \beta I \Delta T \quad (\text{équation I.5})$$

Où β est le coefficient Thomson. Notons que Q est différent de la chaleur produite par l'effet Peltier présentée dans les équations I.2 et I.3.

Il existe une relation entre le coefficient Thomson et le coefficient de Seebeck :

$$\beta_{21} = T \frac{d\alpha_{21}}{dT} \quad (\text{équation I.6})$$

I.2 Les matériaux thermoélectriques :

Un matériau thermoélectrique est caractérisé essentiellement par son coefficient de Seebeck α (ou pouvoir thermoélectrique) qui est une mesure de l'entropie par unité de charge transportée par les porteurs de charge. L'autre paramètre caractéristique des matériaux TE est le facteur de mérite ZT (quantité sans dimensions) qui évalue la performance du matériau et s'exprime comme [5]:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{\lambda} \quad (\text{équation I.7})$$

Où :

σ La conductivité électrique ($\Omega^{-1} \cdot m$)

λ La conductivité thermique (w /m .k)

α Le coefficient Seebeck (v.k⁻¹)

T La température absolue (k)

D'un point de vue qualitatif, on peut remarquer qu'un matériau TE performant doit présenter un coefficient de Seebeck optimal (se situant entre 130 à 187 $\mu V.K^{-1}$ [6]) pour produire les effets attendus,

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

une conductivité électrique élevée ($\sigma = 850 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ pour un matériau TE à base de tellurure de bismuth $(\text{Bi}_{0.2}\text{Sb}_{0.8})_2\text{Te}_3$ à 300 K [6]) ainsi qu'une faible conductivité thermique ($\lambda \leq 1.2 \text{ W/m.K}$ pour le composé $(\text{Bi}_{0.2}\text{Sb}_{0.8})_2\text{Te}_3$ [6]) pour maintenir une différence de température appropriée aux bornes du matériau. C'est pour cela que les semi-conducteurs sont considérés comme les meilleurs matériaux thermoélectriques (tableau I-1) puisqu'ils présentent un compromis entre les propriétés de transport thermique et électrique.

Par ailleurs, l'augmentation de la conductivité électrique réduit la perte de puissance électrique produite par effet Joule, et la diminution de la conductivité thermique réduit la quantité de chaleur qui passe par le matériau sans avoir été convertie en puissance.

Le tableau I.1 nous donne une idée sur les valeurs typiques des paramètres thermoélectriques pour les matériaux isolants, semi-conducteurs et les métaux :

Tableau I.1 : Valeurs typique des paramètres thermoélectriques pour les isolants, les semi-conducteurs et les métaux [8].

Paramètre	Isolants	Semi-conducteur	Métaux
$\alpha (\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1})$	1000	200	5
$\sigma (\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	10^{-10}	10^5	10^8
$\lambda (\text{W/m} \cdot \text{K})$	0.1 - 1	1 - 100	10 - 1000

L'optimisation du paramètre ZT (la valeur maximale en fonction de la température) a évolué au cours du temps. En effet, il s'est avéré que les métaux n'étaient pas des candidats performants dans le domaine de la thermoélectricité en raison de leur conductivité thermique élevée. La recherche des matériaux TE performants s'est intensifiée vers les années 1950 avec l'apparition des semi-conducteurs.

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

Il était possible de trouver un compromis entre une conductivité électrique élevée et une conductivité thermique faible au sein d'un même matériau, comme on peut le constater d'après (le tableau I-1).

La figure en dessous illustre la courbe de ZT en fonction de la température pour différents matériaux nanostructures. On constate que la valeur de ZT augmente au fur et à mesure que la température augmente, pour un matériau donné, jusqu'à atteindre un pic. Il est important de noter que chaque famille de matériaux n'est efficace que sur une plage de température limitée.

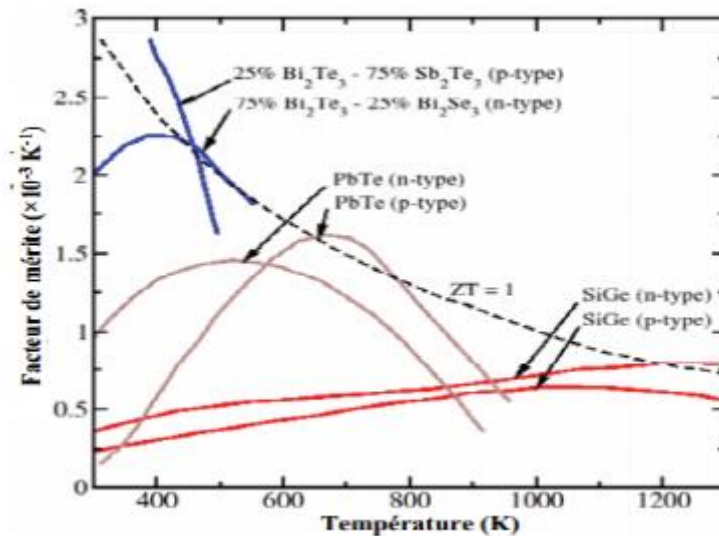


Figure I-3: Figures de mérite ZT pour différents matériaux thermoélectriques [9]

Cependant, ce n'est qu'à partir des années 1990 que de nouvelles méthodes basées sur la nanostructuration des matériaux sont apparues (figure I.4). Ainsi, le développement de nouveaux matériaux TE ne cesse d'augmenter dans le but d'optimiser le paramètre ZT et découvrir d'autres éventuelles applications pour la thermoélectricité.

Notons que sur la courbe de (la figure I-4), la valeur de ZT pour chaque matériau correspond à la valeur de la figure de mérite maximale atteinte.

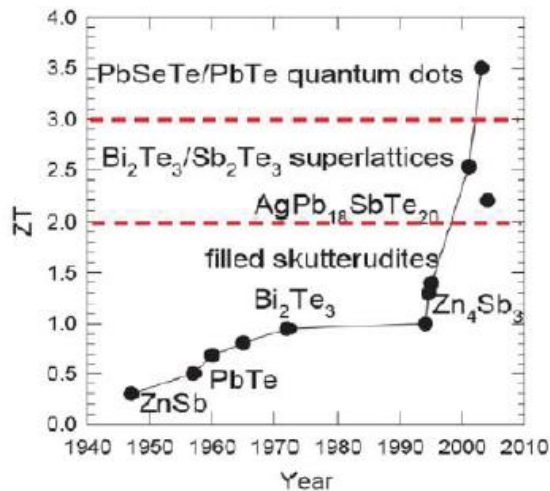


Figure I-4 : Évolution de la figure de mérite maximale ZT [10]

I.3 Configuration des modules thermoélectrique :

Un module thermoélectrique est un dispositif composé de plusieurs thermocouples. Chaque thermocouple contient deux pattes : une patte formée par un semi-conducteur de type p et l'autre par un semi-conducteur de type n . Ces pattes sont reliées par des contacts de cuivre, qui est un bon conducteur électrique, ce qui permet de réduire l'effet Joule qui influe sur la performance du module.

L'ensemble de ces pattes est couvert par deux plaques de céramique qui permettent de maintenir en place l'assemblage des thermocouples et qui assurent une conduction de la chaleur acceptable ainsi qu'une bonne isolation électrique. Les pattes sont alors connectées thermiquement en parallèle et électriquement en série. L'alternance des pattes et des plaques de cuivre forme un circuit électrique.

La figure I.5 montre l'exemple d'un module conventionnel. Il existe, par ailleurs, d'autres types d'assemblage comme dans les micromodules TE. Notons que les flèches dans le thermocouple représentent le sens du flux de chaleur traversant le module.

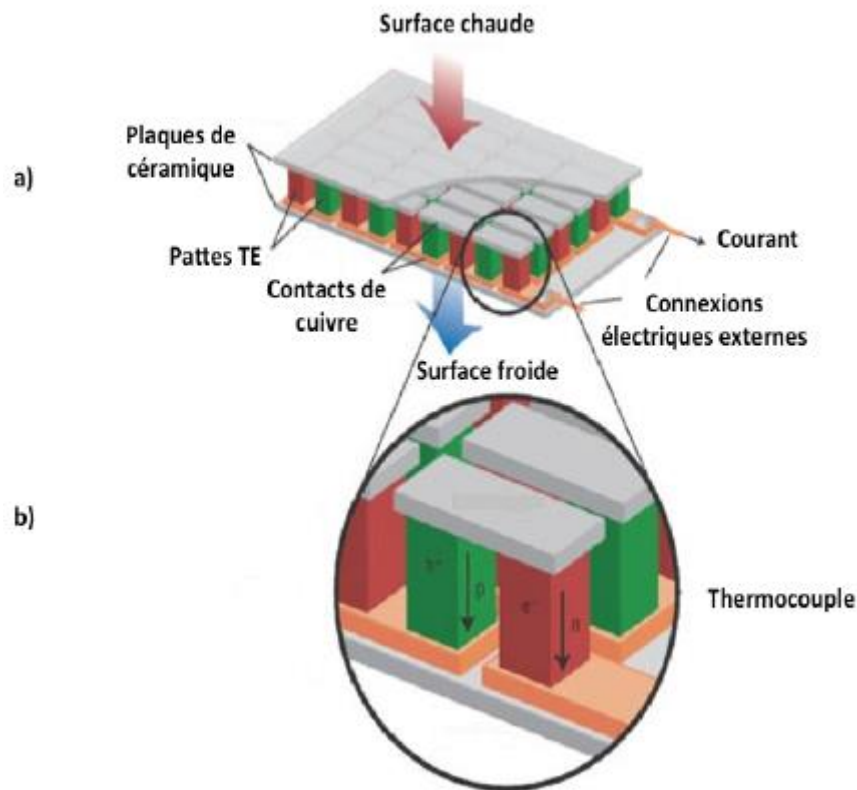


Figure I.5 : a) Module thermoélectrique, b) Thermocouple [11]

Il existe deux types d'applications de modules thermoélectriques. On retrouve les modules soumis à un gradient de température qui peuvent servir à la génération d'un courant électrique qu'on appelle les modules générateurs, et les modules servant à la production d'un flux de chaleur nommés les modules de refroidissement. Durant cette étude, nous allons nous focaliser sur un module de thermoélectrique sous un gradient de température.

I .3.1 Modèle (idéal)

Le modèle « idéal » d'un module (figure I-6) est composé par des pattes TE de type p et n . Les connections entre ces pattes de longueur l sont assurées par des conducteurs électriques et thermiques parfaits et les résistances de contacts sont négligeables. ΔT_0 représente la différence de température à travers les pattes TE.

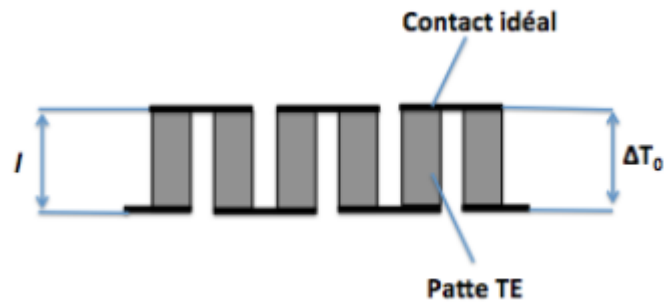


Figure I.6 : Schéma du modèle « idéal » d'un MTE

Pour un module générateur du modèle « idéal », le flux de chaleur échangé avec la Jonction chaude ou froide du module représente la somme de la contribution de l'effet Peltier, la conductance thermique et les pertes par effet Joule, et s'exprime comme [12] :

$$Q_H = N\alpha_{pn}T_C I + NK_e\Delta T_0 + \frac{N}{2} I^2 R_e \quad (\text{équation I.8})$$

$$Q_C = N\alpha_{pn}T_C I + NK_e\Delta T_0 + \frac{N}{2} I^2 R_e \quad (\text{équation I.9})$$

La conductance thermique K_e et la résistance électrique interne R_e du thermocouple s'écrivent comme :

$$K_e = \frac{\lambda_{pn}A}{e} \quad (\text{équation I.10})$$

$$R_e = \frac{\rho_{pn}l}{A} \quad (\text{équation I.11})$$

Avec ($\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n$) est la différence entre les coefficients de Seebeck des deux matériaux formant la jonction pn, N est le nombre de thermocouples formant le module, T_H et T_C représentent, respectivement, la température de la surface chaude et la température de la surface froide du MTE, λ_{pn} représente la conductivité thermique des semi-conducteurs de type p et n en parallèle ($\lambda_{pn} = \lambda_p + \lambda_n$), ρ_{pn} est la résistivité électrique des matériaux p et n en série ($\rho_{pn} = \rho_p + \rho_n$), A est la section du thermocouple et l la longueur des pattes du MTE.

À partir des équations 2.8 et 2.9, on peut remonter à l'expression de la puissance électrique générée par un module thermoélectrique puisque :

$$P_{MTE} = Q_H - Q_C \quad (\text{équation I.12})$$

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

Ainsi, la puissance s'écrit :

$$P_{MTE} = N\alpha_{pn}I\Delta T_0 - NR_e I^2 \quad (\text{équation I. 13})$$

En outre, l'efficacité de conversion d'un module thermoélectrique peut être définie comme étant le rapport de la puissance électrique P_{MTE} produite dans le circuit sur la quantité de chaleur absorbée [13]

:

|

$$\eta = \frac{P_{MTE}}{Q_H} \quad (\text{équation I. 14})$$

Par ailleurs, on peut déterminer la puissance électrique maximale dans le cas du modèle « idéal » P_{MAX} (c'est la puissance optimale obtenue pour dP_{MTE}/dR_L où R_L est la résistance de charge externe) [14]:

$$P_{MAX} = \frac{N(\alpha_{pn}\Delta T_0)^2}{R_e} \quad (\text{équation I. 15})$$

D'autre part, il est important de présenter certains paramètres nécessaires dans l'étude des modules TE comme la tension V_{MTE} . En effet, la tension mesurée aux bornes du module TE est composée de deux termes : la tension Joule V_J et la tension Seebeck V_α , et s'écrit comme :

$$V_{MTE} = V_J + V_\alpha \quad (\text{équation I. 16})$$

Avec V_J est la tension joule qui est due à la résistance électrique du module et s'exprime par l'équation ci-dessous :

$$V_J = -NR_e I \quad (\text{équation I. 17})$$

V_α est la tension Seebeck qui résulte de la différence de température à travers le module T et est définie comme :

$$V_\alpha = N\alpha_{pn}\Delta T_0 \quad (\text{équation I. 18})$$

Donc, la tension aux bornes du module s'exprime par la relation suivante :

$$V_{MTE} = -NR_e I + N\alpha_{pn}\Delta T_0 \quad (\text{équation I. 19})$$

On note que la tension en circuit ouvert V_{OC} (obtenue pour un courant nul) est égale à la tension Seebeck. Elle demeure fixe si la différence de température à travers le module reste stable.

I.3.2 Modèle (réaliste)

Contrairement au modèle « idéal », un modèle plus «réaliste» de modules TE (figure I.7) est un modèle qui prend en compte la présence des deux plaques de céramiques qui couvrent l'ensemble des thermocouples, ainsi que la présence des résistances électriques de contact entre les pattes du module et les plaques de cuivre.

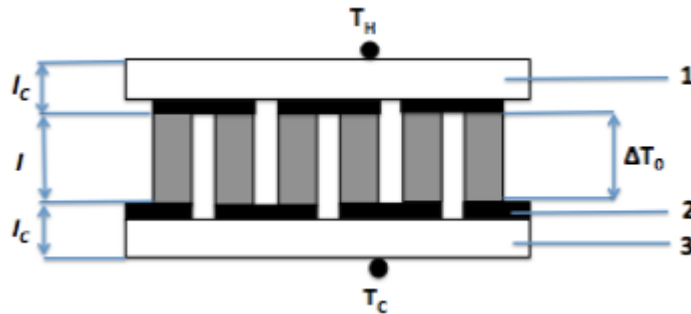


Figure I.7 : Modèle (réaliste) d'un MTE : 1- plaque de céramique (coté chaud), 2- contacte de cuivre, 3-plaque de céramique (coté froid).

En effet, avec la présence des plaques de céramiques, il faut tenir compte de la conductivité thermique de la céramique λ_C qui s'ajoute à la conductivité thermique des pattes λ_{pn} . Ainsi, puisque les contacts (céramique plus cuivre) sont thermiquement en série avec les pattes, on peut écrire :

$$\frac{l_T}{\lambda_T} = \frac{l}{\lambda_{pn}} + \frac{2l_C}{\lambda_C} \quad (\text{équation I. 20})$$

Où, l_T est la longueur totale du module ($l_T = l + 2l_C$).

l_C est l'épaisseur des contacts de cuivre et des plaques de céramique.

λ_T est la conductivité thermique totale de module.

Alors, cette définition de λ_T , une conductivité thermique effective, permettra d'obtenir la relation entre la différence de température aux deux surfaces du module ($T_H - T_C$) et la différence de température à travers les thermocouples ΔT_0 .

En effet, s'il n'y a pas de pertes par radiation, le flux de chaleur traversant le module est constant pour les deux différences de températures, ce qui permet d'écrire:

$$\frac{\lambda_T A}{l_T} (T_H - T_C) = \frac{\lambda_{pn}}{l} \Delta T_0 \quad (\text{équation I. 21})$$

À partir des équations I.20 et I.21, la relation entre ΔT_0 et $(T_H - T_C)$ s'exprime comme :

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

$$\Delta T_0 = \frac{T_H - T_C}{1 + 2r \frac{l_C}{l}} \quad (\text{équation I. 22})$$

Avec, $r = \lambda_{pn} / \lambda_c$

De même, si on prend compte des résistances de contact électrique, la résistance électrique effective R s'écrit comme la somme de la résistance des pattes R_e et la résistance de contact R_C :

$$R = R_e + R_C = \frac{\rho_{pn} l}{A} \left(1 + n \frac{l_C}{l} \right) \quad (\text{équation I. 23})$$

Avec, $n = 2\rho_c / \rho_{pn}$

La tension aux bornes du module, en tenant compte des plaques de céramique et des différentes résistances électriques, s'écrit comme suit :

$$V_{MTE} = N\alpha_{pn} \frac{(T_H - T_C)}{1 + 2r \frac{l_C}{l}} - NRI \quad (\text{équation I. 24})$$

Par conséquent, il est possible d'écrire les expressions de la tension en circuit ouvert V_{CO} et du courant en court-circuit I_{CC} :

$$V_{OC} = \frac{N\alpha_{pn}(T_H - T_C)}{(1 + 2r \frac{l_C}{l})} \quad (\text{équation I. 25})$$

$$I_{CC} = \frac{\alpha_{pn}(T_H - T_C)}{R(1 + 2r \frac{l_C}{l})} \quad (\text{équation I. 26})$$

En substituant les équations I.22 et I.23 dans l'équation I.15, on trouve que la puissance électrique maximale dans ce modèle P_{MAX} dépend de certains paramètres à savoir : la différence de température entre la face chaude et la face froide du module ($T_H - T_F$), le nombre de thermocouples N ainsi que des propriétés relatives aux pattes constituant les thermocouples comme : la section A , la longueur des pattes l et l'épaisseur des plaques de cuivre et de la céramique l_C [15].

$$P_{MAX} = \frac{N\alpha_{pn}^2 A (T_H - T_C)^2}{4\rho_{pn} l (1 + n \frac{l_C}{l}) (1 + 2r \frac{l_C}{l})^2} \quad (\text{équation I. 27})$$

L'efficacité de conversion du MTE peut alors s'exprimer en fonction du facteur de mérite ZT et s'écrit comme [16]:

$$\eta = \frac{\left(\frac{T_H - T_C}{T_H}\right) \left(1 + 2r \frac{l_c}{l}\right)^{-2}}{\left[2 - \frac{1}{2} \left(\frac{T_H - T_C}{T_H}\right) + \frac{4}{zT_H} \left(\frac{l + nl_c}{l + 2r l_c}\right)\right]} \quad (\text{équation I.28})$$

Ces différentes équations présentent les paramètres indispensables dans la caractérisation des modules thermoélectriques qui fait l'objet de notre étude. Dans ce projet, on présente une méthode pour évaluer la réponse thermoélectrique de ces dispositifs en se basant sur les lois TE, plus spécifiquement, l'effet Seebeck puisqu'on caractérise le module en appliquant une différence de température à ses deux surfaces.

En effet, pour comparer la performance entre deux modules TE, on a généralement recours à la comparaison de la tension en circuit ouvert (V_{OC}), le courant en court-circuit (I_{CC}), la puissance électrique maximale générée (P_{MAX}), le flux de chaleur (Q_H) ainsi que l'efficacité (η).

Les nombreuses recherches faites dans le domaine de la thermoélectricité ont permis de développer des systèmes de mesure qui servent à la caractérisation des modules TE [17]. Ainsi, d'une part, le système de mesure introduit dans ce projet nous présentera des données expérimentales permettant de le valider et de l'améliorer, et d'autre part, les tests faits sur ces modules permettront, quant à eux, une meilleure compréhension de la réponse thermoélectrique de ces dispositifs et le développement d'autres voies dans leur conception.

I.4 Etat de l'art d'application thermoélectrique (les thermo-générateurs) :

Les applications des modules TE peuvent être cassées en trois catégories selon la nature de la source chaude : I source de chaleur radio-isotopique, II source de chaleur naturelle et III source de chaleur perdue.

I.4.1 Radio-isotopique :

Un générateur thermoélectrique à radio-isotope (RTG) est un générateur électrique nucléaire de conception simple, il ne s'agit ni d'un processus de fusion ni de fission nucléaire, ce qui nécessiterait des contraintes importantes sur le système, mais la désintégration naturelle d'un atome radioactif, généralement le plutonium 238 sous forme de dioxyde de plutonium $^{238}\text{PuO}_2$. En se désintégrant, les atomes radioactifs libèrent de la chaleur, dont une partie est directement convertie en électricité [18].

Le premier RTG a été développé par Mound Laboratoires en 1954 [19]. La source de chaleur consistait en une sphère de 1 cm de diamètre contenant ^{57}Ci (1,8 Wt) de ^{210}Po à l'intérieur d'une capsule en acier nickelé, le tout dans un récipient en lucite. Avec des thermocouples au chromel-constantan

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

soudés en argent, la batterie thermique produit 1,8 mW[20]. Trois domaines, à savoir le domaine spatial, les dispositifs d'alimentation électrique dans les régions rurales et le domaine médical, ont bénéficié des RTG, bien que les deux derniers domaines n'aient pas prospéré en raison des risques liés à l'utilisation des radio-isotopes.

I.4.1.1 Domaine spatial :

Le premier RTG lancé dans l'espace par les Etats-Unis d'Amérique fut le SNAP 3B en 1961. Propulsé par 96 grammes de plutonium 238, à bord du vaisseau spatial Navy Transit 4A [21]. En 2010, les Etats-Unis ont lancé 41 RTG sur 26 systèmes spatiaux[22]. Parmi eux, Galileo(lancé en 1989 à Jupiter), Ulysse (lancé en 1990 comme orbite solaire), Cassini(lancé en 1997 à Saturne), New Horizons(lancé en 2006 pour survoler Pluton 2015) et le robot Curiosity du Mars Science Laboratory (installé sur Mars en 2012). Des systèmes pour les groupes auxiliaires nucléaires (SPAPs) ont été utilisés pour les sondes qui se déplaçaient loin du Soleil, rendant les panneaux solaires impraticables [23].

En effet, les RTG utilisés dans le programme spatial américain comprenaient initialement les matériaux SiGe TE installés dans le GPHS-RTG, auxquels ont succédé par la suite les alliages de tellure de plomb ou TAGS utilisés dans le MMRTG (RTG multi-mission) illustrés à la (figure 8). Ce MMRTG a été développé dans le programme appelé MMRTG amélioré ou eMMRTG [24]. Avec l'utilisation de nouveaux matériaux thermoélectriques skutterudite pour atteindre une plus grande efficacité et de faibles taux de dégradation qui sont importants pour les missions à long terme vers les planètes extérieures[25].

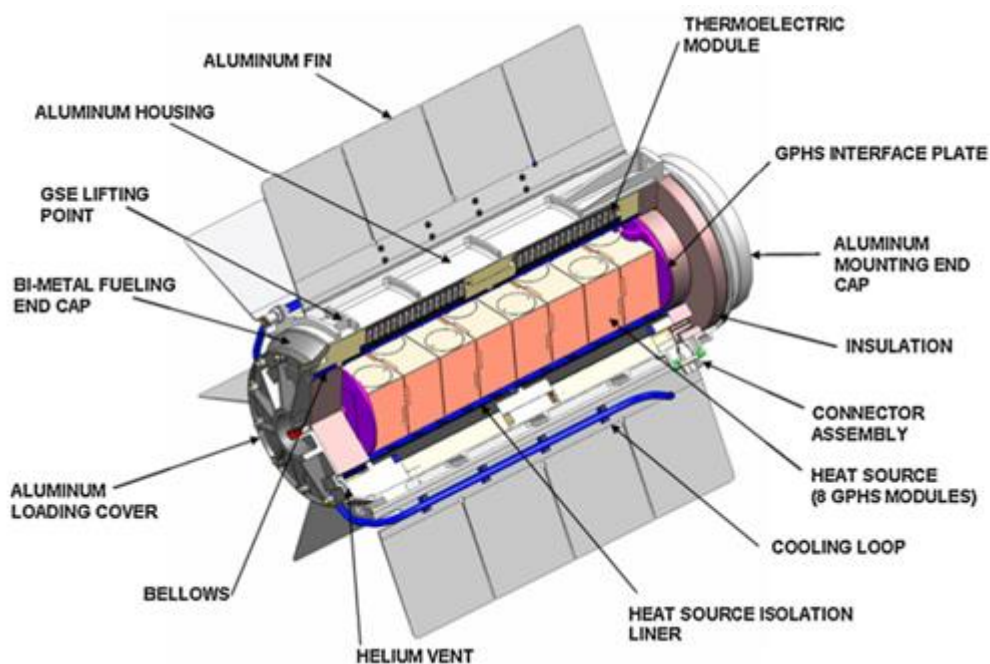


Figure I.8 vue de coupe d'un MMRTG [26].

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

I.4.1.2 Dispositifs d'alimentation électrique dans les régions rurale et isolé :

L'une des premières utilisations terrestres des RTG a été faite en 1966 par la marine américaine pour alimenter l'instrumentation environnementale à Fairway Rock, une petite île inhabitée de l'Alaska. Les RTG ont été utilisés sur ce site jusqu'en 1995[27]. Ces systèmes ont été développés pour l'alimentation électrique des équipements nécessitant une source d'énergie stable et fiable, sur plusieurs années et sans entretien. Par exemple, les systèmes d'alimentation électrique situés dans des environnements isolés ou inaccessibles, comme les phares et les balises de navigation, et les stations météorologiques. De même, entre 1960 et 1980, l'Union soviétique a construit de nombreux phares sans pilote et balises de navigation équipées d'environ 1000 RTG (figure 9)[28]. Tous les RTG russes ont depuis longtemps épuisé leur durée de vie de 10 ans et nécessitent des mesures de démantèlement extrêmes en raison de la source potentiellement dangereuse de radioactivité et du risque d'être utilisés dans des actes terroristes [29]. Évidemment, toute la recherche et le développement dans ce domaine ont été arrêtés en raison des risques déjà mentionnés[30].



Figure I.9 RTG utilisé pour alimenter les phares et les balises de navigation [28].

I .4.1.3 Domaine médical :

En 1966, de petites cellules de plutonium(de très petits RTG alimentés en Pu238)ont été utilisées dans des stimulateur cardiaques implantés pour assurer une très longue durée de vie de la batterie, comme le montre la figure [31].En 2004, environ 90 d'entre elles étaient encore en usage .De nombreuses entreprises ont fabriqué des stimulateurs cardiaques nucléaires : ARCO (Perma-grain), Medtronic (Laurens-Alcatel),Gulf General Atomic, Cordis (Telektrico,Accuffix), American

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

Optic ,Technologie Biocontrol(Coratomic) et Medical Devices Inc(MDI)[32].Après le développement des batteries au lithum,le marché des batteries nucléaires s'est tari[33].



Figure I.10 Stimulateur cardiaque à gauche et pile RTG à droite [33].

I.4.2 Source de chaleur naturelle :

I.4.2.1 Gaz naturel et biomasse :

Pouillet, en 1840, utilisa l'effet Seebeck pour fabriquer une cellule thermoélectrique avec une paire soudée de bismuth et de cuivre. Les deux soudures ont été immergées dans deux récipients, l'un contenant de glace fondante et l'autre de l'eau chaude [34]. Cet appareil alimentant une source constante d'électricité dynamique a été utilisé par l'auteur pour étudier les lois générales des courants [35]. En même temps, plusieurs prototypes de batteries thermoélectrique ont été construits et même commercialisés, avec des tailles et des matériaux différents pour des buts différents[36]. Par exemple, la batterie Osrested et Fourier conçue pour leurs investigations[37], la thermopile Ruhmkoff (1860) alimentée au gaz et refroidie à l'eau[38], et la gigantesque batterie Clamond (1879), qui fut la première batterie thermoélectrique alimentée au charbon ou au bois, avec une hauteur de 2,50 m et 1 m de diamètre. Sa puissance maximale était de 192 watts, à 54 volts et 3,5 ampères [39].

De nos jours, les thermopiles ou les générateurs thermoélectriques TEG sont conçus pour fournir de l'énergie aux capteurs autonomes, installés dans des endroits éloignés soumis à des conditions environnementales sévères, c'est-à-dire à des températures très basses et à un accès difficile, où les sources d'énergie renouvelables classiques, comme l'énergie solaire et éolienne, ne sont pas disponibles régulièrement. La chaleur est généralement fournie par un brûleur catalytique sans flamme[40]. Quelques fabricants de générateurs thermoélectriques alimentés au gaz naturel sont installés dans plus de 55 pays. Par exemple, Gentherm fabrique des groupes électrogènes dont la puissance varie de 15 à 550W. Ces groupes électrogènes sont principalement utilisés sur des plateformes en mer, le long de pipelines, à des altitudes ou à proximité de puits de gaz(Figure 11)[42].



Figure I.11 Gaz Gentherm TEG [40].

Il y a encore des applications spécifiques, comme le CampStove illustré à la figure 12. Cet équipement, conçu pour le camping en général. Brûle le bois pour produire 2 W d'énergie de 0.4 A et 5 V à l'aide d'un générateur thermoélectrique dans lequel la connexion des dispositifs électriques se fait via un port USB [43].



Figure I.12 image de le campstove [43].

I.4.2.2 Source solaire :

Un générateur thermoélectrique solaire (STEG) est un système conçu pour récupérer la chaleur du rayonnement solaire et la convertir en électricité à l'aide d'un générateur thermoélectrique (TEG). Il devient une alternative technologique et rivalise avec les systèmes photovoltaïques solaires dominants malgré son faible rendement de conversion par rapport à la technologie PV [44]. Les STEG sont classés selon le type de capteurs optiques utilisés, à savoir un système de concentration optique ou non. Les capteurs de concentration optique sont généralement des lentilles cylindriques, des lentilles de Fresnel, des miroirs paraboliques, des miroirs plats ou des concentrateurs paraboliques. Les solutions non concentrées sont plutôt limitées aux collecteurs à plaques plates sous vide ou aux tubes à vide [45].

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

La première étude sur l'énergie solaire thermoélectrique remonte à la fin du XIX^e siècle, avec le brevet de Weston en 1888[46][47] qui combinait une thermopile (TEG) avec un miroir ou une lentille pour focaliser le rayonnement solaire sur les jonction chaudes et une batterie de stockage. Les premières données expérimentales sur un dispositif STEG ont été publiées par Coblenz en 1922[48], avec un rendement inférieur à 0.01%. Telkes a signalé plus de progrès en 1954 sur un dispositif STEG[49] qui ont démontré une efficacité de 0.63% et 3.35% à 1 et 50 soleil respectivement des concentrateurs optiques dans un capteur d'énergie solaire plat. Des alliages de type ZnSb en combinaison avec un bi-alliage négatif ont été utilisés. Les études les plus importantes sur les STEG sont résumées ci-dessous. He et al. [50] ont réalisé une étude théorique et expérimentale sur l'intégration de modules TE dans le chauffe-tube solaires sous vide (SHP-TE), comme l'illustre la (figure 13). Leurs données expérimentales ont montré un rendement électrique de 1% ce qui est légèrement inférieur à un système avec un cycle organique de Rankine mais selon les autres le système SHP-TE est simple et n'a pas de composants mobiles et ses unités sont facile à remplacer. Sur le même principe, une autre recherche créative a été effectuée avec l'utilisation d'un concentrateur solaire parabolique[51][52].

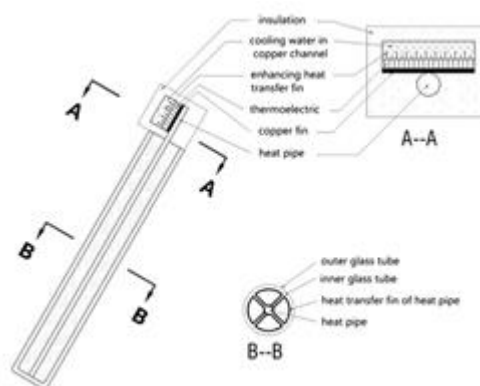


Figure I.13 Schéma d'un système SHP-TE intégré [50].

Kraemer et al. [53] ont utilisé des matériaux thermoélectriques nanostructures pour mettre au point les générateurs thermoélectriques solaires à panneaux plats illustrés à la (figure 14). Ces TE ont atteint un rendement maximale de 4,6% avec une irradiation de $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. L'efficacité était de 7 à 8 fois supérieure à la meilleure valeur rapportée précédemment pour une surface plate.

Amatya et Ram [54] ont combiné un module commercial Bi_2Te_3 avec un concentrateur parabolique (concentration solaire de 66 fois soleils). Un rendement du système de 3% a été mesuré et une puissance de sortie de 1,8 W a été atteinte. Rehman et al. [55] a proposé un nouveau modèle de collecteur pour un générateur thermoélectrique à concentration solaire. Le système avait un rendement

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

électrique de 1,7% et un rendement optique maximale de 93,61 %.Li et al .[56] ont évalué un prototype constitué d'un générateur thermoélectrique à concentration solaire(GEC) avec lentille de Fresnel (figure 15).Leur résultats ont montré que l'efficacité CTG la plus élevée possible pourrait atteindre 9,8% , 13,5% et 14,1%, respectivement, pour les alliages Bi₂Te₃,skutterudite et LAST(tellure au plomb d'antimoine d'argent) .

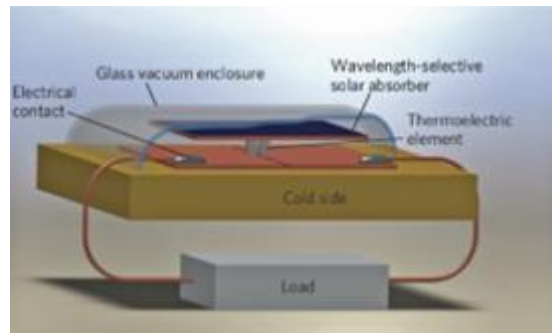


Figure I.14 illustration d'une cellule STEG constituée d'une paire d'éléments thermoélectriques de type p et n [53]

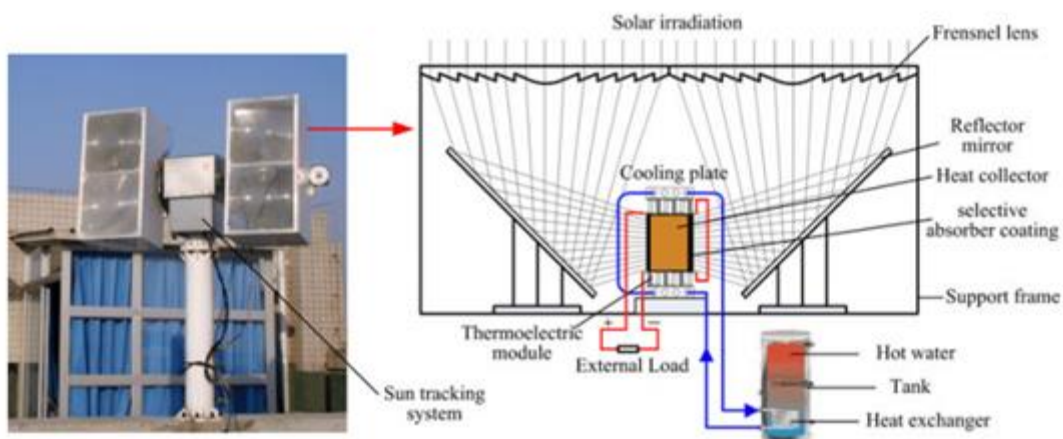


Figure I.15 Générateurs thermoélectriques solaires à concentration : (a) Un prototype expérimental du système thermoélectrique solaire à concentration ;(b) Détails de l'unité CTG [57].

Les systèmes photovoltaïque et thermoélectrique sont les seuls procédés qui convertissent directement l'énergie solaire en énergie électrique [58].Certaines études ont été menées sur les systèmes photovoltaïques-thermiques hybrides [59] et les systèmes photovoltaïque concentrés (CPV)-thermoélectriques [60].Un autre système hybride consiste à coupler directement un chauffe-eau solaire avec un module thermoélectrique, afin d'améliorer la performance globale du système produisant simultanément de la chaleur et de l'électricité[61] .Cependant , leur combinaison est complexe en raison de leurs caractéristiques opposées, car une intégration efficace des deux systèmes est essentielle[62] .Sripadmanabhan Indira et al.[63] ont étudié différentes configurations du système hybride intégrant des concentrateurs photovoltaïque (CPV) et des générateurs thermoélectriques (TEG)

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

et ont formulé des recommandations pour des recherches futures. Li et al.[64] ont comparé un système hybride photovoltaïque-thermoélectrique (PV-TE) utilisant un réseau de caloducs à micro-canaux avec la production d'électricité photovoltaïque. Les résultats ont montré que l'efficacité électrique du système hybride PV-TE était d'environ 14% supérieure à celle du système PV.

Mizoshiri et al. [65] ont construit un module hybride composé d'un module thermoélectrique à couche mince et d'un module photovoltaïque. Ce module hybride a filtré la lumière à travers un filtre infrarouge (miroir chaud) permettant seulement la lumière qui a contribué à la conversion photovoltaïque de passer à travers. En même temps, la lumière réfléchie était focalisée sur le côté chaud du module thermoélectrique à l'aide d'une lentille. La tension totale sans charge du générateur thermo-photovoltaïque hybride a augmenté de 1,3% par rapport à l'utilisation du module photovoltaïque seul. En ce qui concerne les systèmes hybrides TPV/TE, les cellules thermo photovoltaïque (TPV) sont capables de convertir le rayonnement infrarouge en électricité. Il s'agit d'une source de chaleur, d'un émetteur, d'un filtre et de cellules photovoltaïque (PV) [65].

I.4.3 Source de chaleur perdue :

I.4.3 Récupération de la chaleur perdue des systèmes de transport (Automobile) :

Les deux tiers de l'énergie de combustion d'un véhicule sont perdus sous forme de chaleur, dont 40% sous forme de gaz d'échappement chauds [66][67]. Si environ 6% de la chaleur d'échappement pouvait être convertie en énergie électrique, il serait possible de

réduire la consommation de carburant d'environ 10% [68]. Pour ça, les grandes entreprises automobiles américaines, asiatiques et européennes, en collaboration avec des instituts de recherche et des universités, tentent de mettre au point divers types de TEG pour améliorer l'économie de carburant de leur modèles de véhicules, préserver et gagner une part supplémentaire dans le futur marché automobile, qui sera sans doute plus restrictif.

Agudelo et al. [69] ont testé une voiture de tourisme diesel dans une chambre climatique afin de déterminer le potentiel de récupération d'énergie à partir des gaz d'échappement. Ils ont conclu que les économies potentielles de carburant allient de 8 à 19% et que le silencieux affichait les plus fortes pertes d'énergie, de sorte que l'installation d'un TEG devait être effectuée avant ce dernier. En outre, il existe principalement trois emplacements possibles pour le TEG [70], à savoir : (i) le TEG est placé à

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE

l'extrémité du système d'échappement ; (ii) TEG est situé entre le convertisseur catalytique et le silencieux, la meilleure option ; (iii) le TEG est situé en amont du convertisseur catalytique et silencieux .

A la fin des années 1980, Birkholt [71], en collaboration avec Porche, a proposé un générateur thermoélectrique à section rectangulaire , capable de produire jusqu'à 58 w en conditions de pointe avec des éléments FeSi₂. A la fin des années 1990, le centre de recherche Nissan de Japon [72] a mis au point un générateur TE avec une section rectangulaire de 72 modules . Chacun de ces modules contenait 8 paires d'éléments Si-Ge à appliquer aux véhicules à essence. L'alimentation électrique fournie par la génératrice était de 36,6 plus tard, ils ont testé un générateur thermoélectrique composé de 16 modules Bi₂Te₃ fonctionnant à basse température ; la puissance électrique générée par le générateur était de 193, ce succès a conduit Gentherm ,BMW et Tenneco en 2011 pour lancer un nouveau programme de sept ans en utilisant un nouveau dispositif de cartouche thermoélectrique .L'électricité produite par le TEG a permis d'économiser 4% de la consommation de carburant , ce qui est loin des objectifs du programme. General Motors a développé un prototype à l'aide de modules Bi-Te et Skutterudite installés sur une banlieue de Chevrolet [73], les skutterdites utilisées à des températures élevées étaient leur dernier choix .La puissance moyenne développée par le TEG devrait être de 350 w pour les cycles urbains et de 600 x sur les autoroutes [74].

CHAPITRE I : PHENOMENES ET CONCEPT THERMOELECTRIQUE



Figure I.16 Intégration du TEG dans la ligne d'échappement du véhicule prototype BMW X6[74].

CHAPITRE II :

GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

II.1 introduction :

Dans ce chapitre, on présente quelques notions fondamentales d'astronomie qui donnent des informations sur le rayonnement reçu au sol (diffus et direct). Les données nécessaires à l'établissement du bilan énergétique solaire (les durées d'insolation, les mesures du rayonnement direct et diffus et les mesures du rayonnement global) d'un lieu déterminé sont obtenues par des appareils de mesures. Finalement, on va présenter le concentrateur solaire parabolique et analyser les performances de ce système.

II.2 Rappels fondamentaux d'astronomie :

II.2.1 Généralité sur la terre et le soleil :

Le soleil est une immense sphère de plasma de diamètre 109 fois supérieur à celui de la terre, de densité 1,41 ; la pression qui y règne à sa surface est de plusieurs milliards de fois plus forte que celle observée au niveau de la surface terrestre, le constituant principal du soleil est l'hydrogène, des réactions thermonucléaires se produisent alors en permanence provoquant la fusion de l'hydrogène en Hélium. La température à la surface du soleil est de 5800° K et peut atteindre $20 \cdot 10^6$ K à son centre. A chaque seconde, le soleil perd $4,5 \cdot 10^6$ tonnes de matières sous forme de rayonnement électromagnétique se propageant à la vitesse de 300.000 km/s. Notons toutefois que la perte de matière est infime vis-à-vis de la masse totale du soleil. Ce rayonnement solaire est équivalent au rayonnement qui serait émis par un corps noir à 5800 K [1].

Le gisement solaire est une science qui propose l'étude radiométrique et météorologique de l'atmosphère. En effet, les aspects de l'environnement relèvent immédiatement de l'objet précité. Les niveaux d'énergies au sol et leurs rythmes de fluctuation saisonnière, les variations dans l'espace et dans le temps de l'humidité et de la pression atmosphérique, le régime du vent avec d'autres paramètres avec moins ressentis, reflètent le concept propre du climat. L'Algérie offre des possibilités considérables pour le développement des applications solaire et éolienne via l'exploitation du gisement solaire sous ses différentes formes selon les diverses modes de captation [2].

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

II.2.2 Les émission du soleil :

L'énergie émise par le soleil est d'abord sous forme de rayonnements électromagnétique dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. L'œil humain perçoit une partie seulement du rayonnement solaire, celle située dans le domaine dit **visible**, de longueurs d'onde comprises entre (0,40 et 0,70 μm), le rayonnement **ultraviolet**, est un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde plus courte que le visible (<0,4). Le rayonnement **infrarouge** est un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde (>0,77 μm).

La plus grande partie de l'énergie est cependant rayonné dans les domaines ultraviolets, Visibles, et proche d'infrarouge : 99,2 % de l'énergie solaire hors atmosphère se trouve entre 200 nm et 4 μm . Au sol, par suite de l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau, Le spectre est limité vers le haut à environ de 2,5 μm (figure II.1) [1].

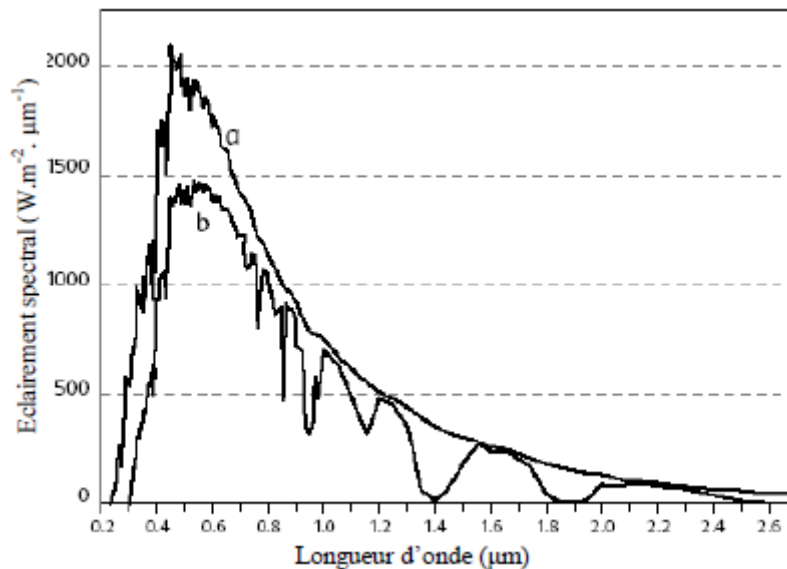


Figure II.1 : Densité spectrale de l'éclairement énergétique du rayonnement solaire direct (a) Rayonnement solaire hors de l'atmosphère. (b) Rayonnement solaire direct au sol pour une hauteur du soleil de 6 degrés et une atmosphère claire standard.

II.2.3 La constante solaire :

Le flux solaire moyen sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons et placé en dehors de l'atmosphère terrestre est appelé : la constante solaire **I**. La valeur moyenne actuellement retenue est 1390 W/m². La variation de la distance terre-soleil pendant l'année influence la valeur de la constante solaire. La relation suivante donne la valeur corrigée de la constante solaire [3] :

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

$$I = 1353(1 + 0.033 \cos J) \text{ (équation II.1)}$$

Lorsqu'une plus grande précision est requise, on pourra utiliser le développement en série de Fourier [4] :

$$I = 1353 + 45.326 \cos J + 0.88018 \cos 2J - 0.0046 \cos 3J + 1.8037 \sin J + 0.09746 \sin 2J + 0.18412 \sin 3J \text{ (Équation II.2)}$$

Avec : $J=0.984 j$, j étant le numéro du jour de l'année à partir du 1er janvier.

II.2.4 Déclinaison du soleil :

Le mouvement de la terre sur son axe et autour du soleil est schématisé sur la figure (II.2). Les quatre positions de la terre représentées sur cette figure correspondent aux solstices et aux équinoxes. On notera en particulier que l'axe de rotation de la terre est incliné par rapport à la normale du plan de l'écliptique d'un angle de $23.27'$ [4] et la déclinaison du soleil (δ) varie donc de $-23.27'$ (solstice d'hiver 21 Décembre) à $+23.27'$ (solstice d'été 21 Juin) en passant par 0 aux équinoxes.

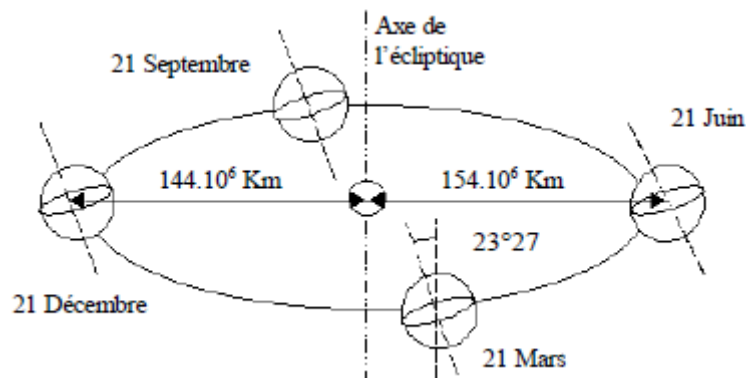


Figure II.2 : Mouvement de la terre autour du soleil.

Donc, l'angle de la déclinaison δ est donné par l'équation suivante [4] :

$$\delta = 23.45 \sin[0.9805(j + 284)] \text{ (Équation II.3)}$$

Lorsqu'une précision est requise, on pourra utiliser le développement en série de Fourier [4]:

$$\delta = 0.33281 - 22.984 \cos J - 0.3499 \cos 2J - 0.1398 \cos 3J + 3.7872 \sin J$$

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

(équation II.4)

$$+0.03205 \sin 2J + 0.07187 \sin 3J$$

La courbe suivante représente la variation de l'angle δ en fonction du numéro du jour Figure (II.3).

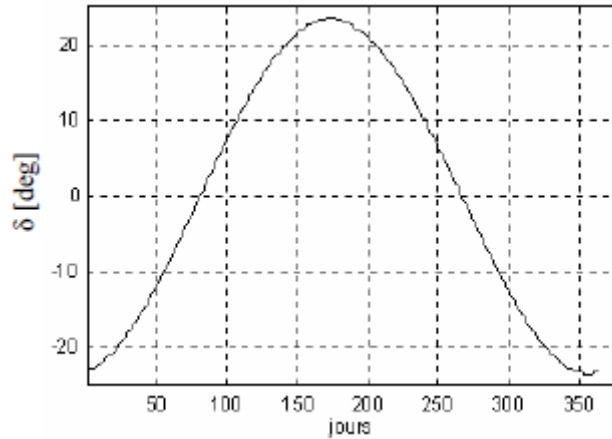


Figure II.3 : Déclinaison du soleil.

II.2.5 Angle horaire ω :

L'angle horaire est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe polaire, il est donc directement lié au temps solaire vrai TSV qui est un paramètre essentiel permettant le calcul exact des coordonnées angulaires du soleil [5].

$$\omega = \frac{360}{24} (TSV - 12) \quad (\text{Équation II.5})$$

TSV : temps solaire vrai donné en heures.

II.2.6 Les différent temps solaire :

1. Le temps solaire vrai (TSV) : Directement lié à la rotation de la terre sur elle-même, il est défini par l'angle horaire ω c'est-à-dire angle formé par le plan méridien passant par le soleil et le plan méridien de lieu [5].

$$TSV = 12 + \omega/15 \quad (\text{Équation II.6})$$

2. Le temps solaire moyen (TSM) : C'est le temps qui correspondrait à une rotation uniforme de la terre autour du soleil. Il diffère peu de TSV (écart maximal ET = 16 minutes) donc :

$$TSM = TSV + ET \quad (\text{Équation II.7})$$

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

Où l'équation de temps (ET) est donnée par la relation suivante :

$$ET = 0.0072 \cos J - 0.0528 \cos 2J - 0.0012 \cos 3J - 0.1229 \sin J - 0.1565 \sin 2J + 0.0041 \sin 3J \quad (\text{Équation II.8})$$

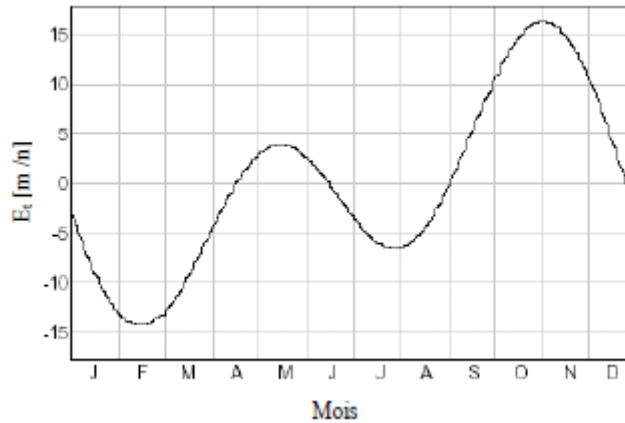


Figure II.4 : Equation de temps.

Ainsi, pour repérer la position du soleil dans le ciel, il est d'usage d'utiliser un système de coordonnées local dit coordonnées azimutales, défini en un point de la surface terrestre et la direction du soleil est repérée grâce à deux angle :

- **Hauteur du soleil (h)** : C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur sol, il varie de 0° à 90° dans l'hémisphère sud et s'annule au lever et au coucher du soleil et est maximal au midi TSV.
- **Azimat su soleil (a)** : C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud, cet angle étant mesuré positivement ver l'ouest.

On exprime (a) et (h) en fonction de la latitude L , δ et ω par les relations suivantes [4] :

$$\sin h = \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos \omega \quad (\text{Équation II.10})$$

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (\text{Équation II.11})$$

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

II.2.7 Lever et coucher du soleil :

On s'intéresse ici à deux instants particuliers de la journée, le lever et le coucher du soleil qui sont données par les équations (II.12) et (II.13) [4] :

$$(TSV)_{lever} = 12 - \frac{\omega_s}{15} \quad (\text{Équation II.12})$$

$$(TSV)_{coucher} = 12 + \frac{\omega_s}{15} \quad (\text{Équation II.13})$$

L'angle solaire au lever ($-\omega_s$) et au coucher (ω_s) sont donnés par l'équation suivante:
{Posons ($\sin h = 0$) dans la relation (II.10)}

$$\omega_s = -\tan \delta \tan L \Rightarrow \omega_s = -\cos^{-1}(-\tan \delta \tan L) \quad (\text{équation II.14})$$

II.2.8 Durée du jour :

La durée du jour (d) est donnée par l'expression suivante [6] :

$$d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \delta \tan L) \quad (\text{équation II.15})$$

II.2.9 Fraction d'insolation :

La durée d'insolation est une variable qui présente une grandeur non stationnaire, celle-ci trouve son explication dans la variation de sa moyenne de l'année, à cause de la saisonnalité du processus. En effet, elle varie d'un jour à l'autre. L'ensevelissement d'un site est exprimé par la fraction d'insolation (σ) définie par le rapport :

$$\sigma = \frac{n}{d} \quad (\text{équation II.16})$$

Où (n) est le nombre d'heures ensoleillées ou durées d'insolation, et (d) la durée du jour

- pour un jour très clair $\sigma = 1$
- pour un jour totalement couvert de (nuage) $\sigma = 0$.

les fractions d'insolation sont exprimées en % [7].

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

II.3 Rayonnement solaire :

L'énergie émise par le soleil voyage jusqu'à la terre sous forme de rayonnement électromagnétique. Le rayonnement est semblable aux ondes radioélectriques mais il possède une gamme de fréquence différente. La quantité d'énergie disponible au cours du trajet entre le soleil et l'atmosphère extérieure de la terre est égale à environ 1367 W/m^2 . Il en résulte qu'au cours d'une journée ensoleillée, la quantité d'énergie solaire disponible à la surface de la terre dans la direction du soleil est généralement plus ou moins de 1000 W/m^2 . Quel que soit le moment, l'énergie solaire disponible est principalement fonction de la position du soleil dans le ciel et de la nébulosité. Sur une base mensuelle ou annuelle, la quantité d'énergie solaire disponible dépend également de l'emplacement géographique. De plus, l'énergie solaire utilisable dépend de l'énergie solaire disponible.

Le rayonnement solaire global qui atteint la surface du capteur comprend un rayonnement direct, provenant en lignes droites venant directement du soleil, et un rayonnement diffus, qui provient de manière non isotrope, de toutes les directions de l'espace. Une partie du rayonnement diffusé est renvoyée vers l'espace ; le reste est transmis jusqu'au sol, voir la figure (II.5).

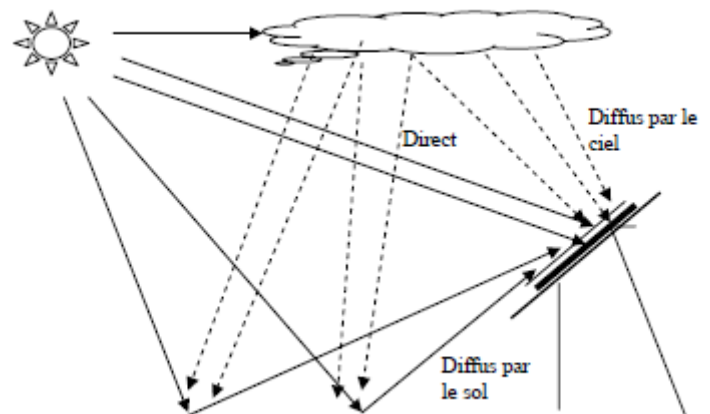


Figure II.5 : Transmission du rayonnement solaire.

On définit **L'albédo** comme le rapport entre l'énergie réfléchi par diffusion et l'énergie incidente tableau (II .1) [4].

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

Tableau (II.1) : albédo du sol

Surface	Réfectivité moyenne
Sol enneigé	0.7
Sol recouvert de feuilles mortes	0.30
Herbe verte	0.26
Forêt en automne ou champs dorés	0.26
Galets et pierres blanches	0.20
Herbe sèche	0.20
Sol argileux	0.17
Foret en hiver (arbres conifères sans neige)	0.07
Plan d'eau (soleil haut $h > 030^\circ$)	0.07

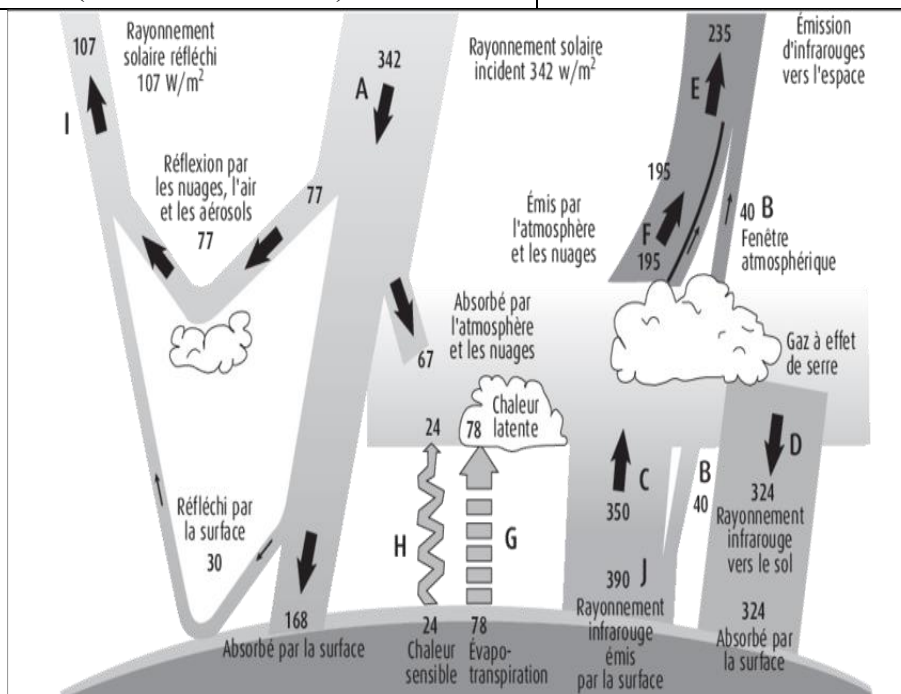


Figure II.6 : Echanges énergétiques moyens entre la surface terrestre, L'atmosphère et L'espace. En W/m².

De par sa situation géographique, l'Algérie possède une source énergétique importante. Elle reçoit annuellement une énergie de l'ordre de 2500 KWh /m²/ an [8]. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays [9].

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

Tableau (II.2) : Potentiel solaire en Algérie.

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1700	2650

II.4 Estimation du rayonnement solaire :

Pour estimer le rayonnement solaire, il existe plusieurs méthodes : la modélisation analytique (formule ou logiciel), la mesure au sol et la mesure par satellites. La mesure au sol est la plus précise. Les instruments classiques de mesure du rayonnement solaire sont :

- **Le pyranomètre** : C'est un appareil qui est utilisé pour la mesure du rayonnement global reçu par une surface plane. Il peut aussi mesurer le rayonnement diffus s'il est muni d'un pare-soleil.
- **L'héliographe** : Cet instrument mesure la durée d'ensoleillement journalière.
- **Pyrhéliomètre** : C'est un radiomètre qui mesure le rayonnement direct reçu pour une surface normale aux rayons du soleil [10].

La mesure satellitaire est basée sur des modèles de traitement d'images, permettant d'estimer le flux de rayonnement solaire. Les modèles analytiques et statistiques utilisent des approches physiques. Deux modèles simples sont souvent utilisés dans la littérature, il s'agit des approches de PERRIN DE BRICHAMBEAUT et de LIU et JORDAN.

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

II.4.1 Instrument de mesure de rayonnement :

La mesure des rayonnements globales et diffus au sol est effectuée par un pyranomètre (voir figure II.7). Cet instrument mesure le rayonnement incident sur une surface horizontale noircie à partir d'un angle solide de 2π steradians. La gamme spectrale couvre des longueurs d'onde de 0.3 à 3 μm . Le rayonnement reçu est converti en chaleur par la surface noircie. La différence de température entre la surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'irradiance du rayonnement global ; elle est mesurée par une thermopile composée de plusieurs thermocouples connectés en série [11].

Un pyranomètre similaire ayant une bande de nuances ajoutée obscurcit le rayonnement direct mesure le rayonnement diffus. Selon les circonstances, cet écran peut être un disque ou une sphère [11]. La valeur du rayonnement direct est obtenue plus tard par la différence entre les rayonnements globale et diffuse.



Figure II.7 : Pyranomètres : à gauche pour la mesure du global et à droite pour la mesure du diffus.

II.5 Concentrateur solaire :

II.5.1 Introduction :

La conversion de l'énergie solaire en chaleur thermique à moyenne et à haute température est obtenue par des techniques différentes en fonction des besoins. Elle peut fournir directement à

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

l'industrie, une partie de ses besoins en chaleur, elle peut aussi être transformée en énergie électrique pour l'alimentation des réseaux. La conversion à moyenne et à haute température a recours à une technologie plus élaborée, par l'idée de concentrer les rayonnements solaires pour augmenter l'intensité de flux solaire au moyen de capteurs optiques plus élaborés appelés concentrateurs solaires.

II.5.2 Captation du rayonnement solaire :

On peut capter directement le rayonnement solaire au moyen des panneaux plans (capteurs plans) réceptifs, convenablement équipés dénommés isolateurs, au lieu de faire la captation directe on peut la faire à l'aide des concentrateurs, connus par le nom de capteurs solaires à concentration. Ces deux types de capteurs réagissent réciproquement avec les radiations solaires. Le capteur plan est considéré comme un simple absorbeur des rayons solaires provenant de toutes les directions. Le rayonnement solaire est non seulement absorbé du ciel mais aussi de tout l'environnement. Cela veut dire qu'un capteur plan est relativement insensible aux conditions du ciel. D'autre part, la réalisation d'un capteur solaire plan ne demande pas une conception compliquée. Cependant, la conception d'un collecteur avec effet de concentration, qui fait appel à des techniques plus au moins complexes, dont le principe consiste à focaliser le flux solaire incident sur un absorbeur de surface plus petite que la surface d'ouverture du collecteur, afin d'augmenter la concentration du rayonnement au niveau de l'absorbeur.

A l'encontre des capteurs plans qui utilisent le rayonnement diffus provenant du ciel et du sol, les concentrateurs n'utilisent que le rayonnement direct. La figure suivante montre le principe de captation par les deux types de conversion thermique de l'énergie solaire [12].

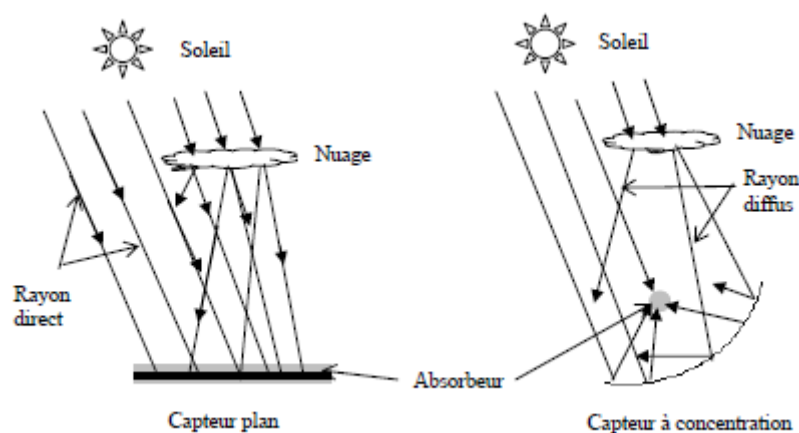


Figure II.8 : Type des capteurs solaire et le principe d'absorption des rayonnements solaire.

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

II .5 .3 Conversion thermique de l'énergie solaire [13] :

Une des manifestations les plus évidentes du rayonnement solaire est la chaleur qu'il apporte. Ce paragraphe est consacré aux dispositifs qui convertissent le rayonnement solaire en chaleur, parce que le but de recherche est justement la production de chaleur pour génère l'électricité. On peut classer ces dispositifs selon le degré de concentration du rayonnement solaire qu'ils opèrent avant la transformation en chaleur.

II.5.3.1 Dispositifs sans concentration :

Les capteurs sans concentration sont en général des surfaces planes noircies (pour mieux absorber le rayonnement) et couvertes d'une vitre (pour profiter de l'effet de serre et empêcher la chaleur de la surface d'être emportée par les mouvements de l'air tels que le vent et la convection naturelle). Un fluide circule à l'intérieur de la surface absorbante pour emporter la chaleur produite. La température ne dépassant pas 80°C. Ceci n'est pas un handicap pour des applications telles que l'obtention de l'eau chaude domestique.

II.5.3.2 Dispositifs 2D (concentration sur une ligne) :

Le thermique 2D (figure II.8) utilise comme capteur solaire à concentration de type cylindro-parabolique, contient un élément tubulaire sur lequel un miroir parabolique concentre le rayonnement du soleil. Il nécessite un système d'orientation du miroir (à un degré de liberté). Ce système permet d'atteindre par la concentration du rayonnement direct une température supérieur à 400°C.

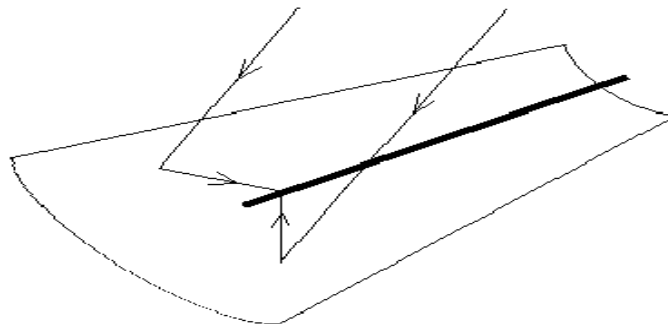


Figure II.9 : Principe d'une concentration 1D.

II.5.3.3 Dispositifs 3D (concentration en un point) :

Le concentrateur 3D (figure II.10) semble le plus intéressant. Il utilise comme capteur un élément de petite dimension sur lequel le rayonnement solaire est concentré par un ensemble de miroirs paraboliques (héliostats). Les héliostats doivent être munis d'un dispositif d'orientation à deux degrés de

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

libertés. Ce système peut produire une température de 1500°C (fluctuante, ce qui fatigue les matériaux du capteur).

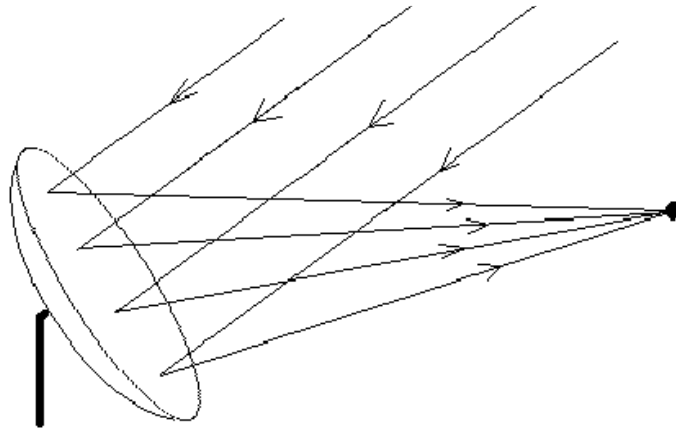


Figure II.10 : Principe d'une concentration en un point.

Ici aussi, ce chiffre doit être tempéré par une série de considérations. Tout d'abord, puisqu'il y a concentration, le rayonnement diffus du soleil n'est pas utilisé. Ensuite, les héliostats doivent être disposés de façon à éviter non seulement les ombres, mais encore le blocage du rayonnement entre un héliostat et le capteur. L'occupation du sol est dès lors assez faible. Ensuite, comme le soleil, l'héliostat et le capteur ne sont pas alignés. Enfin, la distance entre le capteur (en haut d'une tour) et le dispositif thermodynamique donne lieu à des pertes de chaleur. Malgré ce fait et les difficultés technologiques liées à cette solution, elle pourrait bien s'avérer la plus intéressante économiquement des solutions thermiques.

II.5.4 Rapport de concentration :

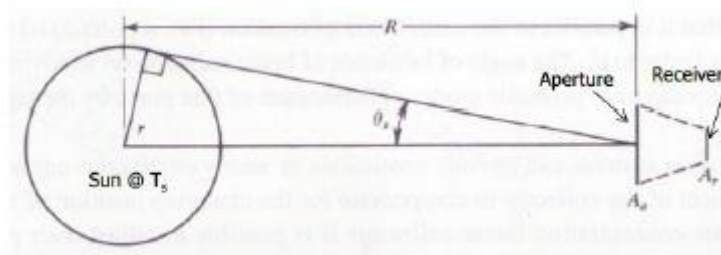


Figure II .11 : schéma de rapport de concentration.

- Rapport de concentration de surface (géométrique) : Surface de l'ouverture du collecteur A_a divisée par la surface du récepteur A_r [14] .

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (\text{équation II. 25})$$

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

- Rapport de concentration optique est irradiation moyenne (flux radiant) I_r intégrée sur la zone réceptrice A_r , divisée par l'incident d'insolation sur l'ouverture du collecteur[14].

$$C_0 = \frac{\frac{1}{A_r} \int I_r \cdot d \cdot A_r}{I_a} \quad (\text{équation II. 26})$$

I_r : irradiation moyenne.

I_a : est l'insolation incidente sur l'ouverture du collecteur.

II.5.5 Concentrateur parabolique :

Un collecteur parabolique est similaire en apparence à une grande antenne parabolique, mais a des réflecteurs en miroir et un absorbeur au point focal. Il utilise un traceur solaire double axe [15].

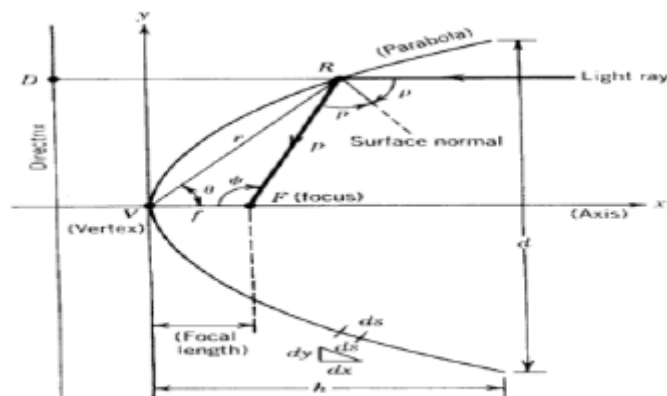


Figure II.12 : La parabole.

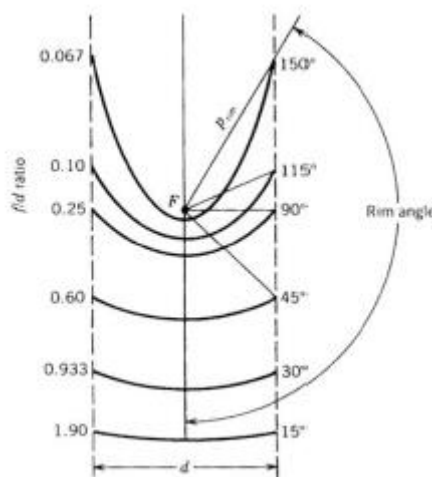


Figure II.13 : Segments d'une parabole ayant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture.

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

Si le faisceau incident de rayons parallèles est même légèrement hors de la normale à l'ouverture du miroir, la dispersion du faisceau se produit, ce qui entraîne la diffusion de l'image au point focal. Pour que les rayons réfléchis d'un miroir parabolique se focalise, il doit suivre avec précision le mouvement du soleil pour garder l'axe (ou le plan) de symétrie parallèle aux rayons incidents du soleil.

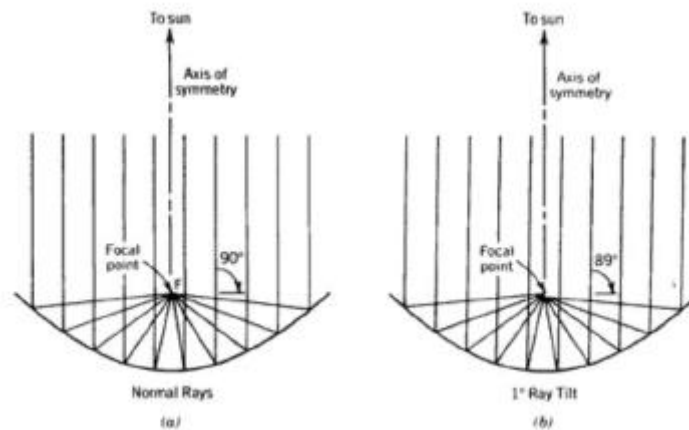


Figure II.14 : Démonstration de la dispersion du faisceau.

Le prototype que nous avons utilisé est une parabole offset de type (plat RCA de 18"). Ce concentrateur parabolique décalé, parfois appelé collecteur Scheffler, est une structure en forme de plat en trois dimensions dans laquelle le point de mise au point est situé à l'extérieur de la zone de collecteur.

Une antenne parabolique d'alimentation décalée a un réflecteur qui est une section d'un réflecteur parabolique normal. Si la section ne comprend pas le centre de l'antenne, aucun faisceau rayonné n'est bloqué par l'antenne d'alimentation et la structure de support [16].

Sinon, seul un petit morceau au bord de la poutre est bloqué. Pour les petites paraboles, le blocage entraîne une perte importante d'efficacité. On peut donc s'attendre à ce qu'un plat d'alimentation décalé (offset) ait un rendement plus élevé qu'un plat conventionnel de même ouverture [16].

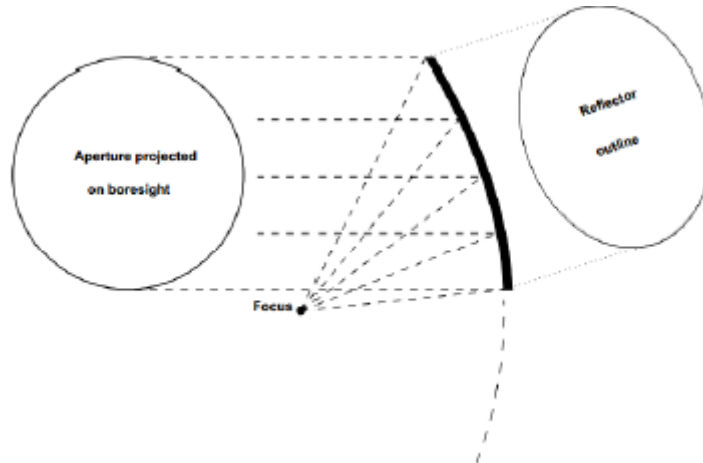


Figure II.15 : Géométrie de l'antenne parabolique (décalée) offset.

II.6 Analyse des Performances :

II.6.1 Efficacité thermique du système parabole offset :

Nous formulons le modèle analytique suivant pour évaluer la performance thermique et électrique du module dans différentes conditions expérimentales. La figure (II.17) présente un schéma du collecteur parabolique avec seulement la plaque réceptrice en aluminium assemblée au foyer de la parabole. Le rayonnement incident entrant sur la plaque du récepteur est :

$$Q_r = A_c \eta_r I_b \quad (\text{équation II. 27})$$

Où A_c est la surface de la parabole offset et η_r est la réflectivité du matériau, qui dépend du type de matériau réfléchissant utilisé.

I_b est le rayonnement solaire incident par unité de surface (I) qui peut converger avec succès par le collecteur comme un faisceau sur la plaque de réception.

$$I_b = I - I_d \quad (\text{équation II. 28})$$

Où I_d est le composant diffus du rayonnement qui n'est pas utilisé par le concentrateur. La fraction de la lumière solaire incidente dirigée vers le faisceau dépend principalement des conditions atmosphériques, qui sont normalement supérieures à 90% pour ciel clair. Il convient de noter que la fraction de l'incident I_b sur la plaque de réception dépend également de la précision du système de suivi. I_b peut être mesuré

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

en utilisant un pyranomètre. La valeur standard de I_b à midi pour un ciel claire est de 1000 W/m^2 , comme illustre la figure(II.17).

Le bilan énergétique du système peut être exprimé comme suit :

$$Q_r = Q_L \quad (\text{équation II. 29})$$

Où Q_r est le rayonnement solaire incident sur le récepteur (la plaque de aluminium) et Q_L indique les pertes de chaleur de la plaque réceptrice vers l'environnement.

En d'autres termes, le rayonnement total qui peut être absorbé par le récepteur doit être égal aux pertes de chaleurs globales par convection naturelle et par perte radiative. Par conséquent, l'équation peut aussi être présentée comme suit :

$$A_c \eta_r I_b = Q_{lc} + Q_{lr} \quad (\text{équation II. 30})$$

Où Q_{lc} est la perte totale de chaleur par convection naturelle, qui peut être obtenue par :

$$Q_{lc} = 2A_r h_a (T_r - T_a) \quad (\text{équation II. 31})$$

T_r est la température du récepteur.

A_r est la surface de récepteur.

h_a est le coefficient de transfert de chaleur convectif = $5.7 + 3.8V$, où v est la vitesse du vent en m/s .

T_a est la température ambiante.

De plus Q_{lr} est la perte totale de chaleur radiative de la plaque réceptrice, qui peut être obtenue par :

$$Q_{lr} = 2A_r \varepsilon \sigma (T_r^4 - T_a^4) \quad (\text{équation II. 32})$$

Avec, ε est l'émissivité de la plaque réceptrice (0.8) et σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5.679108 \text{ W/m}^2/\text{K}^\circ$).

Dans la pratique, il est difficile d'obtenir l'équilibre exact dans l'équation II.29 en raison d'erreurs expérimentales non prises en compte dans l'analyse. Par conséquent, l'efficacité globale, η_0 , est

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

introduite comme un paramètre d'évaluation pour déterminer la capacité et l'efficacité du parabole , étant obtenu par :

$$\eta_0 = \frac{Q_{lc} + Q_{lr}}{Q_{in}} \quad (\text{équation II.33})$$

Où Q_{in} est le rayonnement total qui tombe sur le capteur solaire :

$$Q_{in} = A_c \cdot I_b \quad (\text{équation II.34})$$

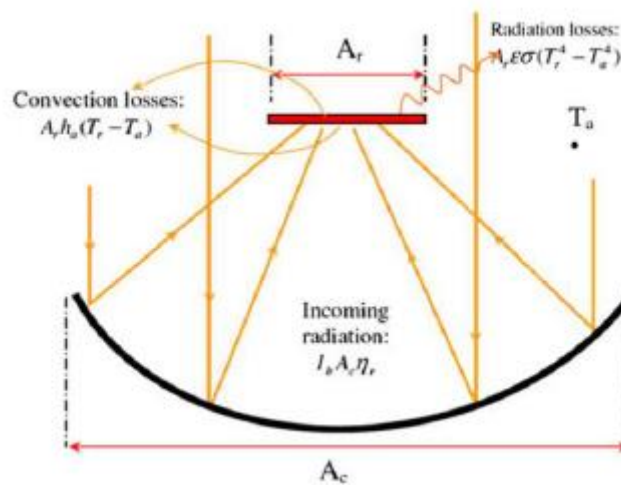


Figure II.16 : Schéma du flux de chaleur dans le système.

II.6.2 Efficacité thermique du système de transfert de chaleur :

La figure II.18 montre un schéma du système de la parabole avec un module de refroidissement fixé à la surface du récepteur. Le rayonnement solaire est concentré sur la plaque réceptrice de la parabole, générant de la chaleur qui est finalement dissipée par le dissipateur thermique. L'équation du bilan énergétique est la suivante :

$$A_c \eta_r I_b = Q_{lc} + Q_{lr} + Q_w \quad (\text{équation II.35})$$

Où Q_w la chaleur totale dissipée par le dissipateur thermique.

En outre, la convection naturelle ainsi que les pertes radiatives de la zone de refroidissement devraient également être prise en compte dans le calcul des pertes de chaleur globales. Par conséquent, les eq(31) et (32) deviennent dans ce cas :

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

$$Q_{lc} = h_a A_w (\bar{T} - T_a) + h_a A_c (T_r - T_a) \quad (\text{équation II.36})$$

$$Q_{Lr} = A_w \varepsilon \sigma (\bar{T}^4 - T_a^4) + A_c \varepsilon \sigma (T_r^4 - T_a^4) \quad (\text{équation II.37})$$

Où \bar{T} est la température moyenne du dissipateur thermique, étant la température de surface de la pièce de refroidissement, A_w est la surface de refroidissement totale.

L'efficacité du transfert de chaleur peut être évaluée comme suit :

$$\eta_h = \frac{Q_w}{Q_{in}} \quad (\text{équation II.38})$$

En outre, l'efficacité globale dans ce cas est donnée par :

$$\eta_0 = \frac{Q_{lc} + Q_{lr} + Q_w}{Q_{in}} \quad (\text{équation II.39})$$

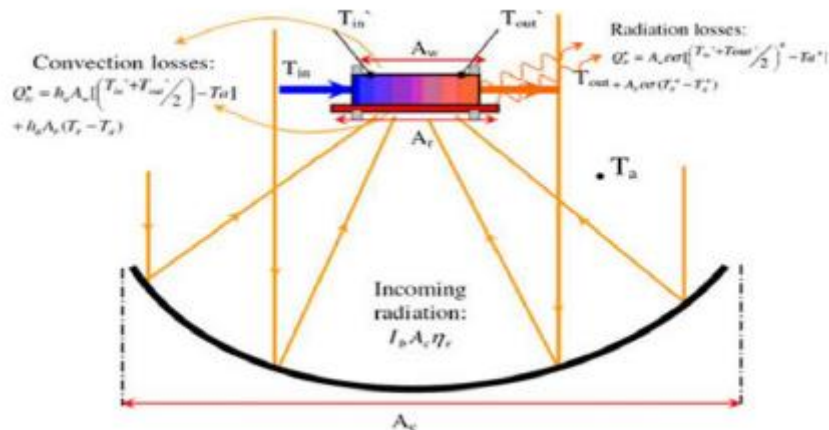


Figure II.17 : Schéma de la parabole avec le système de dissipation de chaleur.

II.6.3 Efficacité globale du système CTEG :

La figure II.19 illustre le flux d'énergie à travers le module TEG, qui peut être exprimé par le bilan énergétique comme suit :

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

$$Q_r = Q_d + Q_l + E_0 \quad (\text{équation II.40})$$

Où Q_d est la chaleur non utilisée dissipée du côté froid du module TEG par le système de refroidissement, qui peut être considérée égale à Q_w en raison de la faible efficacité des cellules thermoélectriques, et E_0 est l'énergie électrique utile produite par le module TEG.

Réarrangement d'équation II.40 donne :

$$Q_r - Q_l = Q_d - E_0 \quad (\text{équation II.41})$$

Où le terme $Q_r - Q_l$ représente la chaleur réelle qui s'écoule dans la face chaude du module TEG. La puissance de sortie électrique du générateur thermoélectrique peut être exprimée en termes d'efficacité du générateur comme :

$$E = \eta_{teg}(Q_r - Q_l) \quad (\text{équation II.42})$$

$$\eta_{teg} = \frac{E_0}{Q_r - Q_l} \quad (\text{équation II.43})$$

Avec, η_{teg} est l'efficacité de conversion le thermique en électrique du module TEG, tel que fourni par le module en fonction de la différence de température entre les côtés chaud et froid du générateur.

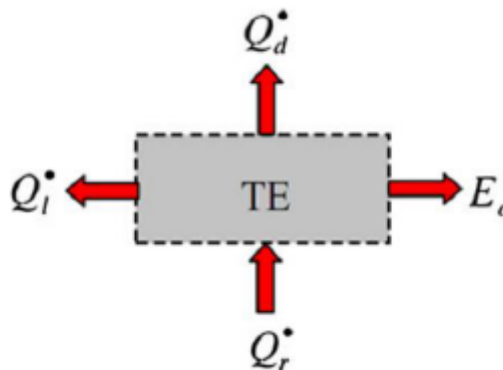


Figure II.18 : Bilan énergétique du générateur thermoélectrique.

La figure II.20 montre les détails du flux d'énergie à travers le module TEG sous concentration solaire. La chaleur résiduelle dissipée du côté froid des cellules thermoélectrique par le système de

CHAPITRE II : GISEMENT ET CONCENTRATION SOLAIRE

refroidissement dépend de la résistance thermique globale de la plaque réceptrice et l'efficacité du dissipateur thermique.

La résistance thermique totale comprend essentiellement la résistance conductrice à travers la plaque réceptrice, la base du dissipateur thermique, les cellules thermoélectriques et la résistance de convection du dissipateur thermique en raison de la conductivité thermique élevée du matériau en aluminium utilisé dans le récepteur et le dissipateur thermique, et du coefficient de transfert thermique élevé du dissipateur thermique. Les résistances thermiques associées sont très faible.

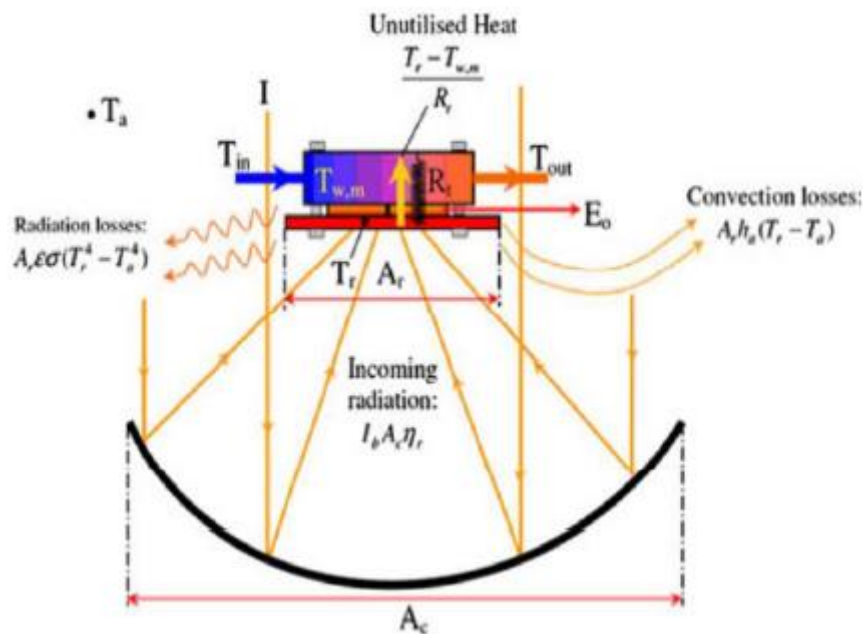


Figure II .19 : Flux d'énergie dans le module TEG.

CHAPITRE III :

**DESCRIPTION ET EXPERIMENTATION DU THERMOGENERATEUR
SOLAIRE.**

III.1 Conception du projet :

III.1.1 Le concentrateur solaire parabolique :

Pour une meilleure exploitation des rayons solaire et un maximum d'efficacité dans ce transfert, on utilise une parabole du type offset avec une superficie du 1.225 m². L'assiette est couverte par des miroirs avec coefficient de la réflexion très important avoisinant les 99%.

Ce pourcentage très élevé de la réflexion est une solution pour l'augmentation de la température au niveau du foyer qui dépasse 200 C° dans les bonnes conditions.



Figure (III.1) : le concentrateur solaire.

III.1.2 Le thermo générateur :

Il s'agit d'un convertisseur de l'énergie thermique en énergie électrique utilisant un agencement de semi-conducteur de Bi₂Te₃. Notre choix s'est porté sur un module du commerce de type TEC1-12715 pour ses bonnes caractéristiques à la fois thermiques et mécaniques. Sa résistance face aux chocs thermiques le rend un excellent candidat pour notre application.



Figure (III.2) : un module Peltier modèle TEC1-12715

Tableau (III.1) : la fiche technique du module Peltier modèle TEC1-12715.

No.	Items	Symbol	Parameter	Condition
1	Max. Operating Tem.	T	< 90°C	
2	Max. Cooling Power	Q _{max}	136	Vacuum testing Tem Th=30°C
3	Tem. Difference Max	ΔT _{max}	70	Vacuum testing Tem Th=30°C
4	Input Voltage Max	V _{max}	15.4	Vacuum testing Tem Th=30°C
5	Max. Current	I _{max}	15.0	Vacuum testing Tem Th=30°C
6	Resistance	R	0.75±0.05	Ambient Tem Th=25°C
7	Parallel		≤0.05 mm	
8	Lines		20AWG	

III.1.3 Le système de la production :

III.1.3.1 Coté chaud :

Un module thermo électrique nécessite une différence de température pour la production d'électricité. C'est ainsi que l'un des deux coté reçoit le flux concentré de la parabole. Pour uniformiser le flux incident et donc la température on adjoint une plaque en aluminium. Entre la plaque et le module on utilise une pate thermique de conductivité égale à 1.93 W /m K (figure III.3).



Figure (III.3) : la plaque réceptrice du système (le coté chaud).

III.1.3.2 Coté froid :

Du coté froid, nous avons utilisé une dissipation de la chaleur pour améliorer les performances du système. Le dissipateur se compose d'un refroidisseur à ailettes et un ventilateur pour évacuer l'excès de chaleur et permettre au module de travailler dans des conditions optimales (figure III.4 et III.5).

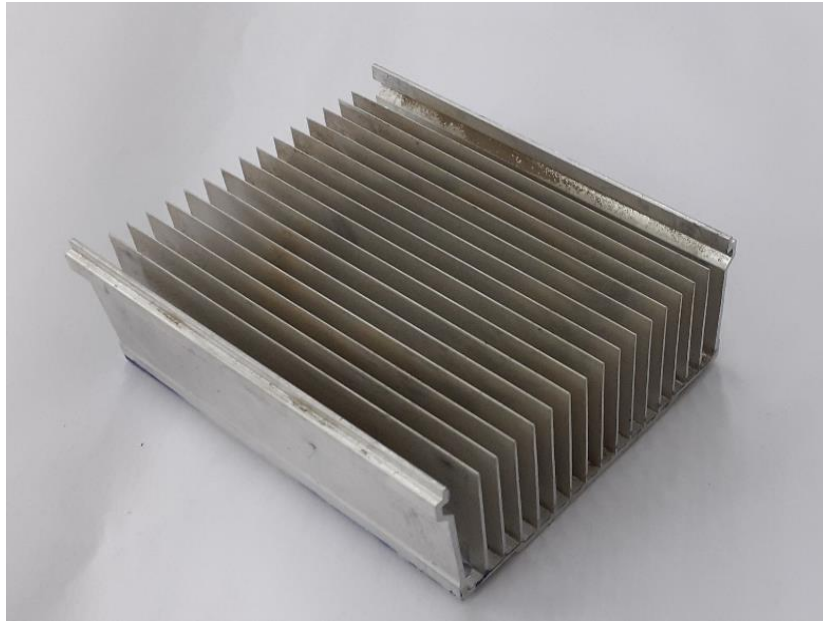


Figure (III.4) : l'ailette de refroidissement.

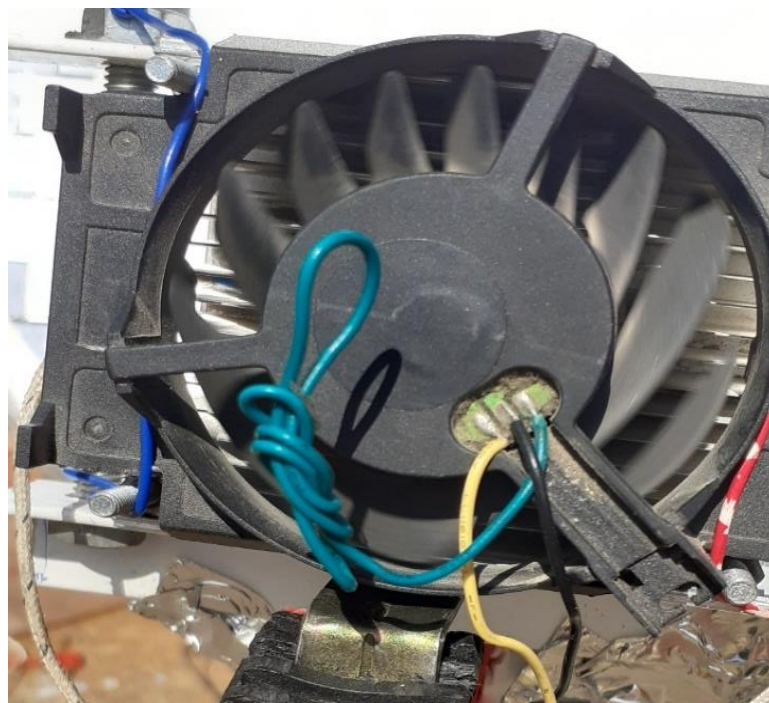


Figure (III .5) : le ventilateur du système de dissipation.

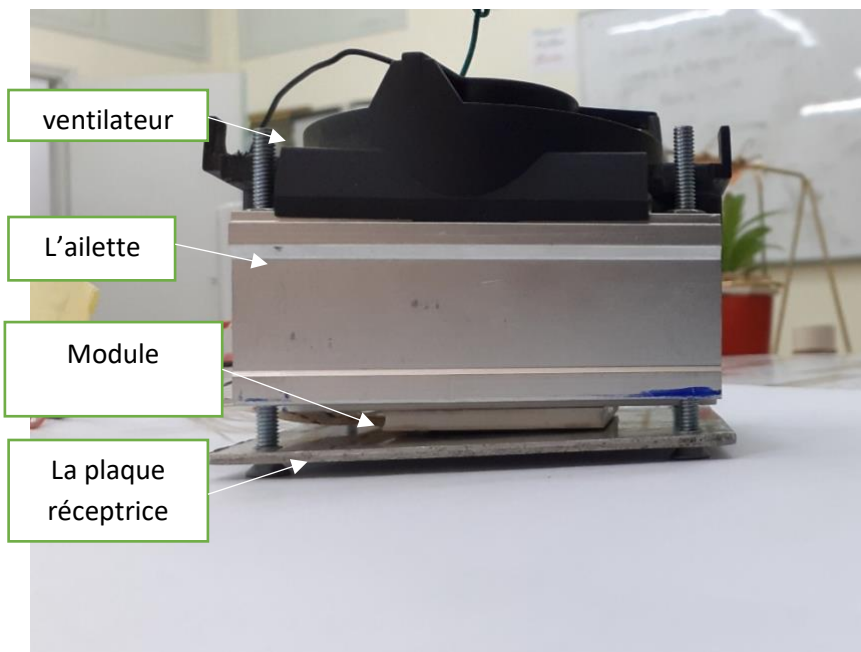


Figure (III.6) : le système de production.

L'alimentation du ventilateur se fait a l'aide d'une batterie de 12v et 1,2 Ah chargée par un panneau photovoltaïque (figure III.7).



Figure (III.7) : la batterie du dissipateur de chaleur.

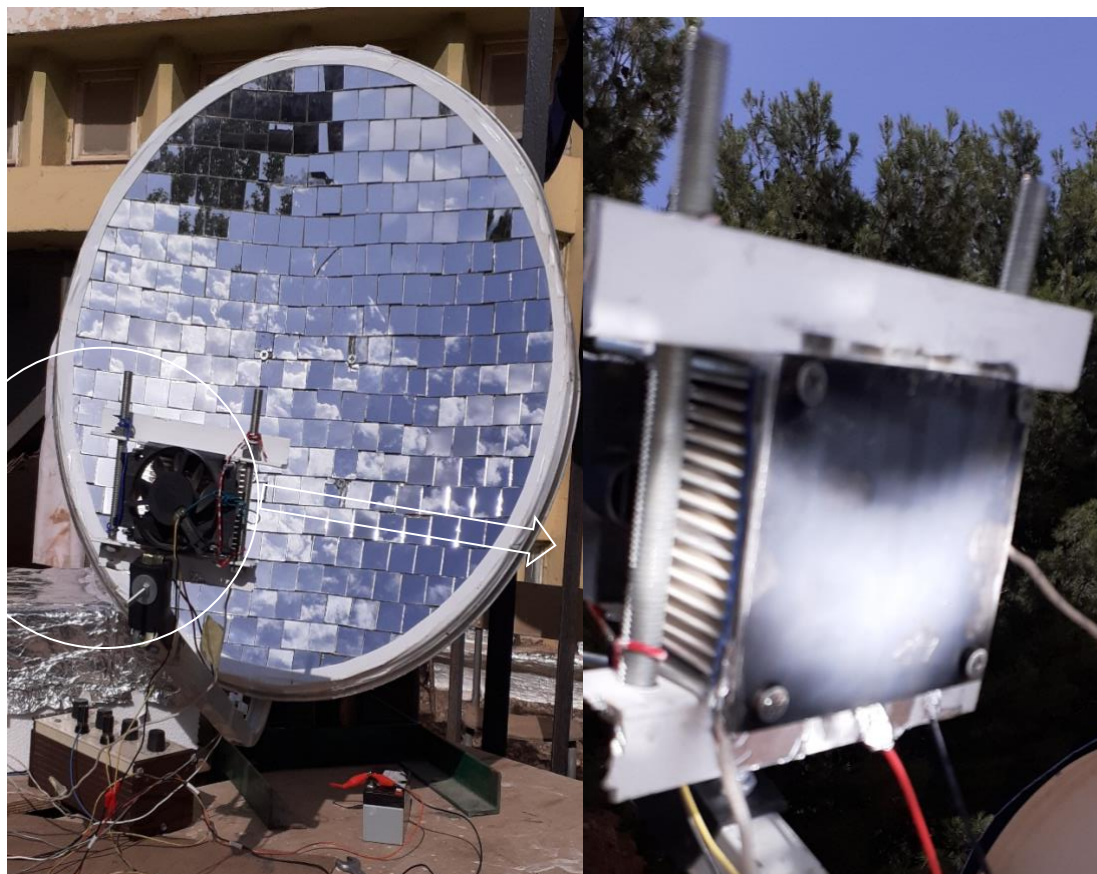


Figure (III.8) : le concentrateur et le système de production durant le fonctionnement.

III.2 Les instruments de mesure :

La spécificité de ce projet fait appel à plusieurs formes d'énergie (thermique, électrique et lumineuse). La quantification des paramètres mis en jeu oblige l'utilisation d'instruments de mesure tant précis que variés. C'est ainsi des appareils météorologiques sont utilisés pour la mesure du rayonnement, de la température et du vent. Un appareillage électrique est utilisé pour la mesure des tensions, intensités et résistances. A cause de la fréquence de la mesure, on utilise un système d'acquisition de donnée automatique et autonome. Nous passerons dans ce qui suit, l'essentiel de l'instrumentation utilisé.

Les instruments utilisé pour les mesures sont disponibles dans l'atelier du club HELIOS qui dispose aussi d'une plate- forme d'expérimentation.

III.2.1 Acquisition de données (data logger) :

Un enregistreur de données est un dispositif automatique, voir programmable, qui enregistre des valeurs de mesure individuelles et des séries de mesure sur une longue période (pouvant couvrir plusieurs mois). Les grandeurs sont automatiquement mesurées, souvent numérisées et enregistrées sur un support. Elles

CHAPITRE III : DESCRIPTION ET EXPERIMENTATION DU THERMOGENERATEUR SOLAIRE.

peuvent être transmises par le biais d'une interface à un afficheur, à un PC muni d'un logiciel (pour visualisation et analyse), une imprimante, ou à un téléphone intelligent.

Les grandeurs mesurées sont par exemple : température, humidité relative (% HR), intensité, tension, vitesse du vent, pression, intensité lumineuse et sonore.

Les plus courants sont de petite taille, alimentés par pile ou batterie et contrôlent typiquement la température de l'air, parfois en simultanément l'humidité relative. Ils peuvent être raccordés à des sondes (capteurs) externes (sonde d'immersion, sonde alimentaire de pénétration pour congelés, pour haute température, etc.) et disposer de plusieurs canaux (un canal de mesure par sonde connectée). Certains sont autonomes, car équipés d'un affichage et d'un mini clavier. La capacité de mémoire interne (par exemple de type flash) doit être suffisante pour stocker dans certains cas des milliers de données. Dans le cas contraire, il peut être nécessaire, lors de la programmation préalable du microprocesseur, de diminuer la cadence à laquelle la mesure doit être réalisée. Cette cadence peut par exemple varier d'une seconde à plusieurs heures.



Figure (III.9) : data acquisition FLUKE HYDRA SERIES II

L'acquisition de données fait toutes les mesures nécessaires pour cette expérience juste à travers la boîte de connexion qui relie le système avec l'appareil (figure III.9, III.10 et III.11).

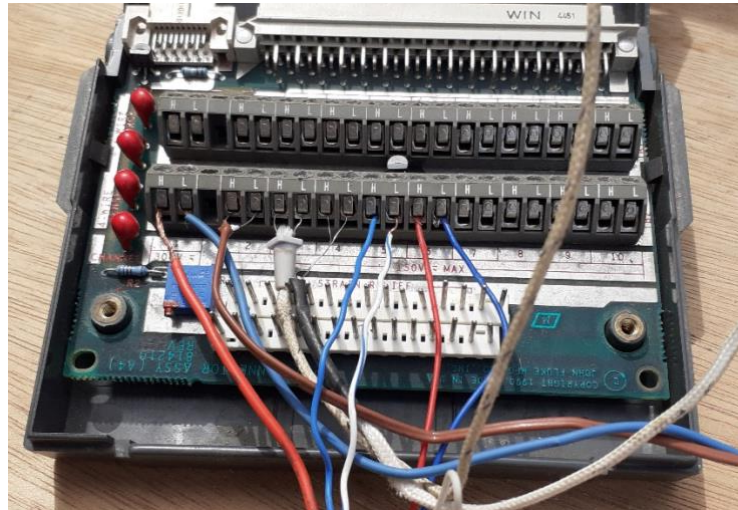


Figure (III.10) : boite de connexion des fils.

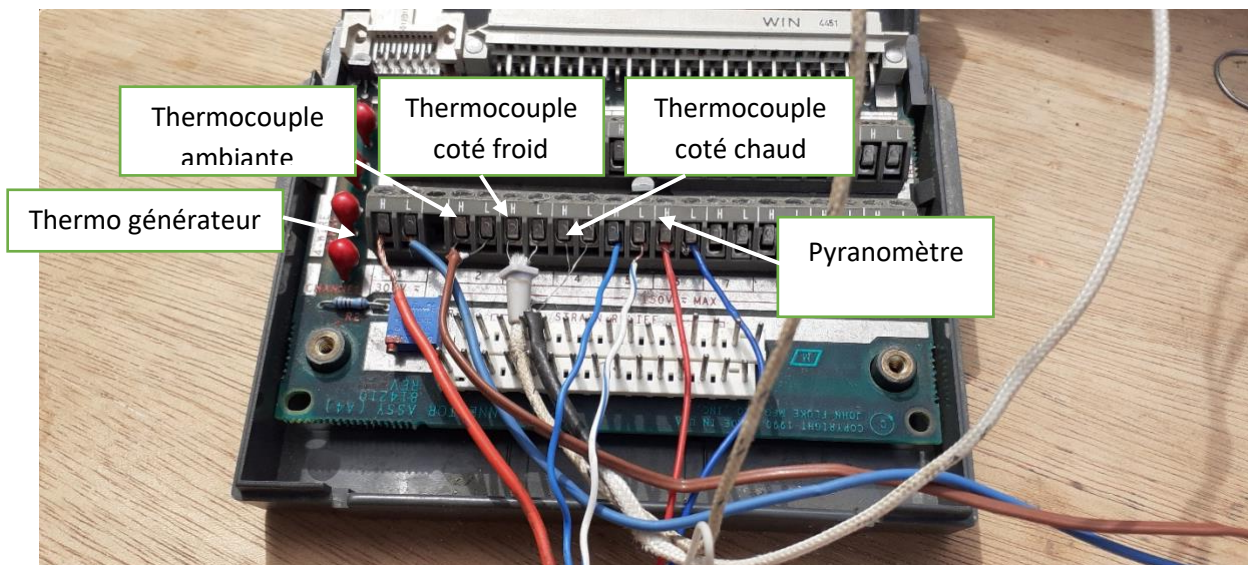


Figure (III.11) : la répartition des fils du système dans les canaux de la boite de connexion

III.2.2 Thermocouple :

Un thermocouple, ou couple thermoélectrique (CTE), est en physique, un couple de matériaux fonctionnant selon l'effet Seebeck, utilisé pour la mesure de la température. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures.

CHAPITRE III : DESCRIPTION ET EXPERIMENTATION DU THERMOGENERATEUR SOLAIRE.

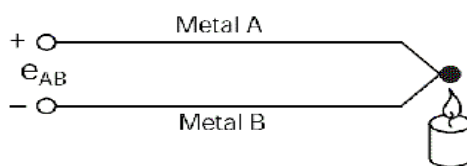


Figure (III.12) : schéma simple explique le principe d'un thermocouple.

Le principe de mesure est lorsque deux métaux sont utilisés pour former une boucle ouverte (pas de courant circulant dans les fils), un potentiel électrique peut être généré entre les deux bornes non reliées de la boucle s'il existe un gradient de température dans la boucle. Les résultats seront transmis à travers une acquisition de données ou à un voltmètre (figure III.12, tableau III.2).

Tableau (III.2) : les types des thermocouples.

Type (Couleur)	Métal A (+)	Métal B (-)	Plages utilisation	Limites théorique	Coef. Seebeck α ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) à T°	Erreur standard	Erreur Mini
B	Platine 30% Rhodium	Platine 6% Rhodium	+600 à +1700	0 à 1820°C	5,96 μV à 600°C	0,5%	0,25%
E	Nickel 10% Chrome	Constantan	-40 à +900	270 à 1000°C	58,67 μV à 0°C	1,7% à 0,5%	1% à 0,4%
J	Fer	Constantan	-40 à +750	210 à 1200°C	50,38 μV à 0°C	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,4%
K	Chromel	Alumel	-40 à +1200	270 à 1372°C	39,45 μV à 0°C	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,2%
N	Nicrosil	Nisil	-40 à +1200	270 à 1300°C	25,93 μV à 0°C	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,4%
R	Platine 13% Rhodium	Platine	0 à +1600	-50 à 1768°C	11,36 μV à 600°C	1,5% à 0,25%	0,6% à 0,1%
S	Platine 10% Rhodium	Platine	0 à +1600	-50 à 1768°C	10,21 μV à 600°C	1,5% à 0,25%	0,6% à 0,1%
T	Cuivre	Constantan	-40 à +350	-270 à 400°C	38,75 μV à 0°C	1% à 0,75%	0,5% à 0,4%

On utilise pour notre projet des thermocouples de type K.

III.2.3 Multimètre :

Pour les petites mesures et les vérifications des câbles et même système on utilise un multimètre modèle M890+ (figure III.13) dont les caractéristiques sont reportées dans le tableau III.3.



Figure (III.13) : Multimètre modèle M890+.

CHAPITRE III : DESCRIPTION ET EXPERIMENTATION DU THERMOGENERATEUR SOLAIRE.

Tableau (III.3) : les caractéristiques du multimètre modèle M890+.

Tension cc	200m-2-20-200-1000V \pm 0.5%
Tension ca	2-20-200-700V \pm 1.0%
Courant continu	2m-20m-200m-20A \pm 1.0%
Courant alternatif	200m-20A \pm 1.5%
Résistance	200-2K-20K-200K-2M-20M-200M Ω \pm 2.0%
Capacité	2000p-20n-200n-2u-20uF \pm 4.0%
Température	-20 ~ 1000 \pm 3.0%
Transistor	Oui
Sur mesure	Oui
Alimentation	Batterie 9V
3 1/2 chiffres LCD, valeur d'affichage maximum 1999	
Taille	176x88x38mm
Poids du produit	Environ 320g

III.2.4 Pyranomètre :

La variation des températures est reliée directement avec le rayonnement solaire et comme le concentrateur doit être orienté tout le temps vers le soleil donc la variation du rayonnement solaire sera importante pour notre expérience. Le pyranomètre est l'instrument qui mesure l'éclairement global.

Pour cela on a utilisé deux pyranomètres de la marque KIPP&ZONEN CM6B (figure III.14 et tableau III.4), a fin de mesurer l'éclairement globale et un pour la mesure du diffus. La valeur de l'éclairement normal direct est déduite par différence.



Figure (III.14) : le pyranomètre KIPP&ZONEN CM6B.

Tableau (III.4) : la fiche technique du pyranomètre KIPP&ZONEN CM6B [1].

Spectral range	350-2800nm (50% points)
Sensitivity	Between 9-15 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Impedance	70 -100 Ohm
Response time	< 18 s (95% response)
Non-linearity	$\pm 1.2\%$ (< 1000 W/m^2)
Temperature dependense of sensitivity	$\pm 2\%$ (-10 $^{\circ}\text{C}$ to +40 $^{\circ}\text{C}$)
Directional error	$\pm 20 \text{ W}/\text{m}^2$ (beam 1000 W/m^2)
Till error	$\pm 1\%$ (beam 1000 W/m^2)
Zero off set duo to FIR (Ventilated with CV2)	< 15 W/m^2 at 200 W/m^2 net thermal radiation
Zero off set to temp changes	< 4 W/m^2 at 5 K/h temp. change
Operating temperature	40 $^{\circ}\text{C}$ to+80 $^{\circ}\text{C}$

III.3 Système de suivi :

Comme on l'a dit précédemment, le fonctionnement du thermo générateur repose sur la différence des températures entre les deux faces du module, on ne prend en considération que les rayons solaires qui

CHAPITRE III : DESCRIPTION ET EXPERIMENTATION DU THERMOGENERATEUR SOLAIRE.

viennent directement du soleil. Ce qui nécessite un suivi du soleil pendant tout le temps de fonctionnement pour garantir le chauffage de la plaque absorbante et donc la différence de température reste stable sur toute la durée de l'expérience. Dans notre cas et à défaut de suiveur automatique, nous avons procédé à des pointages manuels fréquents de la parabole face au soleil.



Figure (III.15) : le réglage du concentrateur pendant l'expérience.

III.4 Software :

Pour la facilité des mesures et un meilleur contrôle de déroulement d'expérience l'acquisition de données de type FLUKE HYDRA SERIES II est raccordée directement à un ordinateur qui emmagasine les données mesurées. Ces données sont paramétrées comme suit :

CHAPITRE III : DESCRIPTION ET EXPERIMENTATION DU THERMOGENERATEUR SOLAIRE.

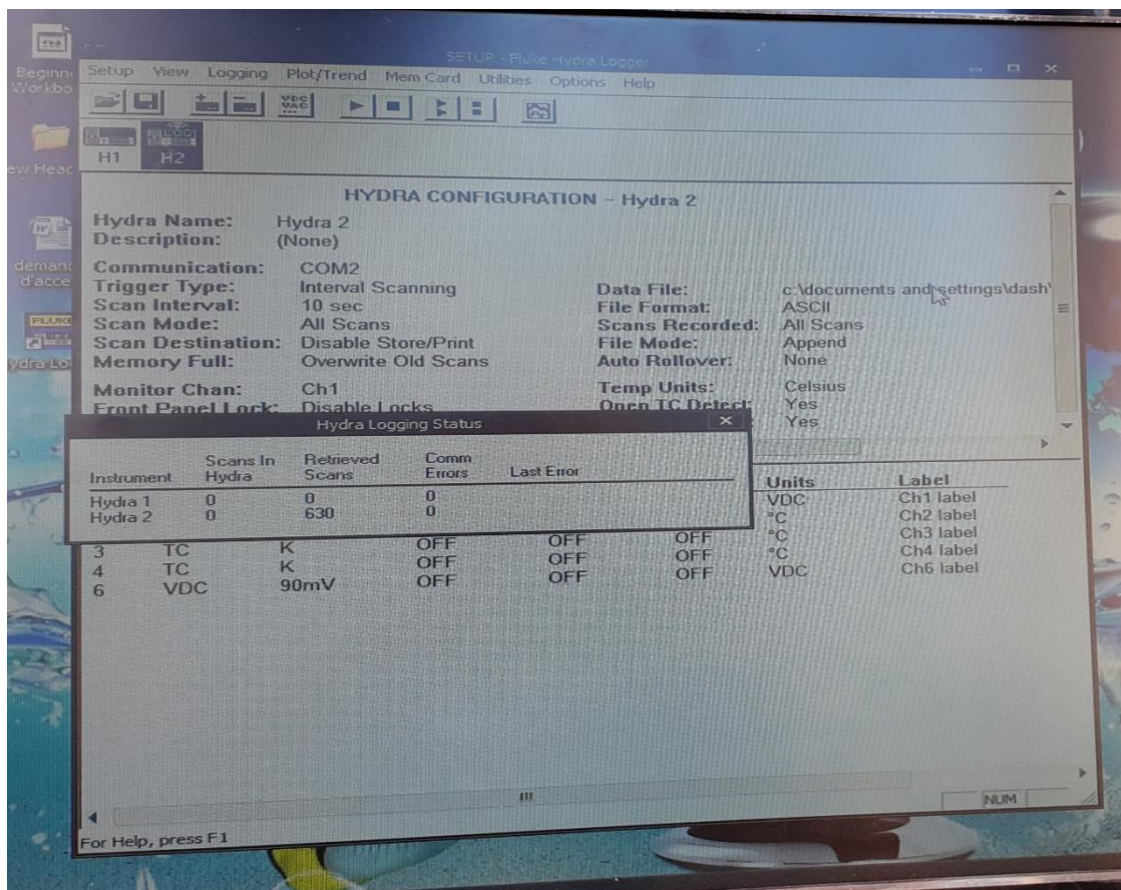


Figure (III.16) : l’affichage des données sur l’ordinateur.

Tableau (III.5) : répartition des paramètres mesurés sur les canaux.

Channel 1	Vdc (TEG)
Channel2	Thermocouple pour l’ambiante
Channel3	Thermocouple pour le coté chauffé du TEG
Channel4	Thermocouple sur la face arrière d’ailette
Channel6	Le pyranomètre

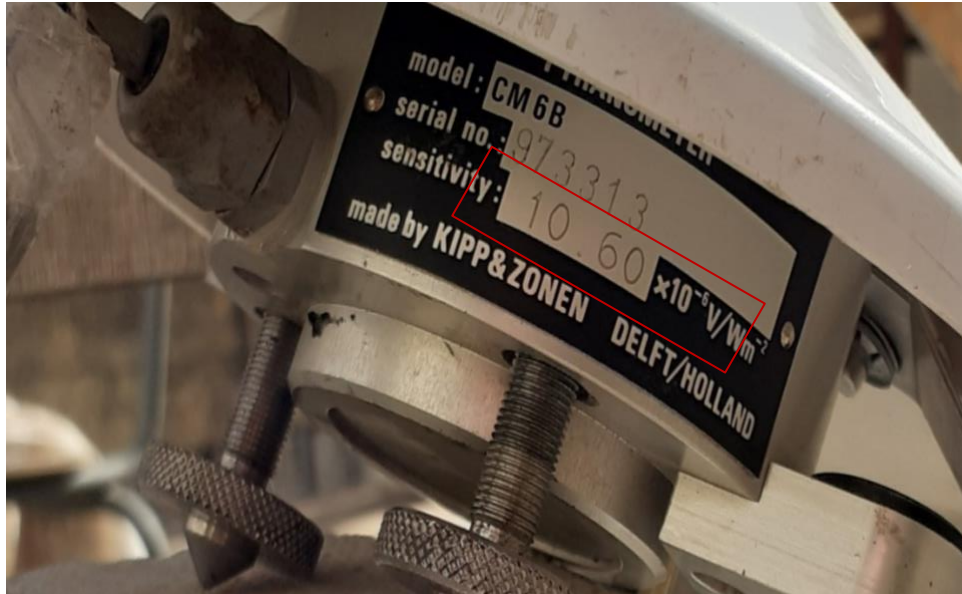


Figure (III.17) : l'échelle de la mesure du pyranomètre.

III.5 Mesures et résultats :



Figure (III.18) : le système TEG pendant le fonctionnement.

CHAPITRE III : DESCRIPTION ET EXPERIMENTATION DU THERMOGENERATEUR SOLAIRE.

Pour la détermination de la tension du circuit ouvert de TEG en fonction des plusieurs paramètres physiques qui influent sur les systèmes de production , on prend comme paramètres nécessaires le V_{co} , I_{cc} , l'éclairement , la température coté chaud du module, la température au niveau d'ailette et la température ambiante .

On a lancé le test à 8 h:17min, l'expérimentation a durée 3 heures dans laquelle l'éclairement a varié entre 700 W/m^2 et 930 W/m^2 et la température était comprise entre $28 \text{ }^\circ\text{C}$ et $49 \text{ }^\circ\text{C}$.

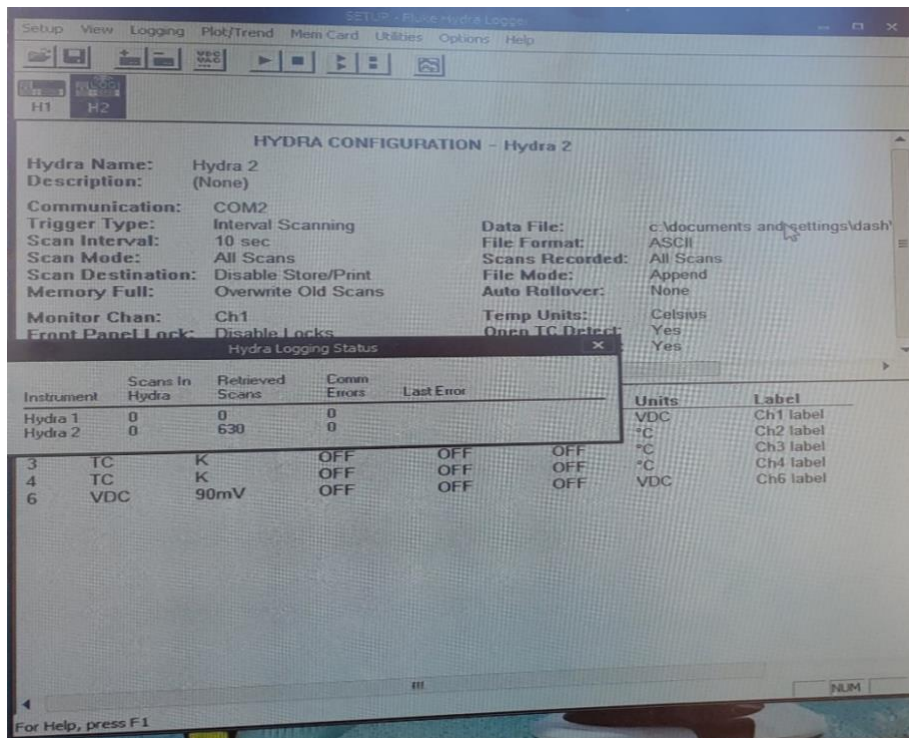
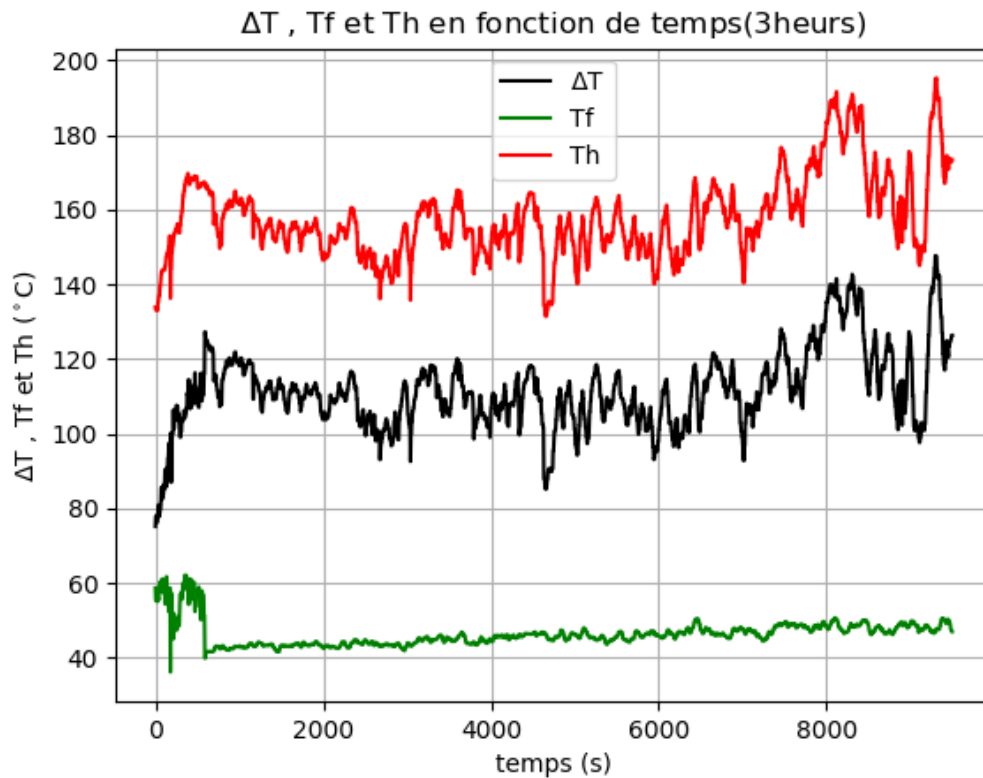


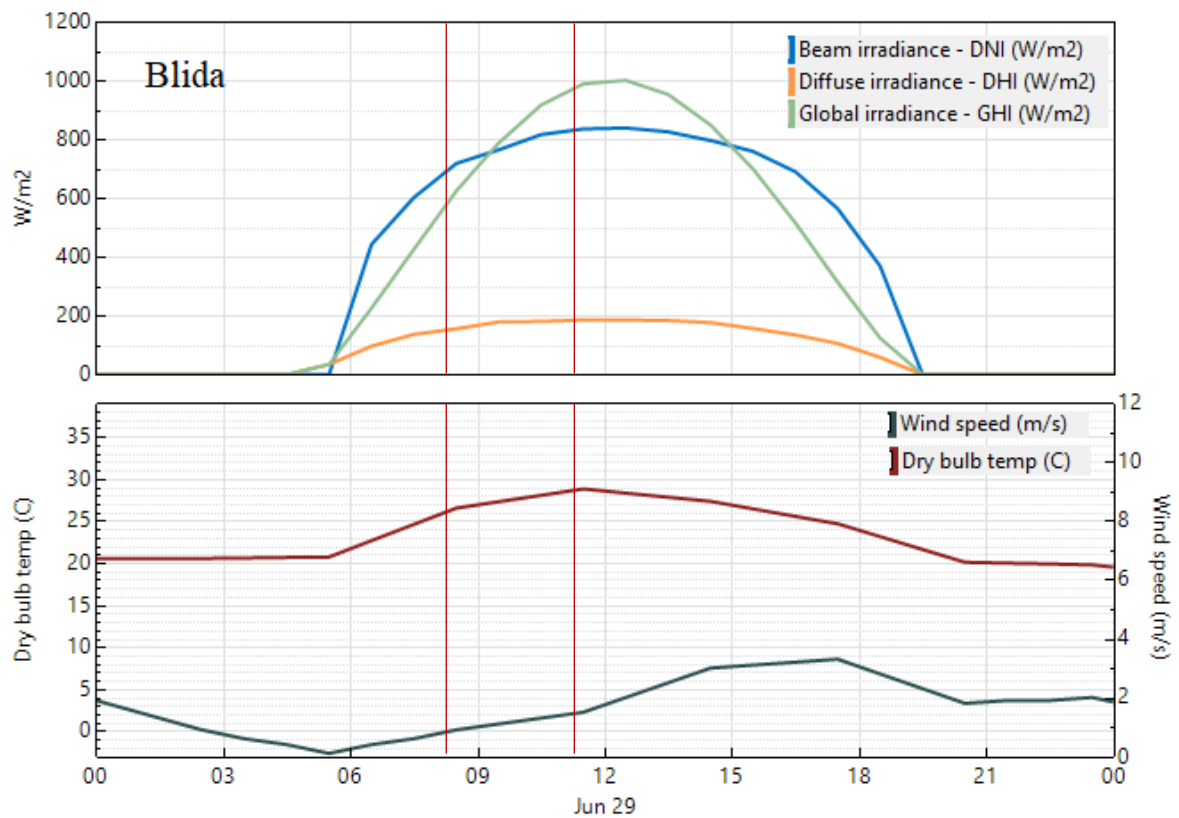
Figure (III.19) : l'affichage au cours de fonctionnement du STEG.

III.5.1 Test du $V_{co}(t)$:



figurer (III.20) : Variation des températures en fonction du temps.

- La figurer (III.20) presente le changement des températures en fonction du temps pendant les 3 heures de fonctionnement .
 - On observe que, sauf une perturbation au début de l'expérimentation, une quasi stabilité de la température 40 °C et 45 °C. Les valeurs du T_h et ΔT sont presque identique, aussi on voit une l'augmentation du T_h par rapport le temps, la temperature maximale du T_h est 195.3 °C .
 - Ces deux courbes ont la même tendance et varie de la même facon car la stabilité du T_f n'influe pas sur eux.



la figure (III.21) : variation des éclaircements en fonction du temps.

La partie haute de la figure (III.21) présente la variation des éclaircements en fonction du temps le jour du test le 29 juin 2021 et la partie sélectionnée est celle où on fait le test (pendant 3 heures). Dans la partie basse, on présente la température ambiante (rouge) et la vitesse du vent (bleu). D'une manière générale, on constate que les valeurs des éclaircements et de la température ambiante sont favorables à la tenue de l'expérimentation, de même que pour la vitesse du vent.

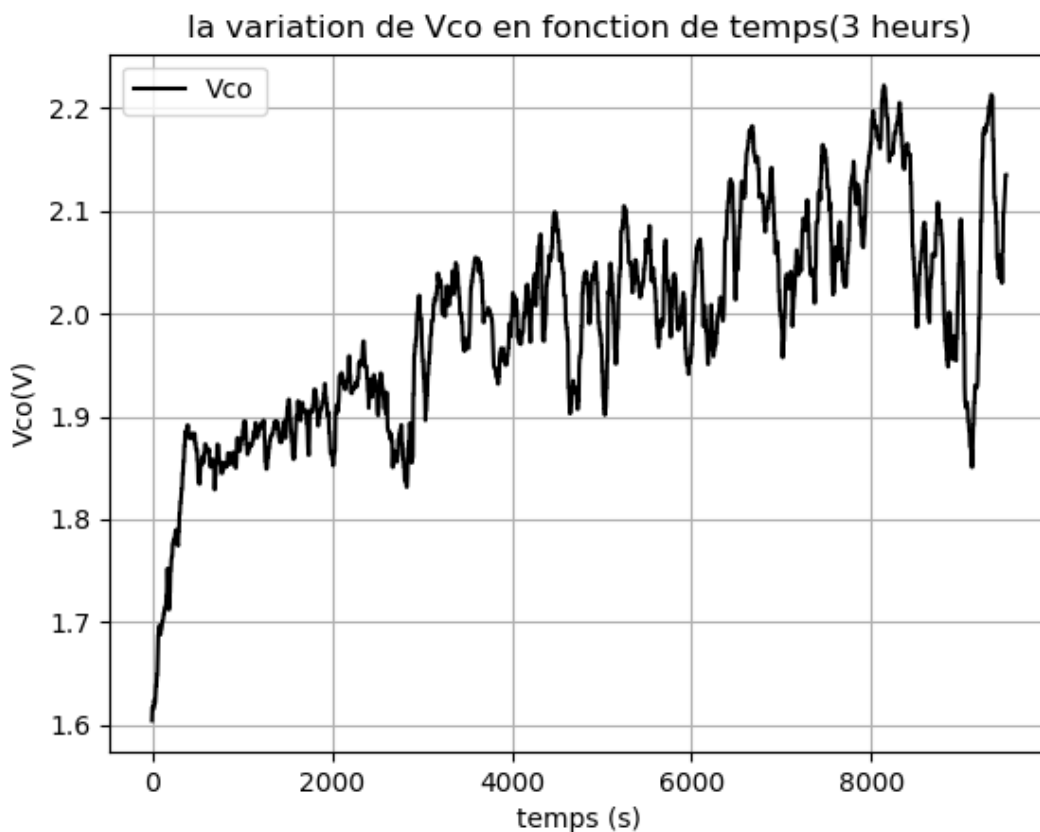


Figure (III.22) : la variation de V_{co} en fonction du temps.

La figure (III.22) correspond à la variation de la tension pendant les 3 heures de fonctionnement. On remarque que la courbe est croissante, ce paramètre suit la même tendance que celle de l'éclairement solaire. La valeur maximale atteinte dans ce test est de 2.22 V, au début du test l'augmentation de V_{co} est très rapide.

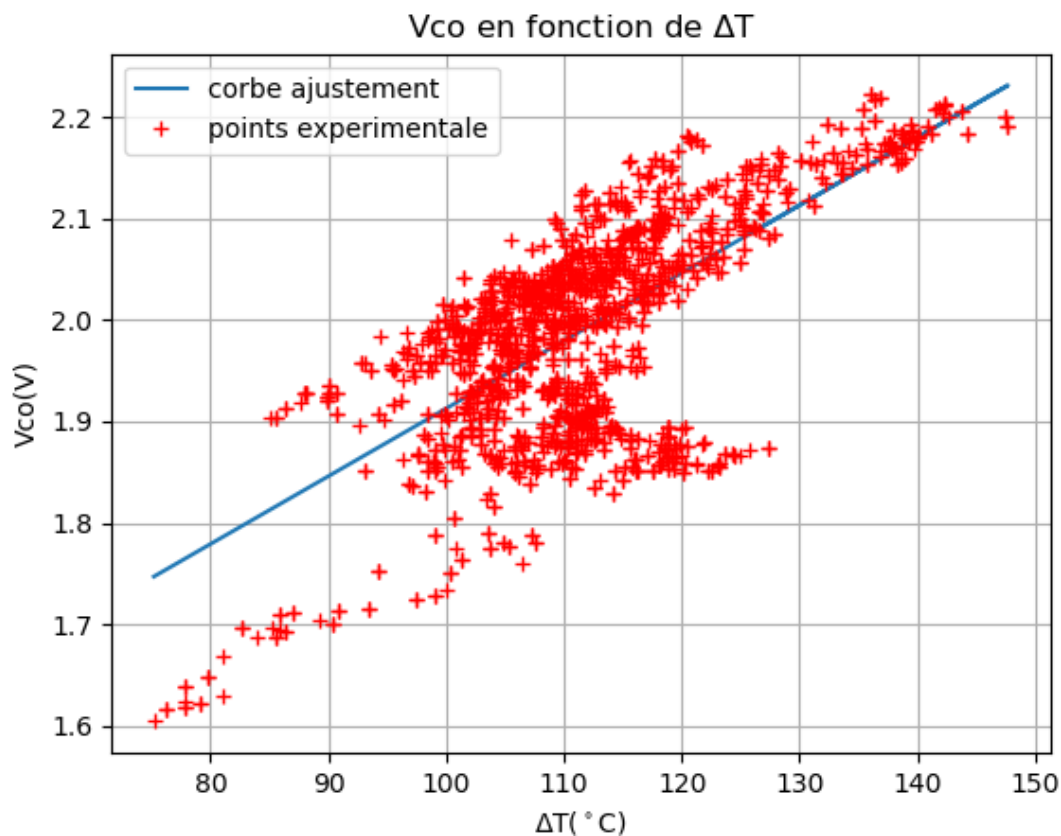


Figure (III.23) : la tension V_{co} en fonction du ΔT .

La figure (III.23) présente la variation de la tension en circuit ouvert en fonction du ΔT . On observe que le nuage des points est concentré entre 95°C et 130°C , la courbe d'ajustement nous donne la relation entre ces deux paramètres. Les valeurs élevées du V_{co} correspondent à des températures très élevées aussi.

III.5.2 Tests de I(V) :

Pour obtenir des résultats significatifs, on a pris deux mesures pour la caractérisation I(V) du TEG dans des différentes conditions variables d'éclaircements et températures ambiantes, voir tableau III.6.

Tableau (III.6) : les conditions des deux test .

	Test1	Test2
La période	Apré-midi	Matin
L'éclairement (la moyenne)	$\approx 765 \text{ W/m}^2$	$\approx 716 \text{ W/m}^2$
Température coté chaud (la moyenne)	124,21831 °C	142 °C
Température coté froid (la moyenne)	45,6 °C	39,07 °C

Puisque que les deux resultats varient presque de la même façon, on prend les résultats du test 1 pour l'étude des caractéristique I(V) du module TEG.

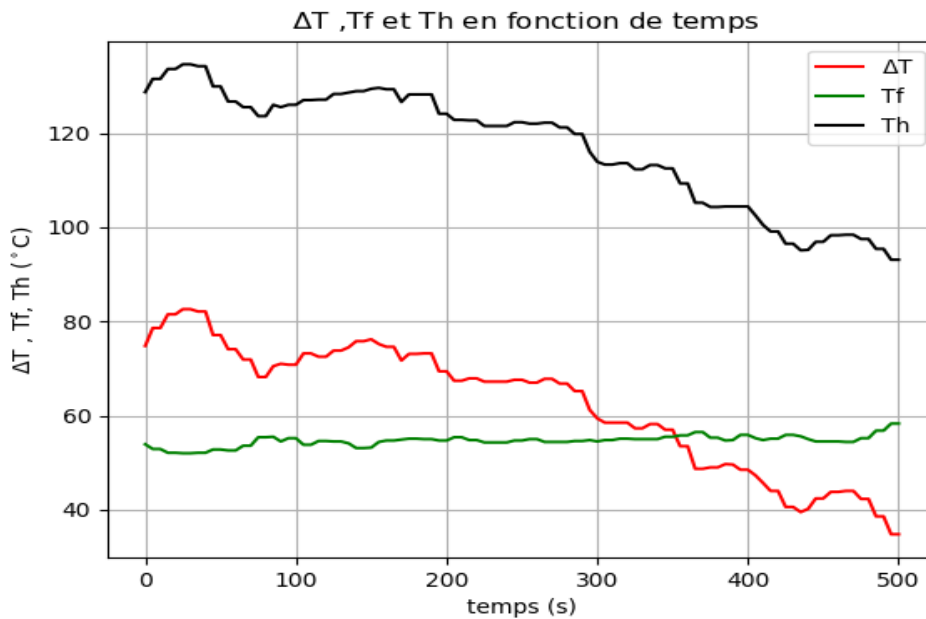


Figure (III.24) : les variations des temperatures chaude (Th) et froide(Tf) et ΔT en fonction du temps.

La figure (III.24) présente la variations des temperatures chaude (Th) et froide(Tf) et la différence Th et Tf en fonction du temps. On voit que Th et ΔT ont la même variation des courbes, et Tf est presque constant . On remarque que les deux courbes Th et ΔT ont la même forme à cause de la stabilité de Tf qui n'a pas une grande influence sur le ΔT .

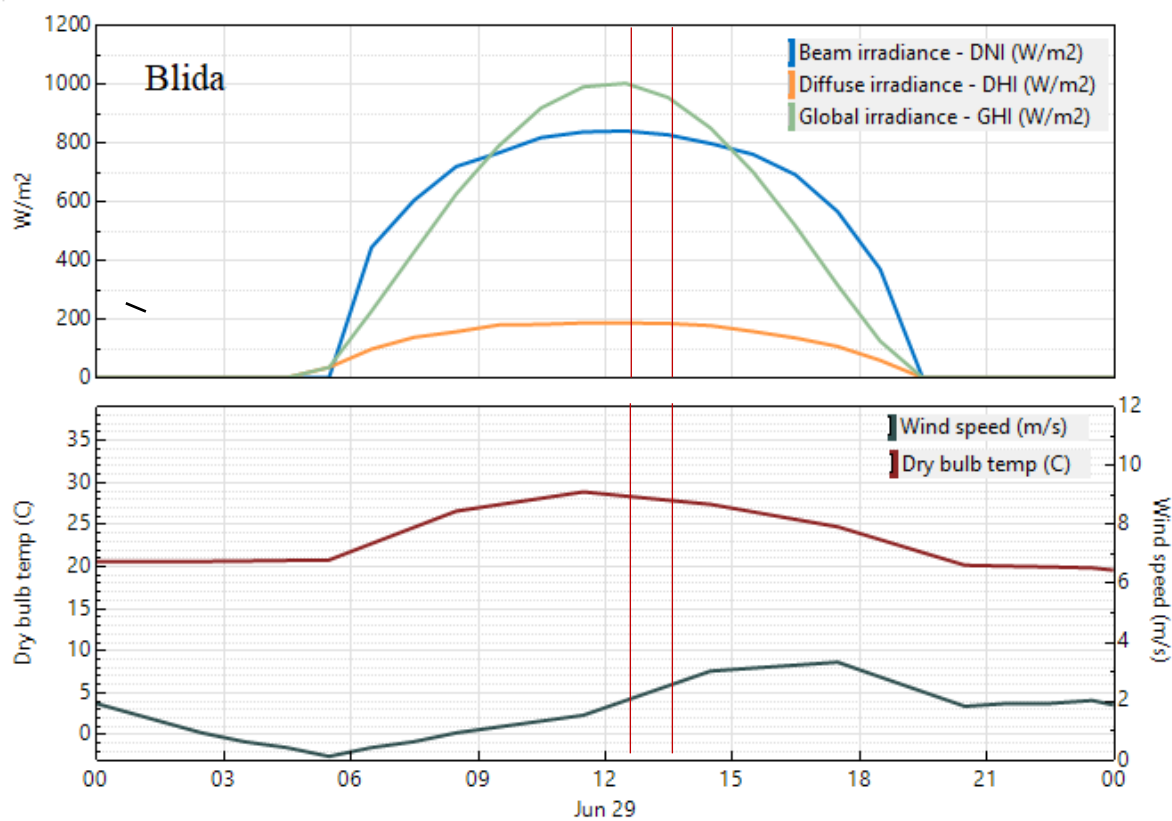


Figure (III.25): la variation des radiation en fonction du temps durant le test.

La figure (III.25) représente la variation des éclaircements en fonction du temps pendant le jour du test. D'une manière générale, on voit que pendant l'expérimentation l'éclaircissement et la température ambiante décroissent légèrement alors que la vitesse du vent augmente.

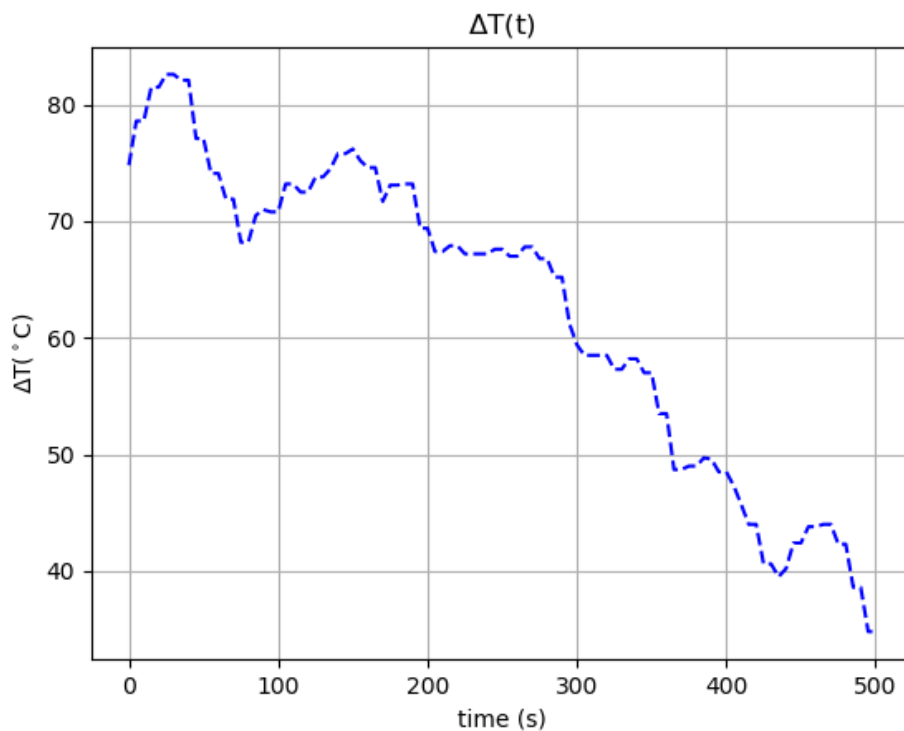


Figure (III.26) : la variation de ΔT au même période.

La figure (III.26) représente la variation de ΔT durant le test .On voit que la courbe de ΔT est descend lentement en fonction du temps. La courbe ΔT suit la même forme que la courbe des éclairnements.

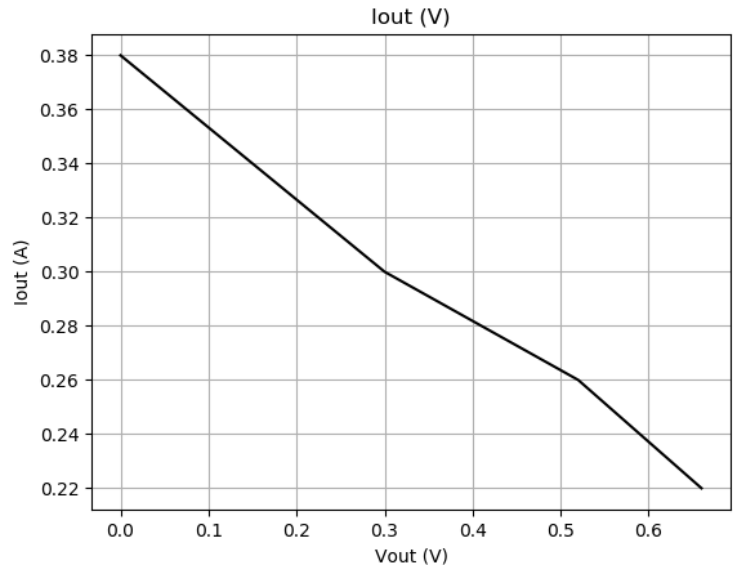


Figure (III.27) : l'intensité du courant en fonction de la tension.

La figure (III.27) montre la variation de l'intensité du courant en fonction de la tension. L'intensité du courant est en relation inverse avec la tension de charge. La mesure des éclairements pendant le test nous aide à suivre le changement des paramètres mesurés par rapport aux éclairements. Les mesures sont réalisées dans des cas réels ce qui explique la présence des peaks sur les variations de ces paramètres. Quand les éclairements sont importants on obtient un gradient de température aussi important, il arrive jusqu'à plus de 82 °C.

La valeur maximale de V_{oc} est d'environ 1.8 V correspond à $\Delta T = 118.3^{\circ}C$ avec un éclairment solaire direct de 800 W/m².

Lors de l'expérimentation, on remarque que la variation du courant est très faible par rapport à la variation de la tension ce qui est remarquable. Avec un changement de température, on trouve une valeur du courant d'environ de 0.38 A. Cette dernière est utilisée pour la détermination de la puissance maximale du module TEG.

Conclusion et recommandation

Ce projet a fait l'objet d'une caractérisation d'un module thermoélectrique sous fort concentration solaire, et après la réalisation du prototype et le test pour un flux de rayonnement solaire variable nous avons pu voir la réponse électrique du module sous un gradient de température ΔT qui est proportionnelle au rayonnement incident en provenance du collecteur.

La tension en circuit ouvert est proportionnelle à la différence de température à travers les Thermocouples, ainsi que la caractéristique I-V et l'aire sous la courbe varie proportionnellement avec la différence de température.

En outre, il s'est avéré que la puissance produite par des modules TEG commercialisés tels que le TEC1-12715 est reliée à l'efficacité du système de concentration solaire et au système de refroidissement. Elle dépend aussi des paramètres internes du module utilisé.

L'efficacité optique de notre concentrateur parabolique n'était pas à la hauteur de nos attentes à cause de la mauvaise surface réfléchissante (les éléments de miroir placés sur la surface causent une mauvaise focalisation des faisceaux lumineux même si la surface d'ouverture de la parabole est perpendiculaire avec le rayonnement direct incident). Nous recommandons l'utilisation de meilleures surfaces réfléchissantes.

De plus, le système de suivi des concentrateurs présentait un défi dans lequel nous devions surmonter en utilisant un système de suivi manuel. Un système qui coûte moins cher, mais pas si efficace et provoque tant de perturbations qu'il peut être remarqué dans les résultats des tests. Nous recommandons d'envisager un système de suivi automatique dans les travaux futurs.

Comme il a été démontré dans les essais, le module thermique a laissé passer trop de chaleur pour maintenir le gradient de température à l'état d'équilibre, augmentant ainsi la température du dissipateur thermique et diminuant le gradient de température. Cela entraîne en fin de compte une diminution de la tension produite par le module.

CONCLUSION

Afin d'éviter ce problème et d'augmenter l'efficacité du module solaire thermoélectrique, le dissipateur de chaleur a besoin d'une grande capacité de dissipation de la chaleur, qui pourrait être obtenue par un refroidisseur active en utilisant de eau par exemple.

L'efficacité de la STEG dans les travaux précédents a atteint des niveaux très importants (12%)(avec des modules thermoélectrique plus performant)par rapport à l'efficacité atteinte par notre système (0.37%).Cependant , il est toujours considéré comme un résultat positive par rapport à d'autres travaux et aux matériaux utilisés.

References

CHAPITRE I:

- [1] A. Bulusu, D.G. Walker, « Review of electronic transport models for thermoelectric materials », *Superlattices Microstruct.* vol. 44, pp. 1-36, 2008.
- [2] D. M. Rowe, *CRC Handbook of thermoelectrics*, CRC Press, pp. 7-8, 1995.
- [3] D.M. Rowe, Chap.1 «General principles and theoretical considerations » in *Thermoelectric handbook macro to nano*, CRC Press, Taylor & Francis group, pp. 1-9, 2006.
- [4] J. Goldsmid, Chap.1 in «*Introduction to thermoelectricity*», Springer, pp. 4, 2010.
- [5] L.D. Hicks, M.S. Dresselhaus, « Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor », *Phys. rev B*, vol. 47, no. 24, 1993.
- [6] P. Pichanusakorn, P.R. Bandaru, « The optimal Seebeck coefficient for obtaining the maximum power factor in thermoelectrics », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, pp. 223108, 2009.
- [7] M.K. Keshavarz, D. Vasilevskiy, R.A. Masut, S. Turenne, « p-type bismuth telluride-based composite thermoelectric materials produced by mechanical alloying and hot extrusion », *J. Electron. Mater.*, vol. 42, no. 7, 2013.
- [8] J.P. Fleurial, « Design and discovery of highly efficient thermoelectric materials », *CIMTECH-World ceramics congress and forum on new materials N°9*, Florence, Italie, vol. 24, pp. 733-744, 1999.
- [9] H. Le-Quoc, « Matériaux thermoélectriques du type Mg₂Si-Mg₂Sn élaborés en couches minces par co-pulvérisation assistée par plasma », thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 2011.
- [10] A. Muto, « Device testing and characterization of thermoelectric nanocomposites », M.Sc, Massachusetts institute of technology, 2008.
- [11] D. Yan, « Modeling and application of a thermoelectric generator », M.Sc.A, University of Toronto, Canada, 2011.
- [12] S. Dalola, M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, A. Taroni, « Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors », *IEEE Transactions on instrumental and measurement*, vol. 58, no. 1, pp. 99-107, January 2009.
- [13] A. Muto, D. Kraemer, Q. Hao, Z.F. Ren, G. Chen, «Thermoelectric properties and efficiency measurements under large temperature differences», *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 80, pp. 093901.1-093901.7, 2009.
- [14] M.W. Oh, J.H. Ahn, J.K. Lee, B.S. Kim, S.D. Park, B.K. Min, Y.S. Choi, H.W. Lee, «Estimation of power generation from thermoelectric devices : Model analysis and performance measurements», *Electron. Mater. Lett.*, vol. 6, no. 3, pp. 129-134, 2010.

- [15] D.M. Rowe, G. Min, « Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation », *IEEE Proc-Sci.Meas.Technol*, vol. 143, no. 6, pp. 351-356, November 1996.
- [16] G. Min, D.M. Rowe, « Recent concepts in thermoelectric power generation », in *21st International conference on thermoelectronics*, Long Beach, USA, pp. 365-374, 2002.
- [17] E. Sandoz-Rosado, R.J. Stevens, « Experimental characterization of thermoelectric modules and comparison with theoretical models for power generation », *J. Electron. Mater.*, vol. 38, no. 7, pp. 1239-1244, 2009.
- [18] Yang ,J. ;Caillat,T ;Thermoelectric Materials for Space and Automotive Power generation ;MRS Bull .2006, 31,224-229.
- [19] Jordan ,K . ;Birden, J .Thermal Batteries Using Polonium-210 .(Information Report) ;Mound Lab . :Miamisburg, OH,USA,1954 .
- [20] Cataldo,R.L. ; Bennett,G.L.US space radioisotope power systems and applications : past,present and futer.In Radioisotopes-Applications in physical sciences ; In Tech : Rijeka,Croatia,2011.
- [21] Cataldo, R. Spacecraft Power System Considerations for the Far Reaches of the Solar System. In Outer Solar System; Springer Science and Business Media LLC: Cham, Switzerland, 2018; pp. 767–790.
- [22]Cataldo, R.L.B. U.S. Space Radioisotope Power Systems and Applications: Past, Present and Future. 2011. Available online: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20120000731> (accessed on 18 June 2018).
- [23]Kramer, D.P.; Ambrosi, R.; Sarsfield, M.; Watkinson, E.J.; Mesalam, R.; Williams, H.; Barklay, C.; Tinsley, T.; Goodrich, S.; Pierson, T.; et al. Recent Joint Studies Related to the Development of Space Radioisotope Power Systems. E3S Web Conf. 2017, 16, 5002.
- [24]Woerner, D. A Progress Report on the eMMRTG. *J. Electron. Mater.* 2015, 45, 1278-1283.
- [25] Holgate, T.; Bennett, R.; Hammel, T.; Caillat, T.; Keyser, S.; Sievers, B. Increasing the Efficiency of the Multi-mission Radioisotope Thermoelectric Generator. *J. Electron. Mater.* 2014, 44, 1814–1821.
- [26] Jaziri, N.; Boughamoura, A.; Müller, J.; Mezghani, B.; Tounsi, F.; Ismail, M. A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. *Energy Rep.* 2019.
- [27] Arctic Submarine Lab History. Available online: <https://web.archive.org/web/20130218182628/http://www.csp.navy.mil/asl/Timeline.htm> (accessed on 19 November 2019).
- [28] Ruffio, J. What Future for Radioisotope Thermoelectric Generators (RTG)? *Physics* 2017.
- [29] Radioisotope Thermoelectric Generators, Bellona.Org. 2005. Available online: <http://bellona.org/news/nuclear-issues/radioactive-waste-and-spent-nuclear-fuel/2005-04-radioisotope-thermoelectric-generators-2> (accessed on 14 June 2018).

[30] Standring, W.J.F.; Dowdall, M.; Sneve, M.; Selnaes, Ø.G.; Amundsen, I. Environmental, health and safety assessment of decommissioning radioisotope thermoelectric generators (RTGs) in northwest Russia. *J. Radiol. Prot.* 2007, 27, 321–331.

[31] Prutchi, D. Nuclear Pacemaker-s. 2005. Available online: http://www.prutchi.com/pdf/implantable/nuclear_pacemakers.pdf (accessed on 9 June 2019).

[32] Facts about Pacemakers. Available online: <http://osrp.lanl.gov/pacemakers.shtml> (accessed on 14 June 2018).

[33] Prelas, M.; Boraas, M.; Aguilar, F.D.L.T.; Seelig, J.-D.; Tchouaso, M.T.; Wisniewski, D. Potential Applications for Nuclear Batteries; Springer Science and Business Media LLC: Cham, Switzerland, 2016; Volume 56, pp. 285–305.

[34] Cnam, Cnam-Culture-Claude Servais Pouillet, Culture. Available online: <http://culture.cnam.fr/made-in-cnam/claude-servais-pouillet-718304.kjsp?RH=1423328764669> (accessed on 18 June 2018).

[35] Gavarret, J. *Traité d'électricité*; V. Masson: Paris, France, 1807.

[36] Strony Internetowe. Available online: <http://aztekium.pl/sites.py?tekst=1&lang=pl> (accessed on 18 June 2018).

[37] Les Thermocouples-II y a un Siècle et Plus. Available online: http://aviatechno.net/thermo/thermo_ancien.php?retour=thermo01.php%23histoire (accessed on 28 September 2018).

[38] OBJET Documents 797 sur 935. Available online: <http://cugnot.cnam.fr:8000/SEARCH/BASIS/COLLEC/INTERNET/OBJET/DDW?W%3DDOM++P H+LIKE+%27ELECTRICITE/MAGNETISME%27%26M%3D797%26K%3D35493%26R%3DY%26U%3D1> (accessed on 18 June 2018).

[39] Walmsley, R.M. *Electricity in the Service of Man: A Popular and Practical Treatise on the Applications of Electricity to Modern Life*; Cassell: London, UK; Paris, France; Melbourne, Australia, 1911.

[40] Bonin, R.; Boero, D.; Chiaberge, M.; Tonoli, A. Design and characterization of small thermoelectric generators for environmental monitoring devices. *Energy Convers. Manag.* 2013, 73, 340–349.

[42] Thermoelectric Generators (TEGs)|Gentherm Global Power Technologies. Available online: <http://www.genthermglobalpower.com/products/thermoelectric-generators-tegs> (accessed on 22 June 2018).

[43] BioLite-ROW, BioLite Outdoor & Off-Grid Energy|Rest-Of-World, BioLite-ROW. Available online: <https://row.bioliteenergy.com/> (accessed on 25 June 2018).

[44] Zoui, M.A.; Bentouba, S.; Bourouis, M. The Potential of Solar Thermoelectric Generator STEG for Implantation in the Adrar Region. *Algerian J. Renew. Energy Sustain. Dev.* 2020, 2, 17–27.

- [45] Narducci, D.; Bermel, P.; Lorenzi, B.; Wang, N.; Yazawa, K. *Solar Thermoelectric Generators*; Springer Science and Business Media LLC: Cham, Switzerland, 2018; pp. 45–61.
- [46] Weston, E. *Art of Utilizing Solar Radiant Energy*. Available online: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3f/08/67/a6f7bd2416ee1a/US389125.pdf> (accessed on 23 June 2020).
- [47] Weston, E. *Apparatus for Utilizing Solar Radiant Energy*. Available online: <https://patentimages.storage.googleapis.com/1f/55/8f/4f4605a0c953a2/US389124.pdf> (accessed on 23 June 2020).
- [48] Coblenz, W.W. Harnessing heat from the sun. *Sci. Am.* 1922, 127.
- [49] Telkes, M. Solar Thermoelectric Generators. *J. Appl. Phys.* 1954, 25, 765.
- [50] He, W.; Su, Y.; Wang, Y.; Riffat, S.; Ji, J. A study on incorporation of thermoelectric modules with evacuated-tube heat-pipe solar collectors. *Renew. Energy* 2012, 37, 142–149.
- [51] Miljkovic, N.; Wang, E.N. Modeling and optimization of hybrid solar thermoelectric systems with thermosyphons. *Sol. Energy* 2011, 85, 2843–2855.
- [52] Fan, H.; Singh, R.; Akbarzadeh, A. Electric Power Generation from Thermoelectric Cells Using a Solar Dish Concentrator. *J. Electron. Mater.* 2011, 40, 1311–1320.
- [53] Date, A.; Date, A.; Dixon, C.; Akbarzadeh, A. Progress of thermoelectric power generation systems: Prospect for small to medium scale power generation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 33, 371–381.
- [54] Amatya, R.; Ram, R.J. Solar Thermoelectric Generator for Micropower Applications. *J. Electron. Mater.* 2010, 39, 1735–1740.
- [55] Rehman, N.U.; Uzair, M.; Siddiqui, M.A. Optical analysis of a novel collector design for a solar concentrated thermoelectric generator. *Sol. Energy* 2018, 167, 116–124.
- [56] Li, P.; Cai, L.; Zhai, P.; Tang, X.; Zhang, Q.; Niino, M. Design of a Concentration Solar Thermoelectric Generator. *J. Electron. Mater.* 2010, 39, 1522–1530.
- [57] Sahin, A.Z.; Ismaila, K.G.; Yilbas, B.S.; Al-Sharafi, A. A review on the performance of photovoltaic/thermoelectric hybrid generators. *Int. J. Energy Res.* 2020, 44, 3365–3394.
- [58] Suleebka, K. High temperature solar thermoelectric generator. *Appl. Energy* 1979, 5, 53–59.
- [59] Motiei, P.; Yaghoubi, M.; GoshtashbiRad, E.; Vadiee, A. Two-dimensional unsteady state performance analysis of a hybrid photovoltaic-thermoelectric generator. *Renew. Energy* 2018, 119, 551–565.

- [60]Mahmoudinezhad, S.; Rezania, A.; Rosendahl, L.A. Behavior of hybrid concentrated photovoltaic-thermoelectric generator under variable solar radiation. *Energy Convers. Manag.* 2018, 164, 443–452.
- [61]Faddouli, A.; Labrim, H.; Fadili, S.; Habchi, A.; Hartiti, B.; Benaissa, M.; Hajji, M.; Ez-Zahraouy, H.; Ntsoenzok, E.; Benyoussef, A. Numerical analysis and performance investigation of new hybrid system integrating concentrated solar flat plate collector with a thermoelectric generator system. *Renew. Energy* 2020, 147, 2077–2090.
- [62]Shittu, S.; Li, G.; Akhlaghi, Y.G.; Ma, X.; Zhao, X.; Ayodele, E. Advancements in thermoelectric generators for enhanced hybrid photovoltaic system performance. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 109, 24–54.
- [63]Indira, S.S.; Vaithilingam, C.A.; Chong, K.-K.; Saidur, R.; Faizal, M.; Abubakar, S.; Paiman, S. A review on various configurations of hybrid concentrator photovoltaic and thermoelectric generator system. *Sol. Energy* 2020, 201, 122–148
- [64]Li, G.; Shittu, S.; Zhou, K.; Zhao, X.; Ma, X. Preliminary experiment on a novel photovoltaic-thermoelectric system in summer. *Energy* 2019, 188, 116041.
- [65]Mizoshiri, M.; Mikami, M.; Ozaki, K. Thermal–Photovoltaic Hybrid Solar Generator Using Thin-Film Thermoelectric Modules. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2012, 51, 06FL07.
- [66]Yu, C.; Chau, K.T. Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking. *Energy Convers. Manag.* 2009, 50, 1506–1512.
- [67]Stabler, F. Automotive applications of high efficiency thermoelectrics. In *Proceedings of the DARPA/ONR Program Review and DOE High Efficiency Thermoelectric Workshop*, San Diego, CA, USA, 24–27 March 2002.
- [68]Vázquez, J.; Sanz-Bobi, M.A.; Palacios, R.; Arenas, A. State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles. In *Proceedings of the 7th European Workshop on Thermoelectrics*, Pamplona, Spain, 3–4 October 2002.
- [69]Agudelo, A.; García-Contreras, R.; Agudelo, J.R.; Armas, O. Potential for exhaust gas energy recovery in a diesel passenger car under European driving cycle. *Appl. Energy* 2016, 174, 201–212.
- [70]Fontaras, G.; Zacharof, N.; Ciuffo, B. Fuel consumption and CO₂ emissions from passenger cars in Europe–Laboratory versus real-world emissions. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2017, 60, 97–131.
- [71]Birkholt, U. Conversion of Waste Exhaust Heat in Automobiles Using FeSi₂ Thermoelements. In *Proceedings of the 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion*, Arlington, TX, USA, 16–18 March 1988.
- [72]Ikoma, K.; Munekiyo, M.; Furuya, K.; Kobayashi, M.; Izumi, T.; Shinohara, K. Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 2002; pp. 464–467.

[73] Meisner, G.P. Advanced thermoelectric materials and generator technology for automotive waste heat at GM. In Proceedings of the 2nd Thermoelectrics Applications Workshop, San Diego, CA, USA, 3–6 January 2011.

[74] Shen, Z.-G.; Tian, L.-L.; Liu, X. Automotive exhaust thermoelectric generators: Current status, challenges and future prospects. *Energy Convers. Manag.* 2019, 195, 1138–1173.

CHAPITRE II

[1] **Pierre Bessemoulin et Jean Oliviéri**, Le rayonnement solaire et sa composante, La Météorologie 8^e série - n° 31 - septembre pp 42-59. 2000

[2] **Cherrif . Khelif et Kamel . Hadri Y-attaf**, Gisement solaire du site d'Adrar pour l'an 2000, ENERSOLE'01-ADRAR- ALGERIE , pp 255-272. 2001

[3] **F.Youcef Ettoumi, L.Nacet, A. Adane, H.Sauvageot**, Génération du Gisement quotidien en Algérie, 3^{eme} Séminaire National en Génie Electrique 29-31 pp251-256. 2001

[4] **A.A SFEIR G. GUARRACINO**, ingénieur des systèmes solaires, application a l'habitat , technique et documentation , Edition paris ,1981.

[5] **K-Messaitfa** ., Evaluation de l'apport quantitatif des inclinaisons optimales d'un Système de pompage photovoltaïques –ENERSOLE'01-ADRAR- ALGERIE pp 255-272. 2001

[6] **F.Youcef Ettoumi et A. Adane**, Génération des données d'irradiation solaire globale quotidienne à Bechar, international conférence on electrotechnic, ICEL'2000, november 13-15, 2000, U.S.T.Oran 'M.B'', Alegria pp 384-387

[7] **M.Capdériau**, Atlas solaire en Algérie (tome 1, 2 et 3), O.P.U Alger, 1988.

[8] **S.Bouzza, C.Zidani, F.Benyarou, B.Benyoucef**, Estimation des énergies incidentes sur les capteurs a concentration, International Congress of Photovoltaic and Wind Energy ,Tlemcen, Algérie le 20.21 et 22 Décembre 2003.

[9] [http// www.mem.algria.org](http://www.mem.algria.org).

[10] **H.benmossa, B.Gharbi, S.Mammeri**, Etude et d'un réfrigérateur solaire 'mémoire d'ingénieur ', Batna 1979.

[11] **Al-Rubaian, Ali I. And Al-fare , Harnual**, Performance of single Axis tracking solar parabolic trough in Riyadh Saudi Arabia , Word Renewable Energy Congress VIII (WREC 2004)

[12] **GURRAICHE DJEMAA**, Simulation et prédiction de la radiation solaire directe absorbée par un champ de capteurs cylindro-parabolique. thèse de magister, Batna 2002.

[13] **JACQUES DESAUTEL**, les capteurs héliothermique, Edition EDISUD 1978 .

[14] **Chapitre 7** de l'ngénierie solaire des processus thermique par Duffie et Beckman, Wiely.1991.

[15] **Serkankapucus** , collecteurs de concentration solaire , PHYS 471 énergie solaire 2004-1.

[16] **Paul wode N1BWT**, OFFSET6FED PRABOLIC DISH ANTENNAS, 1995-1998.

CHAPITRE III:

[1] **KIPP&ZENON CM6B** manuel d'instruction.