

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Djilali BOUNAAMA KHEMIS-MILIANA



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de

Master

En Sciences et Techniques

Spécialité : Génie mécanique

Option : Energétique

Etude comparative des deux convertisseurs énergétiques solaires

Présenté et soutenu par :

*BABAARBI Khalissa

*BOUSSOUFI Cherifa

Encadré par :

Mr. KELLACI Ahmed

Année Universitaire : 2015 / 2016



REMERCIEMENTS

Avant tous, nous tenons à remercier ALLAH le tout puissant qui nous a guidé tout au long de notre vie, qui nous a donné la force et le courage pour passer tous les moments difficiles et qui nous a permis d'effectuer ce travail.

*Nos vifs remerciements vont à notre encadreur **Mr. KELLACI Ahmed** pour ses conseils précieux, sa patience, aussi pour sa confiance.*

Aux membres du jury qui ont acceptés de juger ce modeste travail.

À tous les enseignants du département de technologie de l'université Djilali Bounaama de Khemis Miliana.

À la promotion de master 2 en génie mécanique de 2016 de l'université Djellali Bounaama.

Nos remerciements vont aussi :

À nos chers parents qui nous ont encouragés et nous ont aidés par leurs prières et pour tout ce qu'ils ont pu faire pour que ne soyons ce que nous sommes aujourd'hui.

À nos sœurs, nos frères et leurs enfants.

À nos chères amies.

Sans oublier à la fin d'adresser nos vifs remerciements à toute personne qui nous a aidé de près ou de loin afin de réaliser ce travail.



Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A ma très chère mère Halima

A mon très cher père Mohamed

*Qui n'ont pas cessé de me soutenir dans tous les domaines de la vie
et particulièrement dans mes études.*

*Je leurs dis mille fois **MERCI***

*A ma très chère sœur Fatima, Naima, Selma, Amina, Sanaa, Leila, Fatiha, Anfel, Meriem,
Ikrem, Khadidja*

A mes très chers frères Yahya, Anes, Hichem

à qui je souhaite la réussite et la joie dans la vie

*A mes chères amies : Hakima, Sihem, Warda, Sarah, Moufida, Soulef, Fatima, Leila,
Wfaa, Bassouma, Hafidha*

A ma chère binôme : Khalissa

A mes collègues de la promotion 2016 ' Génie mécanique '

A tous mes cousines et mes cousins

Et à tous ceux qui sont proches de mon cœur et dont je n'ai pas cité le

Cherifa



Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail,
A ma très chère mère **Zohra** qui a été à mes côtés et m'a
soutenue durant toute ma vie,
A mon cher père **Mohammed Saghir** qui a sacrifié toute sa vie
pour me voir devenir ce que je suis.
Un grand merci à mes parents et que dieu les gardes.*

*A mes très chers frères: **Nabil, Karim, Kamel, Nouh, Yacine, Charef Eddine, Nadir,
Radhouane, Ismail, Hedaifa, Taiab***

*A mes très chères sœurs: **Djamila, Fatima, Samira, Hayat, Haoua, Rim, Souhir, Latifa,
Selef, Tima, Hanane, Souma, Hafida, Zinab, Ikram, Nadjat, Asma, Nadia, Hana, Afaf***

A toute ma famille sans exception.

*A toutes mes amies: **Hayat, Aicha, Nasimma, chaima, Mami, Nadjiba, Rokaya,
Massaouda, Faiza, Fatima, Ouafa, Fatma Zohra, Amel, Khansa, Mona, Ala Eddine, Ishak,
Tahar, Ahmed, Samir, Zakaria, Lazhar, Nacer, Fouad, Youcef, Fodil, Saddam***

*A mon binôme et amie **Cherifa***

A tous ceux qui sont proches de mon cœur et dont je n'ai pas cité le nom.

*A toutes les personnes qui connaissent « Khalissa » de près ou de loin, seulement pour leur
existence.*

Et enfin, à toute la promotion 2016 de génie mécanique.

Khalissa

RESUME

La technologie des concentrateurs solaires vient d'atteindre un niveau très remarquable, en utilisant des réflecteurs afin de concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels. Il existe quatre principaux types des concentrateurs solaires, les concentrateurs cylindro-paraboliques, les miroirs de Fresnel, les tours solaires et les concentrateurs paraboliques.

Ce travail est consacré à l'étude comparative de deux convertisseurs énergétiques solaires.

L'objectif principal de ce travail est d'approfondir nos connaissances sur les convertisseurs énergétiques solaire et de faire l'étude comparative entre le convertisseur cylindro-parabolique et le convertisseur parabolique.

Mots clés: Concentrateur solaire/ réflecteur/ rayonnement solaire/ électricité/ concentrateur cylindro-parabolique/ miroirs de Fresnel / tours solaire/ concentrateur parabolique.

ABSTRACT

The technology of solar concentrators has reached a remarkable level, using reflectors to concentrate sunlight to heat a fluid to high temperature and thus produce electricity or feed by energy the industrial processes. There are four main types of solar concentrators, cylindro-parabolic concentrators, Fresnel mirrors, solar towers and parabolic concentrators.

This research is devoted to the comparative study of two solar energy converters.

The main objective of this work is to deepen our knowledge of the solar energy converters, and make a comparative study between the cylindro-parabolic concentrator and parabolic concentrator.

Keywords: Solar concentrator/ reflector/ solar radiation/ electricity/ cylindro-parabolic concentrator/ Fresnel mirrors/ solar towers/ parabolic concentrators.

ملخص

وصلت تكنولوجيا مركزات الطاقة الشمسية على مستوى رائع للغاية, وذلك باستخدام عاكس لتركيز أشعة الشمس لتسخين السوائل في درجات حرارة عالية, وبالتالي إنتاج الكهرباء أو توفير الطاقة العمليات الصناعية. هناك أربعة أنواع رئيسية من مركزات الطاقة الشمسية, المركزات الاسطوانية المكافئ, المرايا فرا ندال, الأبراج الشمسية, المركزات المكافئ.

ويخصص هذا العمل إلى دراسة مقارنة لاثنتين من المحولات الطاقة الشمسية.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تعميق معرفتنا لاستخدام الطاقة الشمسية, وإجراء دراسة مقارنة بين المحولات أسطوانية مكافئ وقطعي مكافئ.

الكلمات المفتاحية: المكثف للطاقة الشمسية/ عاكس/ الإشعاع الشمسي/ كهرباء/ المركز مكافئ أسطوانية/ المرايا فرا ندال/ أبراج الطاقة الشمسية/ المركز مكافئ.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Structure du soleil	22
Figure I.2	Mouvement de la terre autour du soleil	23
Figure I.3	Exemple de l'énergie solaire	25
Figure I.4	Plan de l'utilisation de l'énergie solaire.	27
Figure I.5	Classification du rayonnement en fonction de la longueur d'onde	29
Figure I.6	Spectre solaire	30
Figure I.7	L'allure du spectre solaire	31
Figure I.8	Evolution annuelle de la constante solaire	32
Figure I.9	Type de rayonnement solaire	33
Figure I.10	Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	34
Figure I.11	Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu	36
Figure I.12	Répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie	37
Figure II.1	Schéma global de principe du solaire thermodynamique	40
Figure II.2	Principe d'une centrale solaire thermodynamique	41
Figure II.3	Comparaison des technologies solaires à concentration	43
Figure II.4	Capteur cylindro-parabolique de la centrale de Nevada Solar One (USA): A: réflecteur, B: collecteur	45
Figure II.5	Le capteur cylindro-parabolique fournissant de l'énergie électrique à partir d'énergie thermique	46
Figure II.6	Configuration typique d'une centrale à collecteurs cylindro-paraboliques	47
Figure II.7	Champ de collecteurs en Californie	48
Figure II.8	Image réelle de la turbine à vapeur SST-900	49
Figure II.9	Schéma d'une machine motrice à vapeur simple	50
Figure II.10	Cycles de Clausius-Rankine à vapeur simple.	51
Figure II.11	La centrale électrique hybride de Hassi Rmel	52
Figure II.12	Nombreux prototypes de concentrateurs paraboliques	53
Figure II.13	Schéma d'un concentrateur solaire parabolique	54

Figure II.14	Principe de fonctionnement d'un convertisseur parabole-Stirling	55
Figure II.15	Moteur Stirling	56
Figure II.16	Cycle de Stirling idéal	57
Figure II.17	Schéma globale d'une turbine à gaz	58
Figure II.18	Système de capteur parabolique avec un cycle de Brayton	59
Figure III.1	Processus de transformation de la chaleur du soleil en électricité par voie thermodynamique	62
Figure IV.1	Variation du rendement énergétique en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration	74
Figure IV.2	Variation de la concentration en fonction de la température pour différentes valeurs du rendement énergétique.	74
Figure IV.3	Variation de la concentration en fonction de la température	75
Figure IV.4	Variation du rendement énergétique en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration.	76
Figure IV.5	Variation du rendement de Carnot en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration	77
Figure IV.6	Variation du rendement global en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration	78
Figure IV.7	Variation des rendements en fonction de la température pour une valeur de la concentration	79
Figure IV.8	Schéma du concentrateur cylindro-parabolique	80
Figure IV.9	LEC en \$cts/kWh calculé pour différentes technologies de production d'électricité en Californie	84

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Caractéristiques principales du soleil	22
Tableau I.2	Répartition spectrale du rayonnement thermique	29
Tableau I.3	Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques	35
Tableau II.1	Caractéristiques des centrales solaires à concentration	44
Tableau II.2	Les nouveaux projets CSP en Algérie	52
Tableau IV.1	Variation du rendement énergétique en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration	72
Tableau IV.2	Variation de la concentration en fonction de la température pour différentes valeurs du rendement énergétique	73
Tableau IV.3	Variation du rendement énergétique en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration	76
Tableau IV.4	Variation du rendement de Carnot en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration	77
Tableau IV.5	Variation du rendement global en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration	78
Tableau IV.6	Variation des rendements en fonction de la température pour une valeur de la concentration	79

NOMENCLATURE

Symbole	Désignation	Unité
C	Concentration géométrique	
h_{cv}	Coefficient d'échange de chaleur par convection	[W/m ² K]
h_r	Coefficient d'échange de chaleur par rayonnement	[W/m ² K]
I	Eclairement solaire direct	[W/m ²]
p_a	Puissance solaire absorbée par le récepteur	[W]
p_c	Puissance solaire captée par le réflecteur	[W]
p_t	Puissance utile transmise par la surface réceptrice	[W]
p_p	Puissance correspondant aux pertes thermiques	[W]
p_{pcv}	Pertes par convection	[W]
p_{pr}	Pertes par rayonnement	[W]
p_{pc}	Pertes par conduction	[W]
$S_{réf}$	Surface d'ouverture du concentrateur (réflecteur)	[m ²]
S_r	Surface de l'absorbeur (récepteur)	[m ²]
T_r	Température de la surface du récepteur	[K]
T_a	Température ambiante	[K]
U	Coefficient global des pertes	[W/m ² K]
LEC	Coût moyen annuel actualisé	[Euro/kWh]
\dot{m}	Débit massique	[kg/s]
C_p	Capacité calorifique à pression constante	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
T_e	Température entré	[°C]
T_s	Température sortie	[°C]
L	Longueur	[m]
D	Diamètre	[m]
V	Vitesse	[m/s]
S	Section	[m ²]

Indices & Exposant

a	Absorbé
p	Pertes
c	Conduction
cv	Convection
r	Récepteur
réf	Réflecteur

NOMENCLATURE

t Thermique

Symbole grec

σ	Constante de Stefan – Boltzmann.
λ	Conductivité de l'absorbeur.
ε	Facteur d'émissivité de l'absorbeur.
T	Facteur de transmission de l'absorbeur.
ρ	Facteur Réflexion de surface de réflecteur (miroir).
α	Facteur d'absorption de la surface de l'absorbeur.
η_{opt}	Rendement optique.
η_e	Rendement énergétique globale.
η_c	Rendement de Carnot.
η_{ch}	Rendement de la chaudière.
η	Rendement théorique de la centrale solaire.
η_{glob}	Rendement global de conversion de la puissance solaire.

Abréviations et acronymes

ASA	L'Agence Spatiale Allemande
O.N.M	Organisation Nationale de météorologique
CSP	Concentrated Solar Power
SEGS	Solar Enerating Generating Systemes
USA	United States of America

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Liste des illustrations graphiques et tableaux	
Symboles et définition	
Table des matières	
Introduction générale	17

CHAPITRE.I La Ressource Energétique Solaire

I.1 Introduction	21
I.2 le soleil	21
I.3 Le mouvement de la terre	23
I.4 L'énergie solaire	24
I.4.1 Techniques pour capter l'énergie solaire	25
I.4.2 Caractères particuliers	26
I.4.3 Les capacités de l'énergie solaire en Algérie	28
I.5 Le Rayonnement	28
I.5.1 Structure du rayonnement	28
I.5.2 Le rayonnement solaire	28
I.5.3 Le rayonnement solaire hors atmosphère	31
I.5.4.La constante solaire	31
I.5.5 Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol	32
I.5.6 Le rayonnement solaire et son utilisation par l'homme:.....	33
I.6 Le gisement solaire.....	34

CHAPITRE.II. Présentation des deux convertisseurs énergétique solaire

II.1 Introduction.....	39
II.2 Principe du solaire thermodynamique	40
II.3 Les fluides caloporteurs et thermodyn41amiques et les systèmes de génération d'électricité	41

II.3.1 Les fluides caloporteurs et thermodynamiques.....	41
II.3.2 Différents systèmes de génération d'électricité	42
II.4 Les concentrateurs solaires	42
II.5 Etude de deux différents types de convertisseurs solaire énergétique.....	44
II.5.1 Concentrateurs cylindro-paraboliques	44
II.5.1.1 description du concentrateur	45
II.5.1.2 Principe de fonctionnement d'un concentrateur cylindro-paraboliques.....	45
II.5.1.3 L'installation typique d'un concentrateur cylindro-parabolique	46
II.5.1.4 Système de transfert de chaleur et de génération électrique	48
II.5.1.4.1 La turbine à vapeur.....	48
II.5.1.4.2 Le cycle de Rankine vapeur	50
II.5.1.5 L'exploitation de la technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques en Algérie	51
II.5.1.6 Les avantages et les inconvénients.....	52
II.5.1.6.1 Les avantages.....	52
II.5.1.6.2 Les inconvénients	53
II.5.2 Concentrateur parabolique	53
II.5.2.1 Description	54
II.5.2.2 Principe de fonctionnement d'un concentrateur parabolique.....	54
II.5.2.3 Système de transfert de chaleur et de génération électrique	56
II.5.2.3.1 Le moteur Stirling.....	56
II.5.2.3.2 Le cycle de Stirling.....	57
II.5.2.3.3 La turbine à gaz	58
II.5.2.3.4 Le cycle de Brayton.....	58
II.5.2.4 Les avantages et les inconvénients de concentrateur parabolique	59
II.5.2.4.1. Les avantage	59
II.5.2.4.2. Les inconvénients	59
II.6 Avantages et inconvénients des systèmes de concentration	60
II.6.1 Avantages	60
II.6.2 Inconvénients	60

CHAPITRE.III Bilan énergétique des convertisseurs de l'énergie solaire

III.1 Introduction	62
--------------------------	----

III.2 Changement thermodynamique de l'énergie solaire	62
III.2.1 La collecte.....	63
III.2.2 La production de chaleur (bilan thermique)	64
III.2.2.1 Pertes par convection	65
III.2.2.2 Pertes par rayonnement.....	65
III.2.2.3 Pertes par conduction.....	65
III.2.3 La conversion de chaleur (rendement)	66
III.2.3.1 Cas du Concentrateur cylindro-parabolique	66
III.2.3.2 Cas du concentrateur solaire parabolique (avec comme convertisseur le moteur Stirling)	67

CHAPITRE.IV Calcul des paramètres énergétiques et analyse économique

IV.1 Introduction	71
IV.2 Calcul du rendement et de la concentration	71
IV.2.1 Cas du Concentrateur cylindro-parabolique.....	71
IV.2.2 Cas du Concentrateur parabolique.....	75
IV.2.3 Calculs pour chauffe-eau domestique avec concentrateur cylindro-parabolique.....	80
IV.2.3.1 Calcul de la puissance utile.....	81
IV.3.2.2 Calcul du débit massique	81
IV.3.2.3 Calcul du diamètre	81
IV.3 Analyse comparative économique et financière.....	82
IV.3.1 Evaluation des coûts	82
IV.3.2. Evaluation des couts et des performances.....	84
Conclusion générale.....	87

Références bibliographiques



Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, la conservation des ressources énergétiques est devenue une priorité à l'échelle planétaire, d'autre part, vue la demande vertigineuse en matière d'énergie, ce qui a poussé les spécialistes à trouver de nouvelles techniques, telles que les énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, et géothermie,...etc.).

Ces énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contre-choc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 à la suite de la signature du protocole de Kyoto.

La réduction des réserves en combustibles fossiles et l'augmentation de la pollution atmosphérique ont relancé la recherche sur l'exploitation des énergies renouvelables et en particulier l'énergie solaire. Pour le souci de surmonter les problèmes d'épuisement des ressources en énergies fossiles et la pollution atmosphérique qui ne cesse d'augmenter, la science s'oriente de plus en plus vers la recherche et l'exploitation des énergies renouvelables et en particulier le gisement inépuisable d'énergie solaire.

Tout d'abord, l'énergie solaire est la fraction de l'énergie du rayonnement solaire qui apporte l'énergie thermique et la lumière parvenant sur la surface de la terre, après filtrage par l'atmosphère terrestre.

L'homme utilise l'énergie solaire depuis l'antiquité. Archimède aurait fait brûler les navires romains assiégeant Syracuse en focalisant les rayons du Soleil sur leurs voiles à l'aide de 70 miroirs.

Au XVIII^{ème} siècle, le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier crée un four solaire permettant d'atteindre une température de 1755°C. En 1872, un distillateur solaire de 5000 m² est construit au Chili pour produire 20 000 litres d'eau douce par jour et en 1878, le professeur de mathématiques Augustin Mouchot crée une machine solaire à vapeur qui sert à actionner l'imprimerie de l'Exposition Universelle.

A cette époque, l'énergie solaire n'est pas développée car elle n'est pas assez rentable par rapport aux énergies fossiles. Il faut attendre 1954 et la conquête spatiale pour voir apparaître les premières cellules photovoltaïques. D'abord construites pour alimenter les satellites, elles ne seront utilisées dans le civil que plus tard, lors de la crise du pétrole.

En 1976, la première centrale solaire française voit le jour ; c'est la centrale Thémis, construite sur le site de Targassonne (Pyrénées-Orientales).

L'énergie solaire est aujourd'hui utilisée pour produire de l'électricité (à des fins industrielles ou domestiques), pour chauffer les habitations ou encore pour dessaler l'eau de mer. Le solaire thermodynamique est une technique solaire qui utilise le solaire thermique pour produire :

- Soit de l'électricité, sur le même principe qu'une centrale électrique classique (production de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée)
- Soit directement un travail mécanique en transformant un liquide en gaz ou en chauffant directement une partie du moteur comme dans le moteur Stirling.

Les centrales solaires thermodynamiques recouvrent une grande variété des systèmes disponibles tant au niveau de la concentration du rayonnement, du choix du fluide caloporteur ou du mode de stockage.

Présentement les technologies de concentration solaire sont celles qui présentent le plus de possibilités pour une exploitation commerciale.

Mais dans notre étude nous nous concentrons sur les deux principes types des concentrateurs solaires qui sont les concentrateurs cylindro-paraboliques et les concentrateurs paraboliques.

La technologie des Concentrateurs Cylindro-Parabolique est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire, le foyer d'une parabole est un axe, sur lequel est placé un tube absorbeur, pour capter un maximum de rayonnement. Dans ce tube circule le fluide caloporteur, qui se réchauffe jusqu'à une température d'environ 500°C et qui est ensuite centralisé et transporté jusqu'au bloc de génération électrique. Cylindro-parabolique/récepteur suit le mouvement du soleil.

La technologie des concentrateurs parabolique que suivent la course solaire selon deux axes et concentrent le flux solaire en leur point focal. Chaque coupole fonctionne de façon autonome et s'oriente automatiquement. Au point focal, une enceinte fermée contient un gaz qui entraîne un moteur Stirling, technologie capable de convertir cette énergie solaire thermique en électricité. il peut atteindre une température supérieure à 1000°C. Cette

technologie n'est pas adaptée à une production industrielle de masse du fait de son coût élevé, d'où le retard de son développement. Cependant, c'est la seule technologie thermodynamique qui puisse être mise en œuvre dans des sites isolés de petite taille.

L'ensemble de ce mémoire, consacré à l'étude comparative de deux convertisseurs énergétiques solaire, s'articule autour de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons la ressource énergétique solaire.

La présentation de deux convertisseurs énergétique solaire sont développés dans le deuxième chapitre.

Dans le chapitre trois, nous nous intéressons au bilan énergétique convertisseurs de l'énergie Solaire.

Dans le quatrième chapitre nous présentons le calcul de paramètres énergétiques des convertisseurs ainsi qu'une analyse économique.

Enfin une conclusion générale et des recommandations clôturent notre travail.

Chapitre I:

La ressource énergétique solaire

I.1 Introduction :

Les ressources énergétiques dans le monde peuvent être classées en deux classes :

- Ressources fossiles et fissiles non renouvelables qui se sont entassées dans l'écorce terrestre au cours des ères géologiques à cause des processus biologiques ou physico-chimiques.
- Ressources renouvelables qui trouvent leur origine dans les différents flux énergétiques naturels incidents à la surface de la terre, qui sont :
 - Le rayonnement solaire qui fournit 99.97% de sa densité thermique.
 - La chaleur interne terrestre qui fournit 0.03% de sa densité thermique.
 - Le travail des forces de gravitation [1, 2].

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources énergétique utilisées par l'homme. C'est l'énergie produite dans toutes les directions par le soleil grâce au rayonnement solaire.

Afin d'exploiter au mieux cette ressource énergétique pour tout projet ou étude des installations solaires, la connaissance de certaines notions est plus que nécessaire et qui seront et présentées dans ce chapitre, tel que : Le soleil, L'énergie solaire, Le rayonnement solaire, Le gisement solaire et présenter quel que notion sur :

I.2 Le soleil :

Le soleil est l'origine principale de toute forme d'énergie sur terre. Ceci étant vrai autant pour les énergies conventionnelles d'origine fossile (comme les hydrocarbures qui sont la conséquence de la photosynthèse), que pour les énergies non conventionnelles dites renouvelables (comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, et l'énergie géothermique).

L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14×10^5 km de diamètre, avec une masse qui est de l'ordre de 2×10^{30} kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments.

Le soleil est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à 4×10^{26} W. Seule une partie, de l'ordre de $1,7 \times 10^{17}$ W, est interceptée par la terre. Elle

nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques ; 30% de cette puissance est réfléchiée vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation précipitation de l'atmosphère [3, 4].

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau (I.1) ci-dessous :

Tableau I.1 Caractéristiques principales du soleil [5]

Diamètre (km)	14×10^5
Masse (kg)	2×10^{30}
Surface (km²)	6.09×10^{12}
Volume (km³)	1.41×10^{18}
Masse volumique moyenne (kg/m³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5×10^{17}

Le soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales, ces régions sont présentées dans la (figure I.1) ci-dessous [3, 4, 5] :

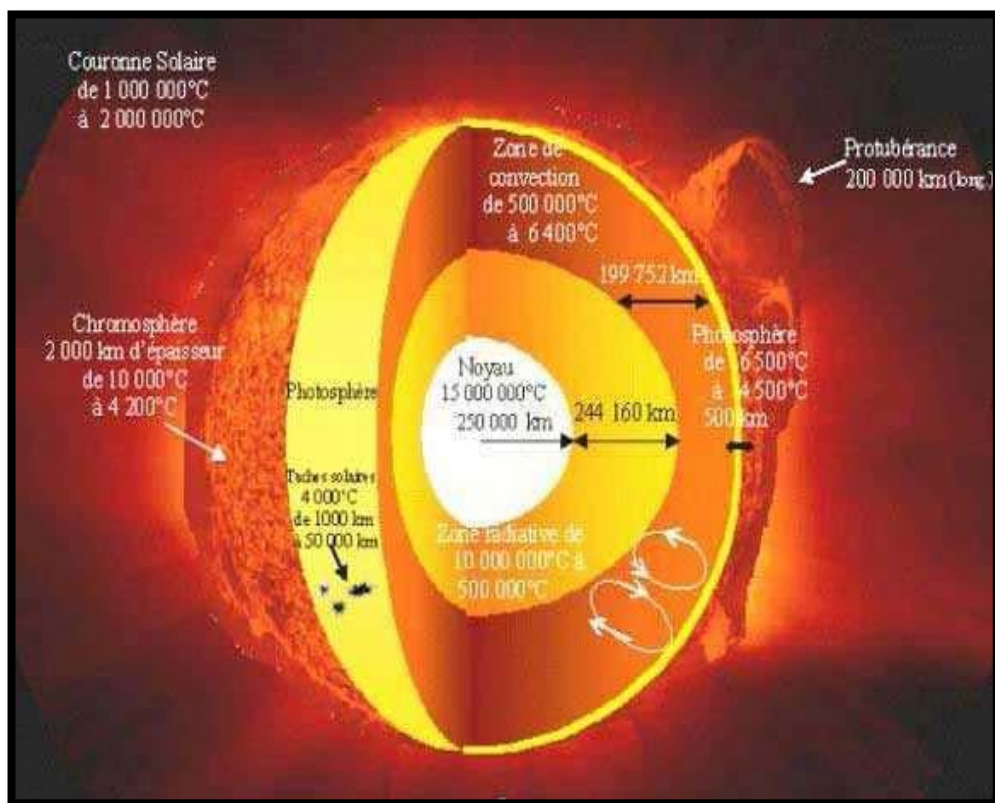


Figure I.1 Structure du soleil

A/ L'intérieur, contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire, cette région s'étend sur une épaisseur de 25×10^4 km. Cette couche est divisée en trois zones, le noyau, la zone radiative et la zone convective. Le rayonnement émis dans cette partie est totalement absorbé par les couches supérieures. La température atteint plusieurs millions de degrés, et la pression un milliard d'atmosphères.

B/ La photosphère est une couche opaque, très mince, son épaisseur est d'environ 300 km, elle est responsable de la presque totalité du rayonnement qui nous parvient, c'est la partie visible du soleil. L'ordre de grandeur de la température n'y est plus que de quelques millions de degrés, décroissant très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température dite de surface de l'ordre de 4500°C .

C/ La chromosphère et la couronne solaire, sont des régions à faible densité où la matière est très diluée, elles constituent l'atmosphère du soleil. Cette couche est caractérisée par un rayonnement émis très faible, bien que la température y est très élevée (un million de degrés).

I.3 Le mouvement de la terre :

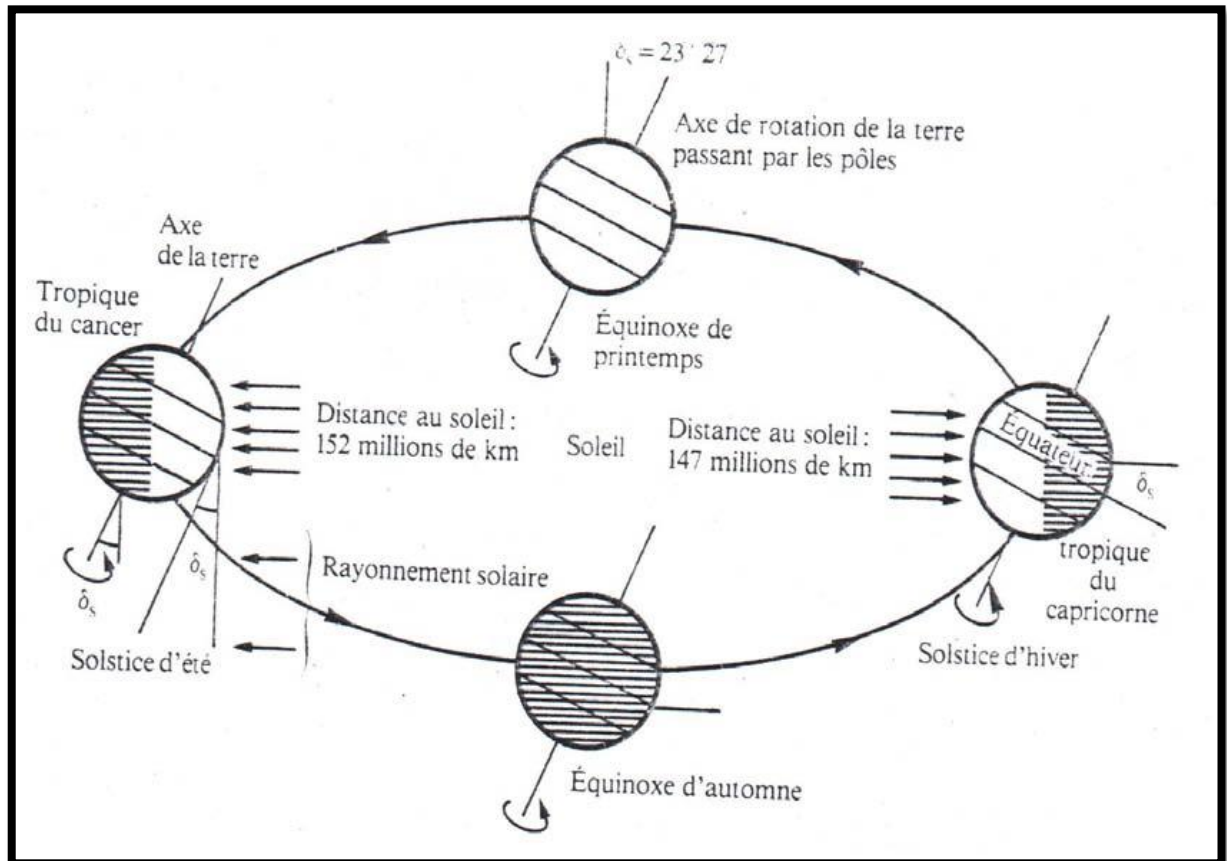


Figure I.2 Mouvement de la terre autour du soleil

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour où la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux.

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à $23^{\circ}27'$ [3].

I.4 L'énergie solaire :

Les conditions résidantes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X.

Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à $3.7.10^{26}$ j/s.

L'énergie solaire est l'énergie du rayonnement du soleil par diffuse à travers l'atmosphère. Dans l'espace, l'énergie des photons peut être utilisée, par exemple pour propulser une voile solaire. Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse créée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires. L'énergie solaire est donc à l'origine de toutes les énergies sur Terre à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice.



Figure I.3 Exemple de l'énergie solaire

I.4.1 Techniques pour capter l'énergie solaire :

Il existe différentes techniques pour capter une partie de cette énergie à savoir :

❖ L'énergie solaire thermique :

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :

- ✓ En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- ✓ En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.

❖ L'énergie solaire thermodynamique :

La solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales hélio-thermoélectriques [7, 8].

Les trois types principaux de centrales utilisés sont :

1. Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350°C.
2. Les centrales à capteurs paraboliques pour atteindre des températures de 1000°C ou plus.
3. Les centrales à tour pour atteindre 1000 °C [7].

❖ L'énergie solaire photovoltaïque :

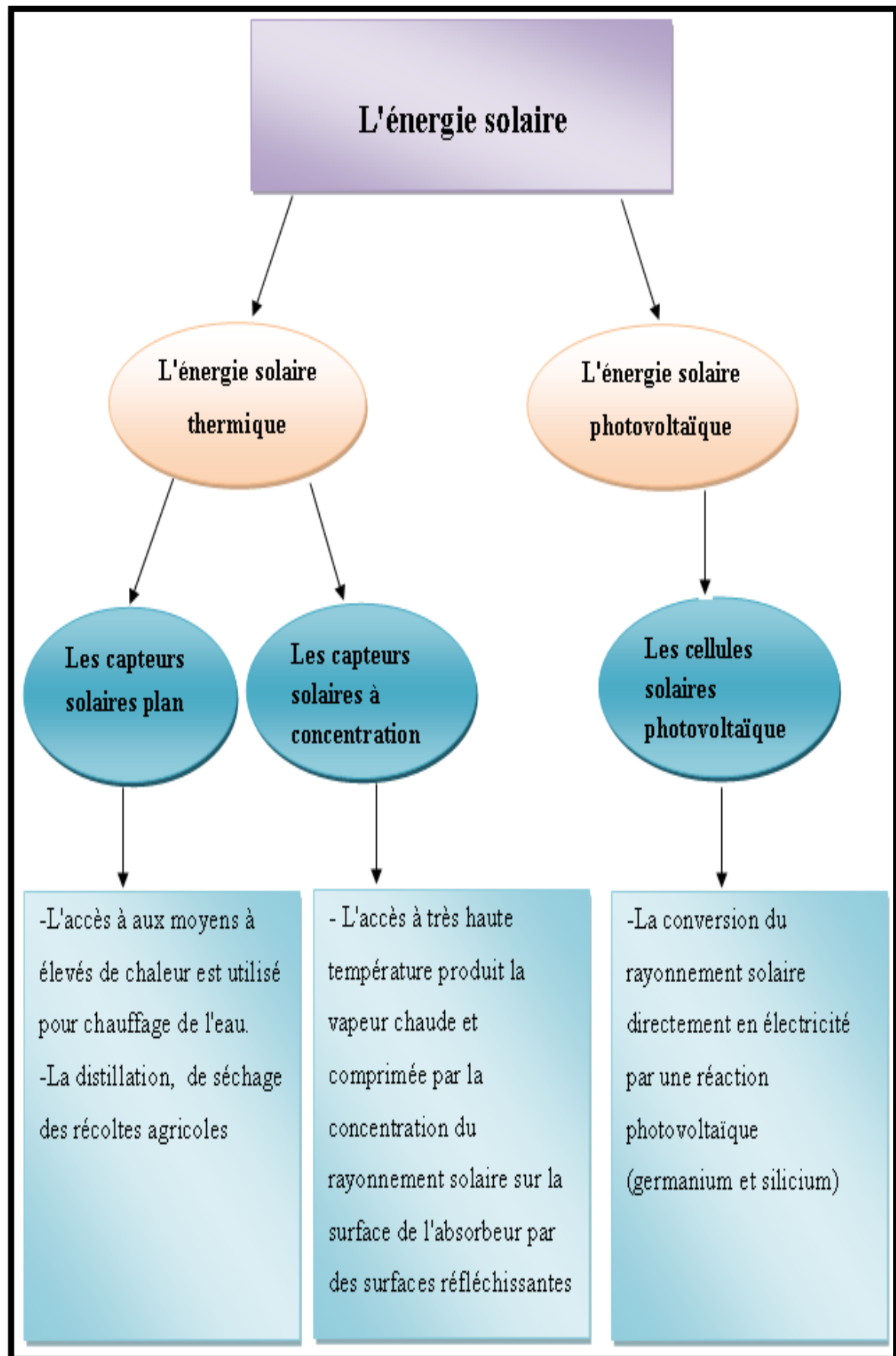
Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé ; cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreux [7].

1.4.2 Caractères particuliers :

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés suivantes :

- Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de 1kW/m² à midi par ciel bleu sur toute la planète.
- La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol 1 kW/m² est peu dense on parle alors d'énergie diffuse.
- Elle est abondante, notre planète reçoit plus de 10⁴ fois l'énergie que l'humanité consomme.
- Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.
- L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante.
- Elle est propre [7].

**Figure I.4 Plan de l'utilisation de l'énergie solaire**

I.4.3 Les capacités de l'énergie solaire en Algérie :

En Algérie cela fait longtemps que l'on entend parler des bienfaits de l'énergie solaire mais l'exploitation de cette énergie reste assez marginale car il n'y a pas assez de moyens débloqués pour contribuer ou développement de cette industrie récente et l'aider à émerger dans un des plus gros pays producteur de gaz et de pétrole.

Les politiciens se sentant préoccupés par le réchauffement climatique sont rares ou sont marginalisés. Un premier chantier a tout de même été démarré il y a peu de temps. Il s'agit d'une centrale photovoltaïque hybride d'une capacité de 15 mégawatts (35% de cette capacité est assurée par des panneaux solaires) implantée dans la petite ville de Hassi R'mel.

En effet, l'Algérie est en train de réaliser quels bénéfices elle pourrait tirer d'un fort développement de l'énergie solaire dans son pays. C'est un des pays d'Afrique subsaharienne possédant le plus fort taux d'ensoleillement, et si notre pays décide de s'équiper, cela en ferait le principal producteur d'énergie solaire du bassin méditerranéen.

I.5. Le Rayonnement :

I.5.1. Structure du rayonnement :

Le rayonnement est un mode d'échange d'énergie par émission et absorption de radiations électromagnétiques. L'échange thermique par rayonnement se fait suivant le processus :

- ✓ **Emission** : Il y a conversion de l'énergie fournie à la source en énergie électromagnétique.
- ✓ **Transmission** : La transmission de l'énergie électromagnétique se fait par propagation des ondes avec éventuellement absorption par le milieu traversé.
- ✓ **Réception** : A la réception, il y a conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique (absorption) [9].

I.5.2 Le rayonnement solaire :

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de 3.10^8 m/s et couvrant toutes les longueurs d'ondes depuis les

rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et 8 μm [10].

La figure (I.5) ci-dessous donne la classification du rayonnement en fonction de la longueur d'onde :

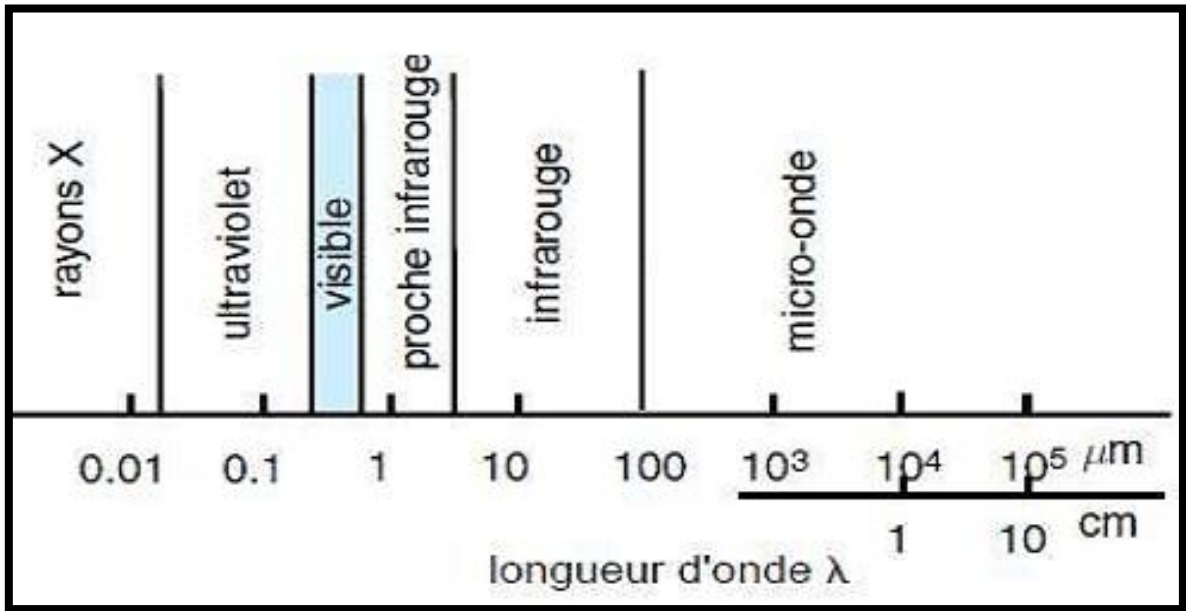


Figure I.5 Classification du rayonnement en fonction de la longueur d'onde [9]

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans le tableau (I.2) ci-dessous :

Tableau I.2 Répartition spectrale du rayonnement thermique [11]

Longueur d'onde (μm)	0-0.38	0.38-0.78	0.78
Pourcentage (%)	6.4	48	45.6
Energie (W/m^2)	87	656	623

La figure (I.6) ci-dessous est présentée illustre le rayonnement solaire, ses fréquences et ses longueurs d'ondes :

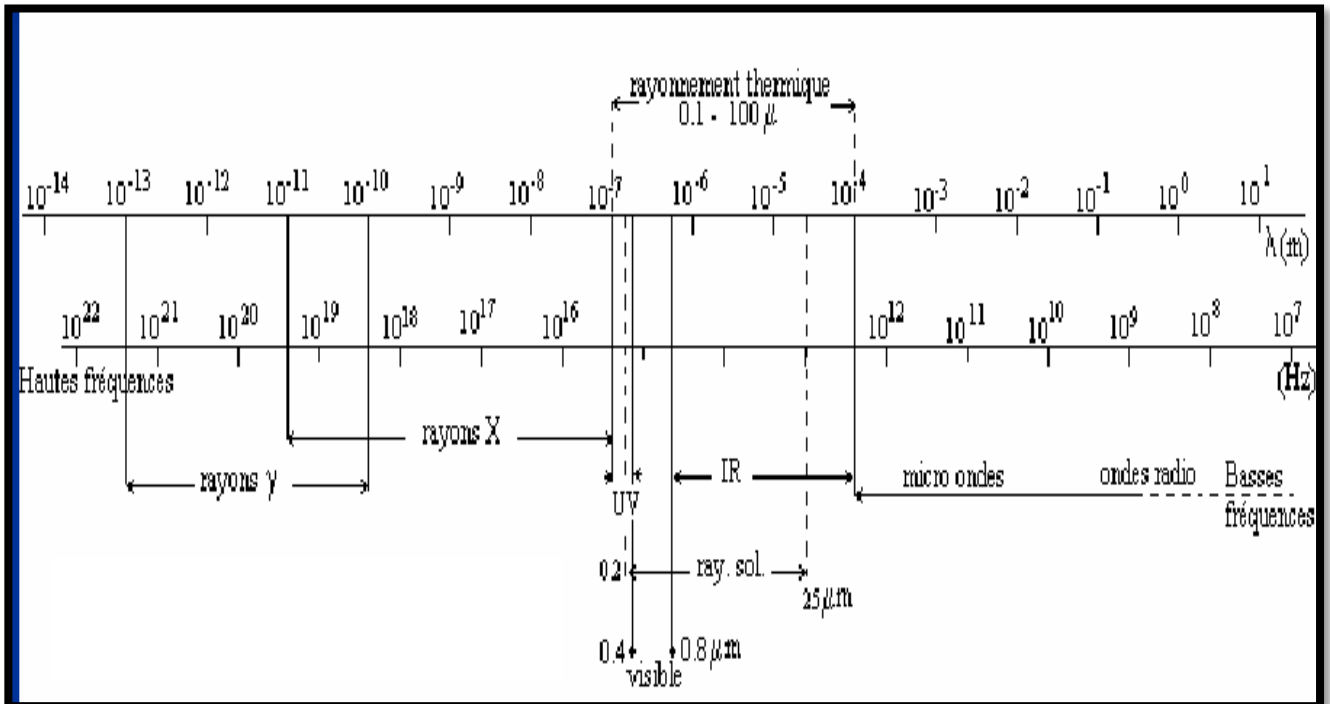


Figure I.6 Spectre solaire

Le rayonnement thermique correspond à l'émission due à une augmentation de température d'un corps composé de radiations de longueurs d'ondes $0,1 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 100 \mu\text{m}$.

Le spectre solaire, en dehors de la couche atmosphérique, se répartit sur une bande allant de $0,2$ à $25 \mu\text{m}$, avec des radiations supplémentaires :

- ✓ l'UV extrême de longueur d'onde $\lambda = 0,1216 \mu\text{m}$
- ✓ les rayons X de longueur d'onde $0,005 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1 \text{ nm}$
- ✓ les rayons radioélectriques de longueur d'onde $10 \leq \lambda \leq 100 \text{ c}$

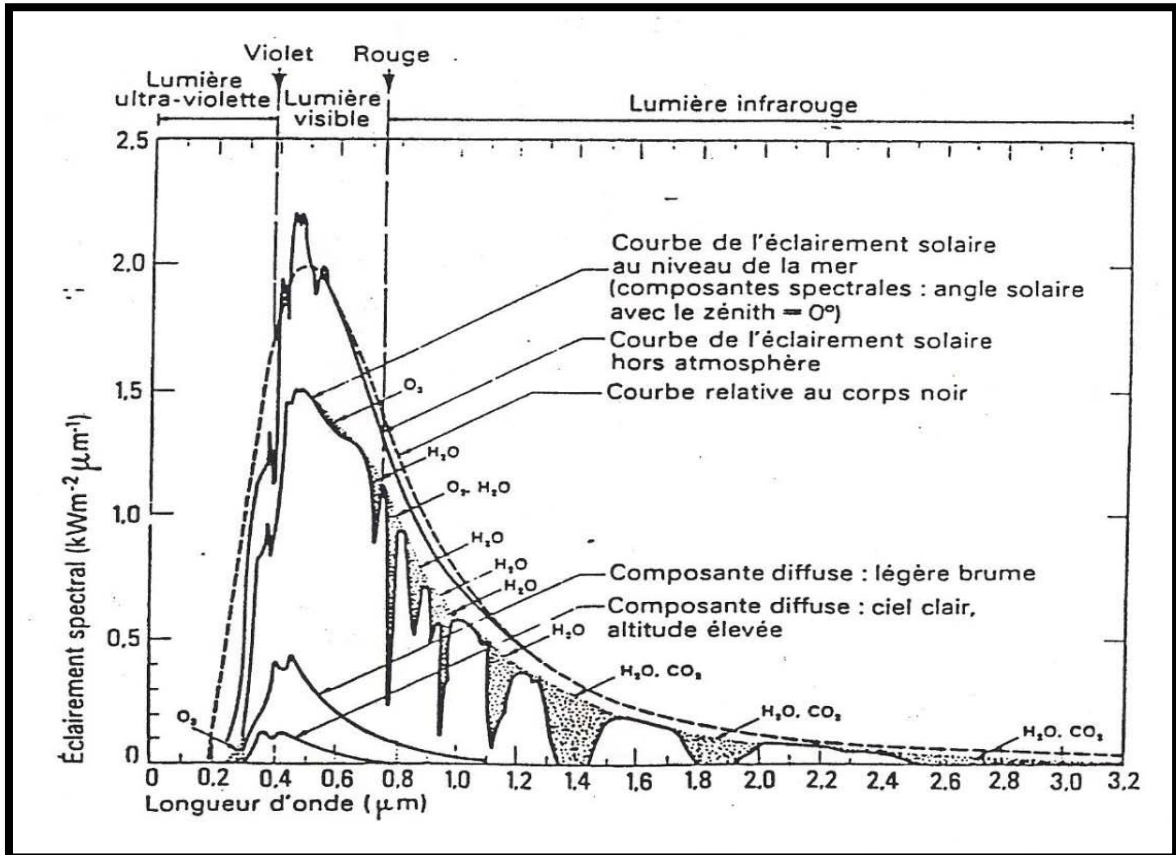
L'énergie de ces radiations est inférieure à 10^{-5} de l'ensemble du rayonnement solaire.

Les rayons lumineux ne sont pas tous d'origine thermique.

Le rayonnement solaire est connu par plusieurs caractéristiques dont la plus importante est la constante solaire, qui est une donnée fondamentale indépendante des conditions météorologiques

La deuxième caractéristique du rayonnement solaire est sa répartition spectrale, qui est à peu près celle d'un corps noir à 5800K. Le rayonnement solaire est une superposition d'ondes dont les longueurs vont de 0,25 micromètres à 4 micromètres [3, 12].

La figure (I.7) ci-dessous représentée l'allure du spectre solaire :



I.5.3 Le rayonnement solaire hors atmosphère :

Le rayonnement solaire hors atmosphère ne dépend que des paramètres astronomiques, il est caractérisé par une donnée fondamentale appelée constante solaire.

I.5.4 La constante solaire :

C'est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire [14].

La variation de la constante solaire suit la relation suivante [11] :

$$C^* = C_0^* + 0.033 \times \cos(0.948 \times n)$$

C^* : la constante solaire.

$C^*_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue [11].

n : le numéro du jour de l'année.

La figure (I.8) suivante présente l'évolution annuelle de la constante solaire :

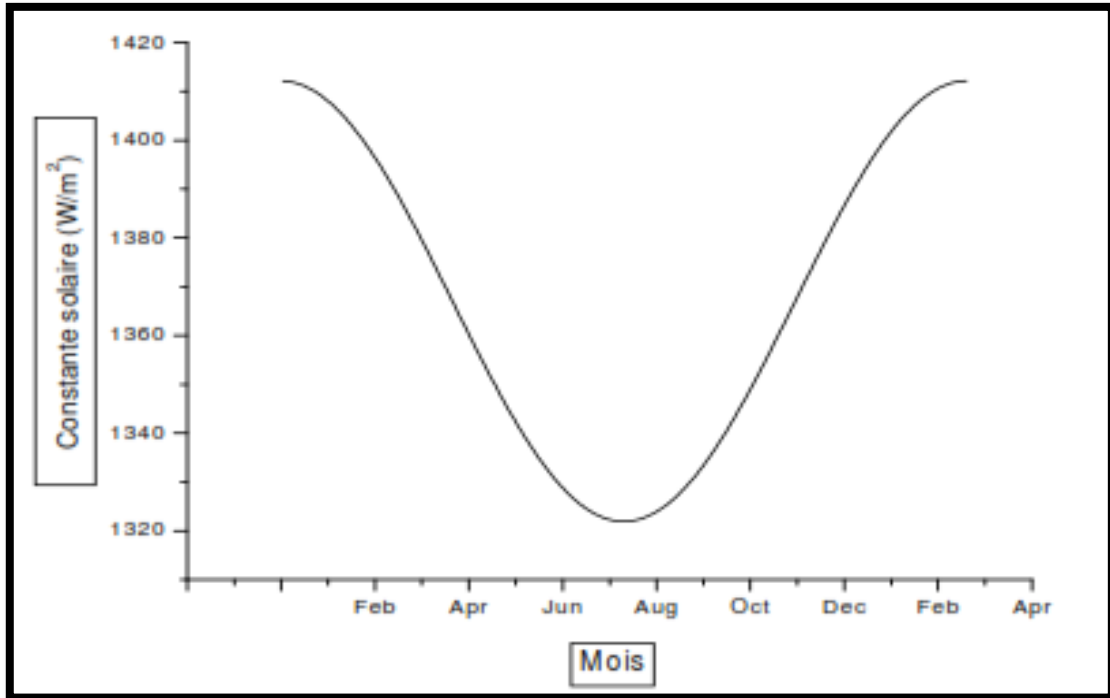


Figure I.8 Evolution annuelle de la constante solaire [11]

On remarque que le maximum est obtenu au mois de janvier avec la valeur 1413 W/m^2 et le minimum au début de juillet avec la valeur 1320 W/m^2 .

I.5.5 Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol :

L'atmosphère terrestre perturbe grandement et par des processus variés le flux de photons issu du soleil. Donc, après sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire peut être considéré comme la somme de deux composantes :

- ❖ **Le rayonnement direct** : est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère.

- ❖ **Le rayonnement diffus** : est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- ❖ **Le rayonnement global** : est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

La figure (1.9) ci-dessous est l'illustration des différents composants du rayonnement solaire au niveau du sol [3, 12].

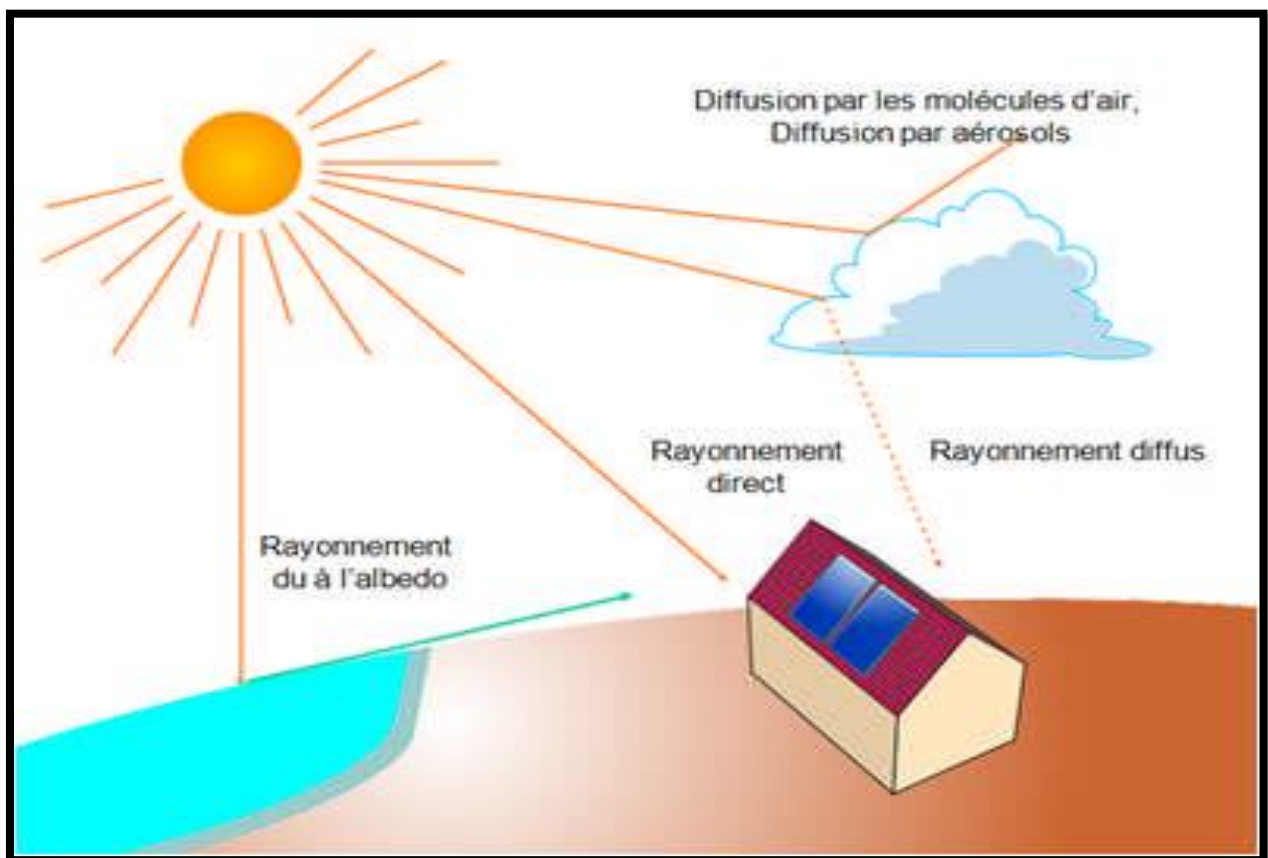


Figure I.9 Type de rayonnement solaire [15]

I.5.6 Le rayonnement solaire et son utilisation par l'homme :

L'énergie solaire est l'une des premières énergies utilisées par l'homme (après l'énergie musculaire). Elle est à l'origine de la formation des réserves d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et des flux d'énergie renouvelable (bois, vent, énergie hydraulique). En effet, le vent est créé par des différences de températures (et de pression), dont le rayonnement solaire est à l'origine.

Ce rayonnement est également responsable de l'évaporation de l'eau qui retombe sous forme de pluie et entraîne les roues des moulins ; et il est essentiel pour les organismes vivants qui sont à l'origine du charbon, du pétrole et du gaz naturel.

Plus récemment les centrales solaires, le four solaire, les chauffe-eau solaires, le chauffage solaire, les photopiles ou cellules photovoltaïques ont relancé l'intérêt pour une utilisation directe du rayonnement solaire [16].

I.6 Le gisement solaire :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [17].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure (I.10) ci-dessous :

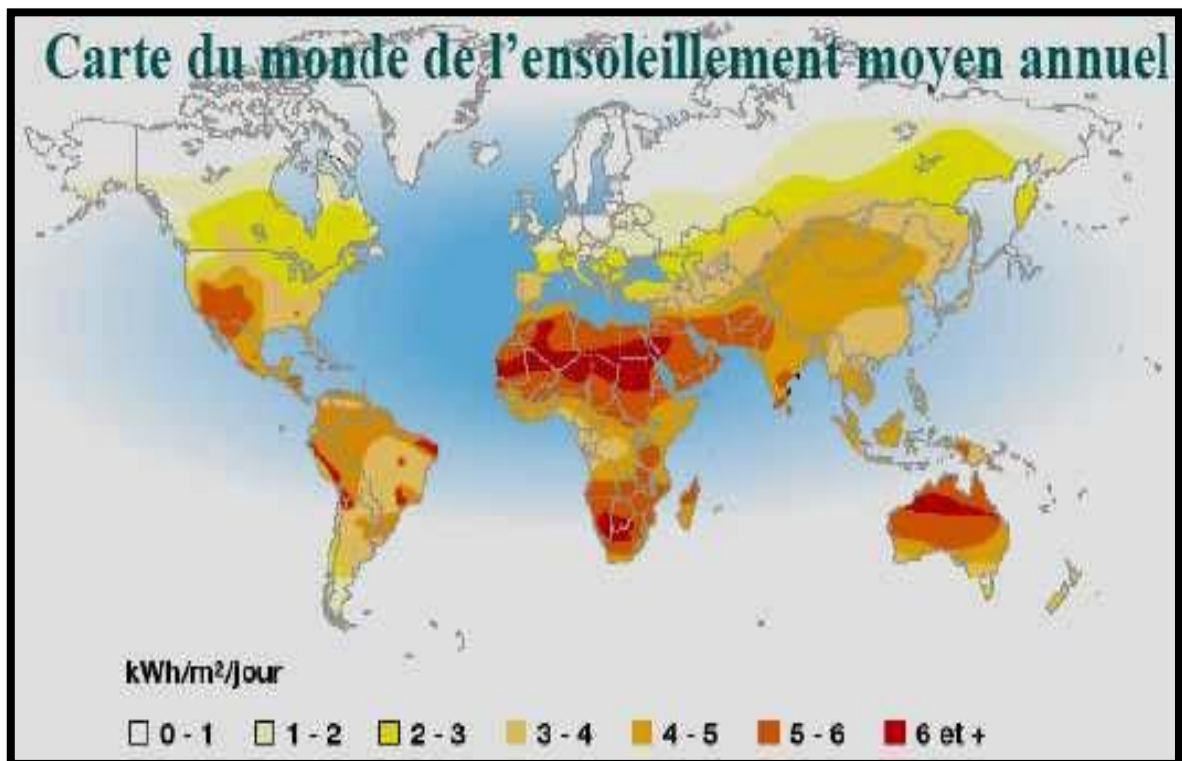


Figure I.10 Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [18]

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition de ce potentiel par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau (I.3) selon l'ensoleillement reçu annuellement [18] :

Tableau I.3 Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [18]

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heurs/an)	2650	300	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m²/an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [18].

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (figure I.11) [18].

La figure (I.11) ci-dessous montre la moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan :

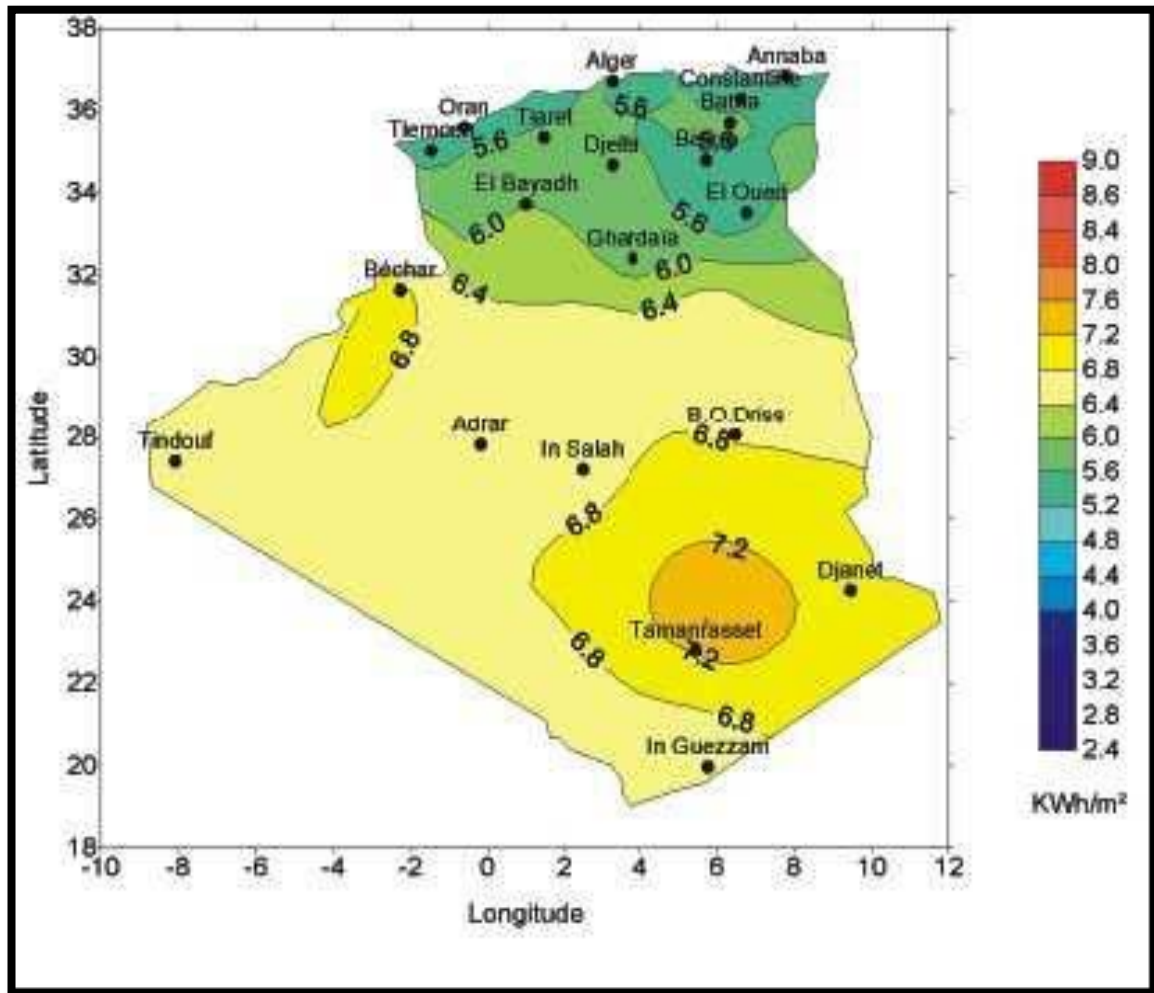


Figure I.11 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [19]

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M réparties sur tout le territoire national (figure I-12) [20]. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre.

Dans la figure (I.12) ci-dessous donne la répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie :

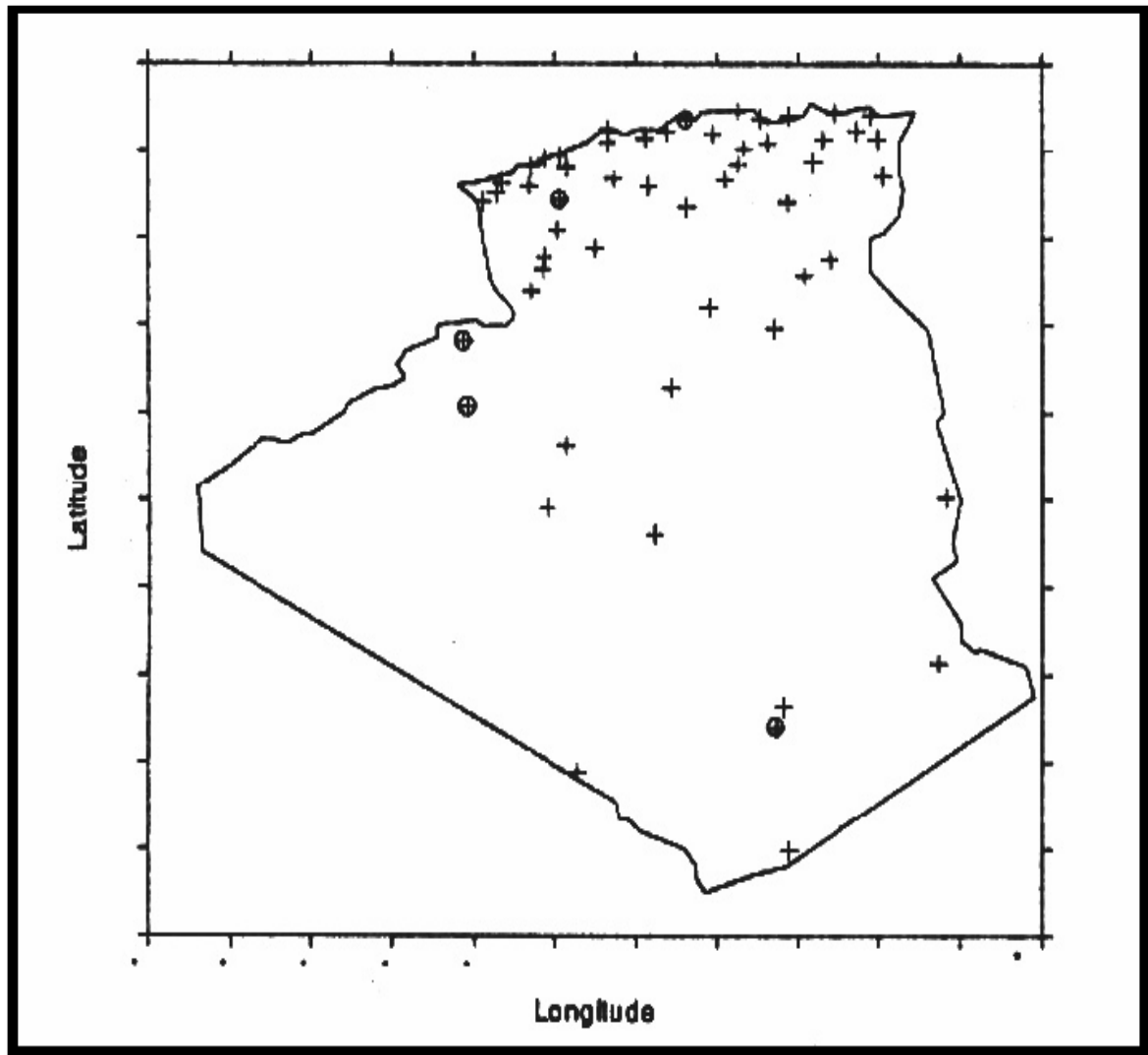


Figure I.12 Répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie

Chapitre II:

Présentation des deux convertisseurs énergétiques solaires

II.1 Introduction :

Aujourd'hui, les centrales solaires sont une technologie relativement moderne, avec la possibilité de son développement et est offert en tant que pays ensoleillés et être semblables à celles des parcs éoliens aux Etats côtiers.

Les endroits les plus prometteurs pour l'implantation de ces technologies sont ceux du sud-ouest des Etats Unis, l'Amérique du Sud, une grande partie de l'Afrique, les pays méditerranéens et du Moyen Orient, les plaines désertiques d'Inde et du Pakistan, la Chine, l'Australie, etc.

Dans beaucoup de pays du l'Univers, un kilomètre carré de terrain suffirait à générer jusqu'à 120 Gwh d'électricité par an, grâce à la technologie des centrales solaire. Cette énergie est équivalente à la production annuelle d'une centrale classique de 50 MW [24].

Le solaire photovoltaïque et le solaire thermodynamique tire avantage du rayonnement solaire pour produire de l'électricité. Mais ces deux technologies l'améliorent différemment. Alors que pour le photovoltaïque, le rayonnement solaire est directement converti en électricité, le solaire thermodynamique le converti en chaleur puis fait participer un partie de conversion électrique.

Souvent, le solaire thermodynamique appelée CSP (Concentrated Solar Power) désigne l'assortiment des techniques visant à changer l'énergie du rayonnement solaire en chaleur, puis à transformer cette chaleur en énergie mécanique et électrique au moyen d'un cycle thermodynamique moteur couplé à une génératrice électrique (par exemple une turbine et un générateur).

Le solaire thermodynamique est particulièrement destinée aux les endroits à fort ensoleillement et se démarque des centrales photovoltaïques par la possibilité de lisser plus facilement la production grâce à un stockage thermique tampon, moins onéreux que les systèmes de batteries.

Dans le cadre de ce chapitre nous nous intéresserons de l'étude des technologies de la Solaire thermodynamique à Concentration.

II.2 Principe du solaire thermodynamique :

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire n'est pas un processus direct. Le principe de fonctionnement de ce système dépend de l'énergie solaire étant peu dense, et qui sont nécessaires pour se concentrer afin d'obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne, où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur en énergie mécanique puis électrique. Ce principe est présenté dans la figure (II.1) ci-dessous :

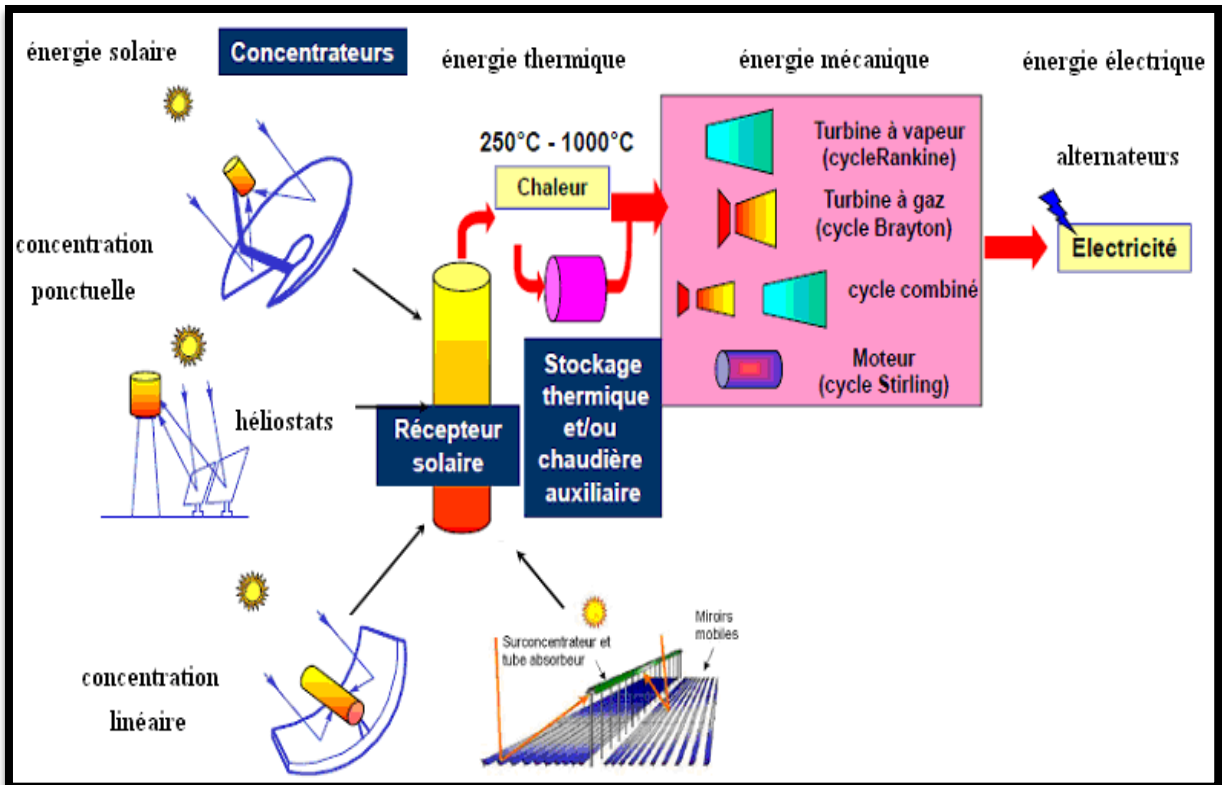


Figure II.1 Schéma global de principe du solaire thermodynamique

Mais quelle que soit la solution technologique retenue pour la captation des flux solaires ou la transformation de chaleur en électricité, on distingue les blocs fonctionnels interagissant entre eux par le choix du ou des fluides thermodynamiques :

- 1- La collecte et la concentration par le capteur du flux solaire sur le récepteur pour chauffer le fluide caloporteur.
- 2- Absorption sur les parois du récepteur, transformation en chaleur (production de chaleur)
- 3- transport et éventuellement stockage de chaleur (vapeur d'eau ou autre fluide caloporteur selon la température de source chaude et le système utilisé).

4- La conversion de chaleur en électricité à partir d'un cycle thermodynamique [22].

Ces solutions sont présentées dans la figure (II.2) suivante :

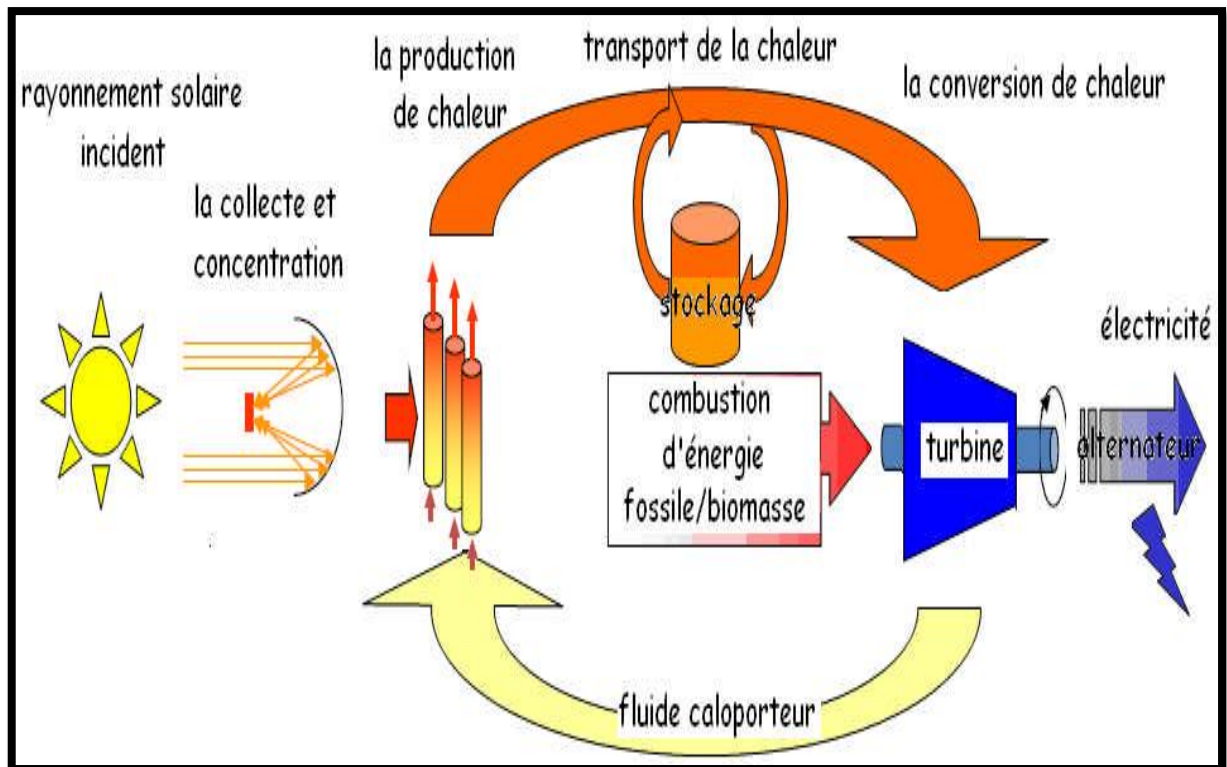


Figure II.2 Principe d'une centrale solaire thermodynamique

II.3 Les fluides caloporteurs et thermodynamiques et les systèmes de génération d'électricité :

II.3.1 Les fluides caloporteurs et thermodynamiques :

L'énergie thermique résultant du rayonnement solaire collecté est convertie grâce à un fluide caloporteur ensuite un fluide thermodynamique. Parfois, le fluide caloporteur est employé directement comme fluide thermodynamique. Pour le fluide caloporteur, il faut choisir un fluide en fonction de la température maximale admissible, cela nécessite le choix de la technologie et des matériaux du récepteur et conditionne la possibilité et la commodité du stockage. Dans ce cas on distingue comme fluides :

- **L'eau liquide** est a priori un fluide de transfert idéal. Elle offre un excellent coefficient d'échange et possède une forte capacité thermique. En outre, elle peut être utilisée directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine. Cependant son utilisation implique de travailler à des pressions très élevées dans les

récepteurs en raison des hautes températures atteintes, ce qui pose problème pour les technologies cylindro-paraboliques.

- **Les huiles** sont des fluides monophasiques qui présentent un bon coefficient d'échange. Leur gamme de température est limitée à environ 400 °C. C'est le fluide le plus couramment employé dans les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.
- **Les sels fondus** à base de nitrates de sodium et de potassium offrent un bon coefficient d'échange et possèdent une densité élevée, ils sont donc également de très bons fluides de stockage. Leur température de sortie peut atteindre 650 °C. Leur association avec un concentrateur à tour et un cycle de Rankine constitue une combinaison déjà éprouvée.
- **Les gaz** tels l'hydrogène ou l'hélium peuvent être utilisés comme fluides thermodynamiques et entraîner les moteurs Stirling qui sont associés aux collecteurs paraboliques.
- **Les fluides organiques** (butane, propane, etc.) possèdent une température d'évaporation relativement basse et sont utilisés comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine.
- **L'air** peut être utilisé comme fluide caloporteur ou comme fluide thermodynamique dans les turbines à gaz [21].

II.3.2 Différents systèmes de génération d'électricité :

Les systèmes de génération d'électricité le plus couramment utilisé pour récupérer la chaleur et produire l'électricité sont divers : le cycle de Rankine vapeur qui sont utilisés dans les concentrateurs cylindro-parabolique, le moteur Brayton et le moteur Stirling qui sont utilisés dans les concentrateurs parabolique.

Par conséquent, les différents systèmes de génération d'électricité transforment directement l'énergie solaire thermique en énergie mécanique puis en électricité.

II.4 Les concentrateurs solaires :

Les concentrateurs solaires concentrent les rayonnements solaires dans un point comme la tour solaire et le concentrateur parabolique, ou dans une ligne comme le concentrateur cylindro-parabolique et les miroirs de Fresnel. Généralement les concentrateurs

en lignes possèdent un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels, ce facteur caractérise la géométrie générale d'un concentrateur. Il représente le rapport entre la surface de captation (réflecteur) et la surface d'absorption (récepteur) [21].

$$\text{Facteur de concentration} = \frac{\text{surface du réflecteur}}{\text{surface du récepteur}} = \frac{S_{r\acute{e}f}}{S_r} = C.$$

Les trois systèmes à concentration les plus importants pour l'application à grande échelle de l'énergie solaire se distinguent par leurs dimensions élémentaires, (donc leur puissance), leurs performances optiques (concentration) et thermiques (température). Ces caractéristiques principales sont montrées dans la figure (II.3) suivant :

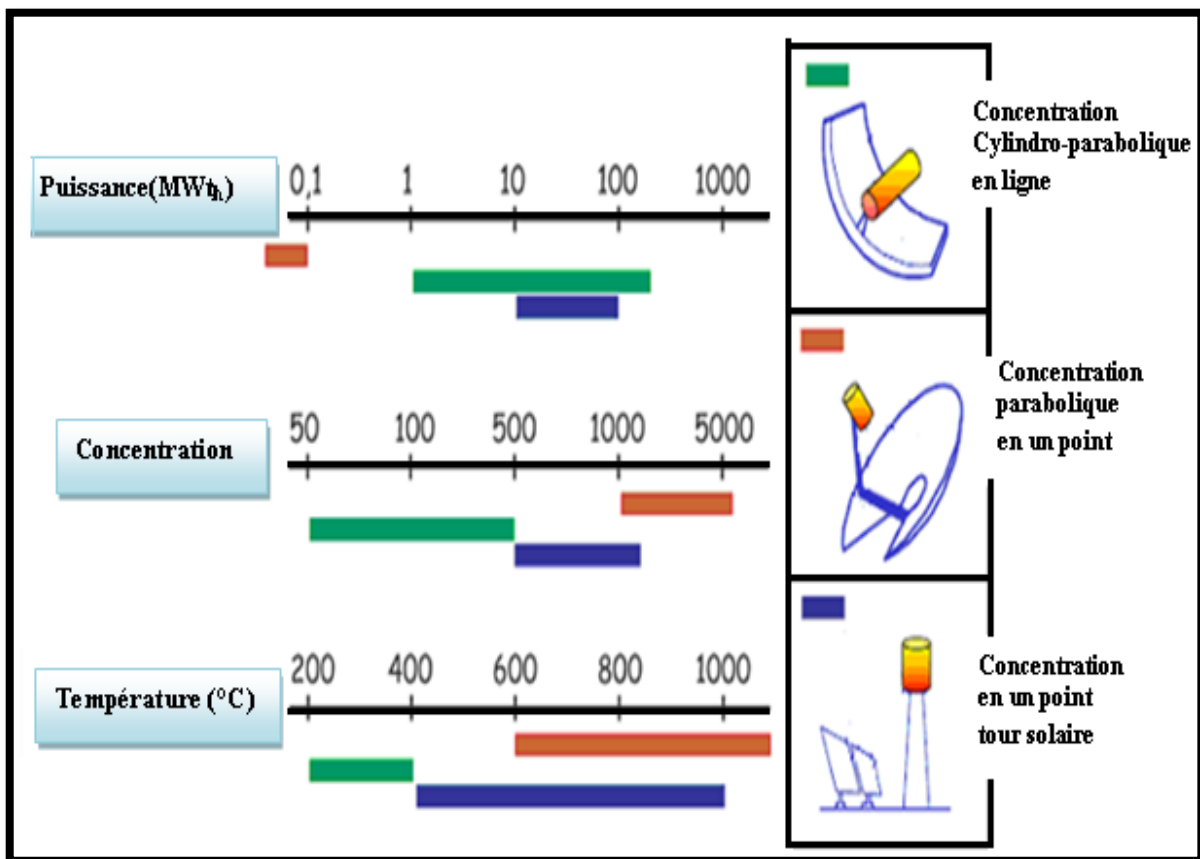


Figure II.3 Comparaison des technologies solaires à concentration

Nous pouvons générer des températures d'environ 1000°C et en utilisant les systèmes de concentrateurs solaires, ces derniers ont été développés principalement pour la production d'électricité.

Les caractéristiques techniques principales de ces centrales solaires à concentration (CSP) sont présentées dans le tableau (II.1) ci-dessous :

Tableau II.1 Caractéristiques des centrales solaires à concentration

Type de champ solaire	Facteur de concentration	Puissance (MWth)	Température d'opération (°C)
Cylindro-parabolique	50 – 500	1 - ≤ 100	200 – 400
Parabolique	1000 – 5000	≥ 0.1	600 - ≤ 1000
Tour solaire	500 - ≤ 1000	10 – 100	400 – 1000

D'après le tableau ci-dessus en remarquant que le facteur de concentration et la température sont plus grand dans le concentrateur parabolique par rapport le concentrateur cylindro-parabolique et la tour solaire. Mais la puissance est plus grande dans le concentrateur cylindro-parabolique que du concentrateur parabolique et la tour solaire.

Mais dans notre étude, nous nous concentrons sur le concentrateur cylindro-parabolique et le concentrateur parabolique.

II.5 Etude de deux différents types de convertisseurs solaire énergétique :

II.5.1 Concentrateurs cylindro-paraboliques :

La technologie de concentrateurs cylindro-paraboliques est la plus répandu et est actuellement utilisée par les plus puissantes centrales solaires au monde dans le Sud-ouest des Etats-Unis et dans le Sud de l'Espagne.

L'application la plus importante de cette technologie est la production de l'électricité. En 1984, la première centrale solaire commerciale, SEGS I était installée en Californie par la société Luz International Limited [23].

II.5.1.1 description du concentrateur :

Le concentrateur cylindro-parabolique est un capteur solaire à concentration à foyer linéaire qui utilise un réflecteur cylindrique de section parabolique : c'est le concentrateur le moins récent et le plus utilisé.

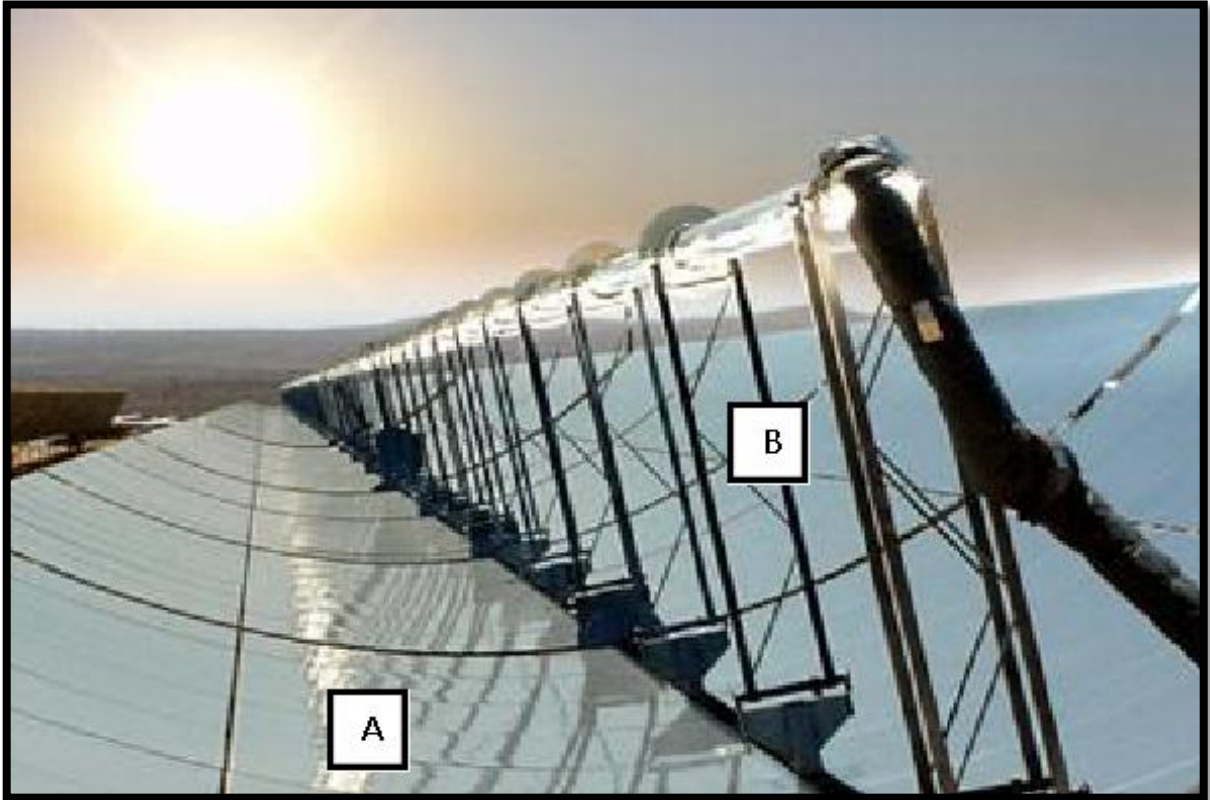


Figure II.4 Capteur cylindro-parabolique de la centrale de Nevada Solar One (USA)

A : réflecteur.

B : collecteur.

Le concentrateur cylindro-parabolique bâties dans les désertes et autres zones arides du monde, les centrales solaires à capteurs cylindro-paraboliques sont une filière du Solaire thermodynamique [31].

II.5.1.2 Principe de fonctionnement d'un concentrateur cylindro-paraboliques :

Dans ce type de centrale solaire, les miroirs réflecteurs sont rangés parallèlement et tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil et réunir le plus de rayonnement solaire possible. Ces rayonnements sont ensuite concentrés sur un tube horizontal, dans lequel circule un fluide colporteur qui peut atteindre une température de 400°C. Ce fluide servira à transporter la chaleur vers le réservoir thermique. L'énergie

récoltée par ce fluide est transféré à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine/générateur qui produit de l'électricité. Ce principe est présenté dans la figure (II.5) ci-dessous :

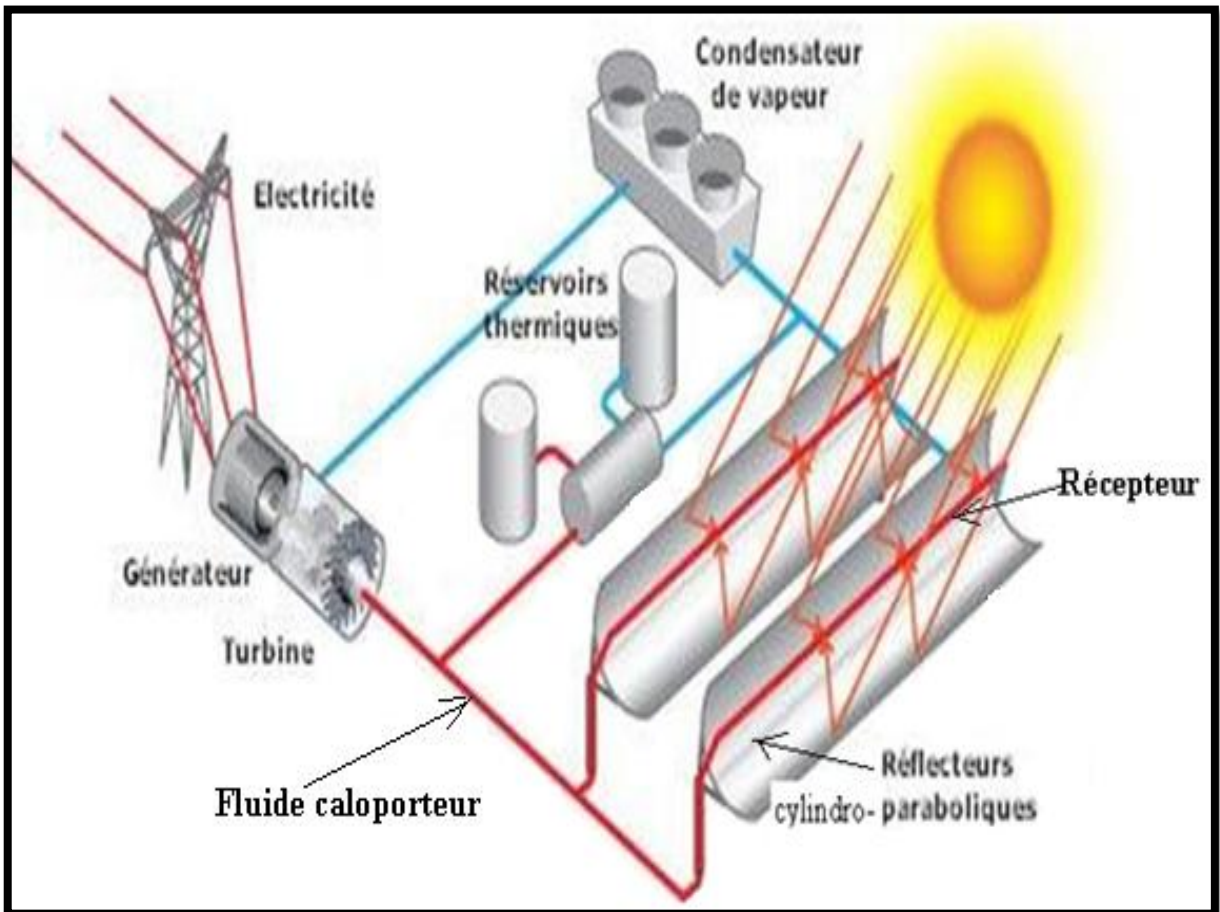


Figure II.5 Le capteur cylindro-parabolique fournissant de l'énergie électrique à partir d'énergie thermique

II.5.1.3 L'installation typique d'un concentrateur cylindro-parabolique :

De nombreuses installations ont déjà été éprouvées et commercialisées, dont certaines dans les années 80.

L'installation typique d'un concentrateur cylindro-parabolique est composée de trois éléments principaux : Le champ solaire; Le système de transfert de la chaleur; Le système de génération électrique (Turbine + Générateur) [26].

Ces éléments sont présentés dans la figure (II.6) Suivant :

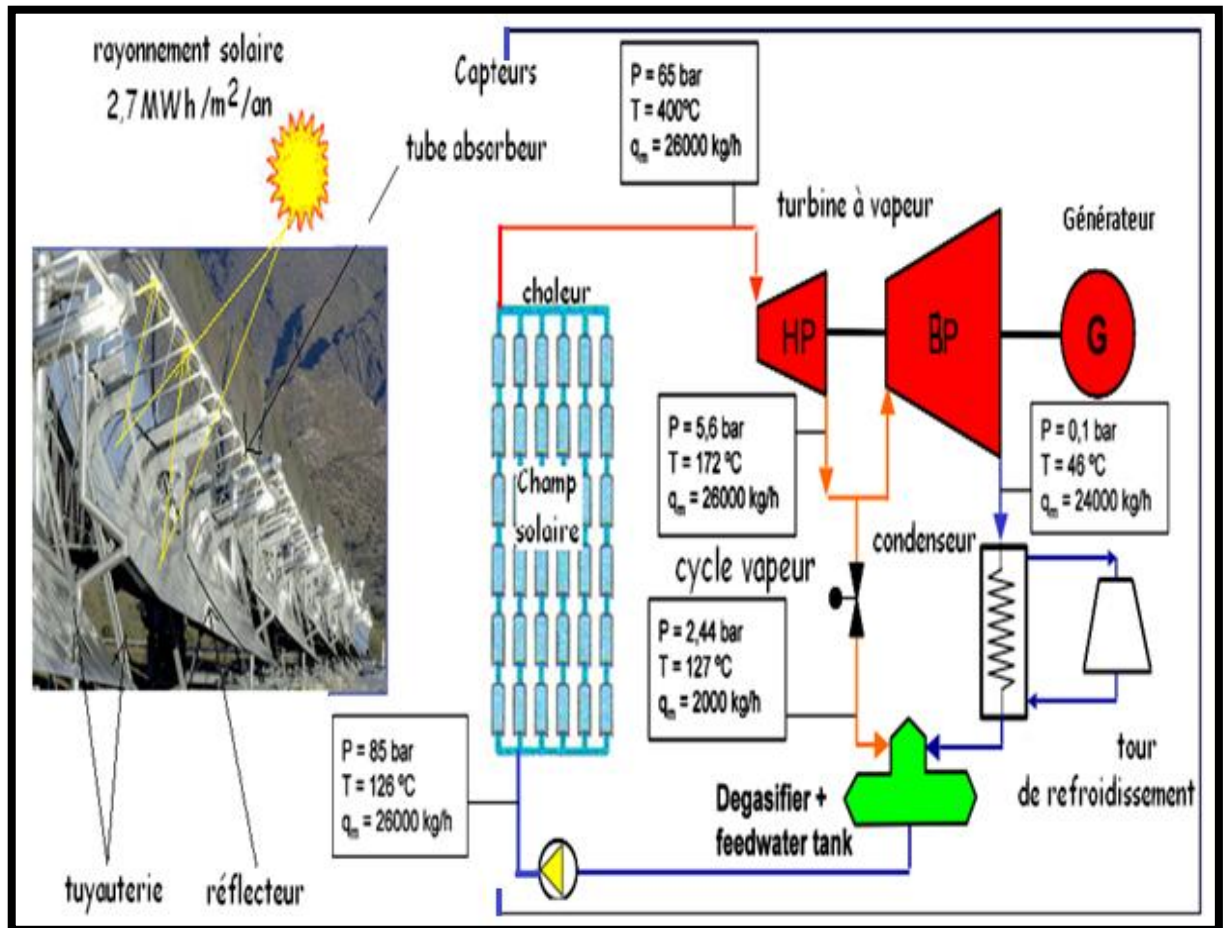


Figure II.6 Configuration typique d'une centrale à collecteurs cylindro-Paraboliques [25]

Le champ solaire transforme le rayonnement solaire en énergie thermique. Suivant la puissance et la température requise, la taille du champ solaire va changer. Il est composé de collecteurs reliés en série qui, à leur tour, sont connectés en parallèle.

Ainsi, ces différents collecteurs, comme leur nom l'indique, collectent les rayons du soleil. Leur rôle est de transmettre le plus de chaleur possible au fluide. Le collecteur est donc un composant essentiel du champ solaire. Il est fait d'un miroir (réflecteur parabolique), d'une composition métallique, d'un tube récepteur et d'un système de poursuite solaire [27].

Les miroirs sont composés de verre indigent en fer, dont la transmissivité atteint 98%. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure, et d'un enduit spécial de protection. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident. Le facteur de concentration pour un capteur cylindro-parabolique est de voisinage 80 [26].



Figure II.7 Champ de collecteurs en Californie [26]

Les collecteurs sont également équipés d'un mécanisme de poursuite. C'est le système qui permet de suivre le rayonnement solaire : il adapte en permanence le capteur solaire de manière à ce que le rayonnement solaire incident soit toujours perpendiculaire au réflecteur. Ainsi, le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole formé par les miroirs, et concentré dans un tube récepteur lequel circule le fluide caloporteur.

La structure métallique permet de relier ces différents composés entre eux aux importantes contraintes mécaniques liées au vent. Néanmoins, collecter les rayons du soleil et transformer le rayonnement en énergie thermique ne suffit pas, il faut également relier le champ solaire à un système de transfert de chaleur et de génération électrique.

II.5.1.4 Système de transfert de chaleur et de génération électrique :

II.5.1.4.1 La turbine à vapeur :

C'est un moteur thermique à combustion externe qui fonctionne selon le cycle de Rankine.

Ce cycle se caractérise par un changement d'état. Elle est présentée dans la figure (II.8) ci-dessous :

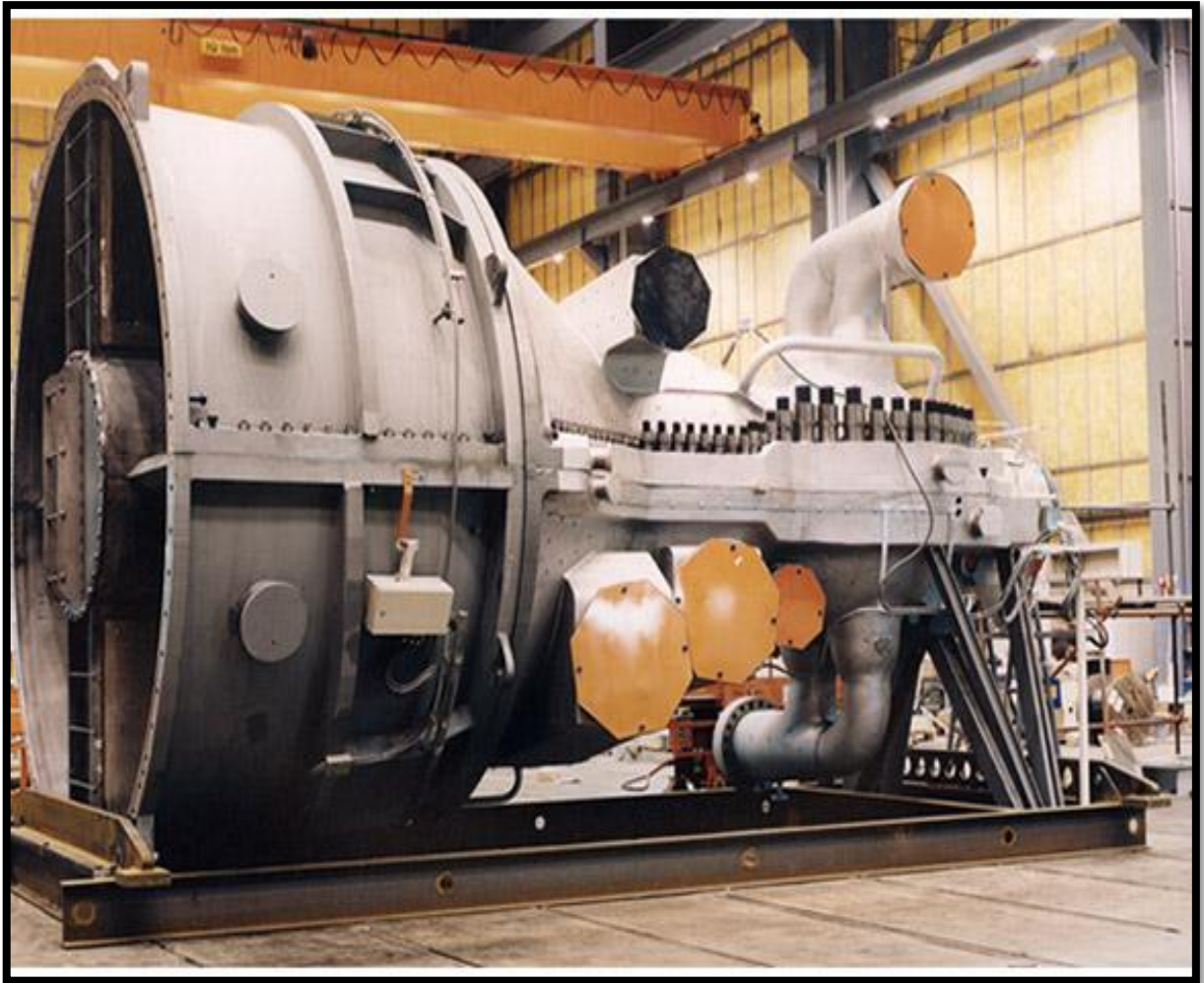


Figure II.8 Image réelle de la turbine à vapeur SST-900[28]

Ainsi, le fluide qui circule dans le tube récepteur est chauffé par le rayonnement solaire et mis sous pression par une pompe. Le fluide utilisé est généralement l'eau. Ensuite, la chaleur est émissaire vers une chaudière dans laquelle l'eau est évaporée. Cette vapeur passe ensuite dans une turbine où elle est détendue et refroidit afin de fournir de l'énergie mécanique. Enfin, la vapeur est condensée au contact de la source froide sous vide partiel. L'énergie mécanique créée est transformée en énergie électrique grâce à un alternateur selon la figure (II.9) suivant :

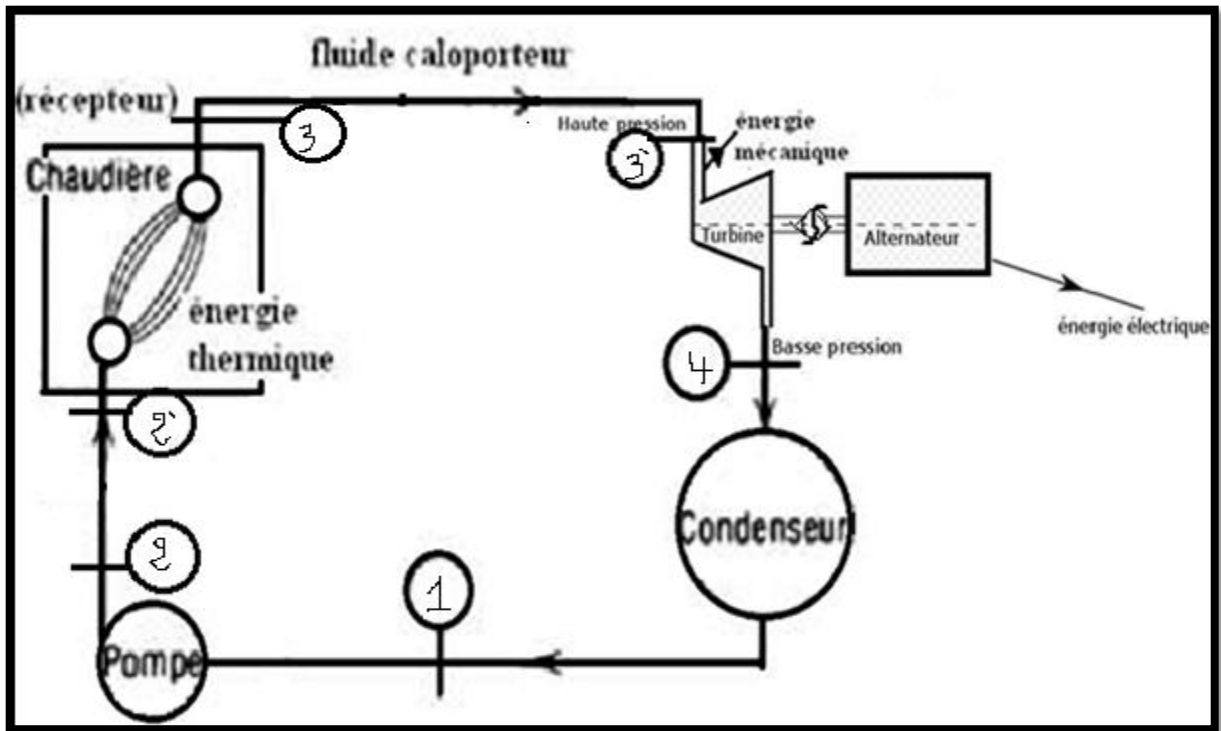


Figure II.9 Schéma d'une machine motrice à vapeur simple

II.5.1.4.2 Le cycle de Rankine vapeur :

La chaleur est transportée par le fluide caloporteur (une huile thermique) à partir de les récepteurs jusqu'aux échangeurs, où l'eau est évaporée. Cette vapeur est ensuite détendue dans la turbine pour générer l'électricité. La température de la vapeur à l'entrée de la turbine doit être supérieure à 300°C. A une température plus basse, des fluides organiques sont utilisés : on parle alors de cycle de Rankine organique.

Le cycle de base d'une turbine à vapeur est un cycle de Rankine qui comprend deux isobares et deux adiabatique et peut être décrit dans un diagramme entropique à l'aide de cinq étapes.

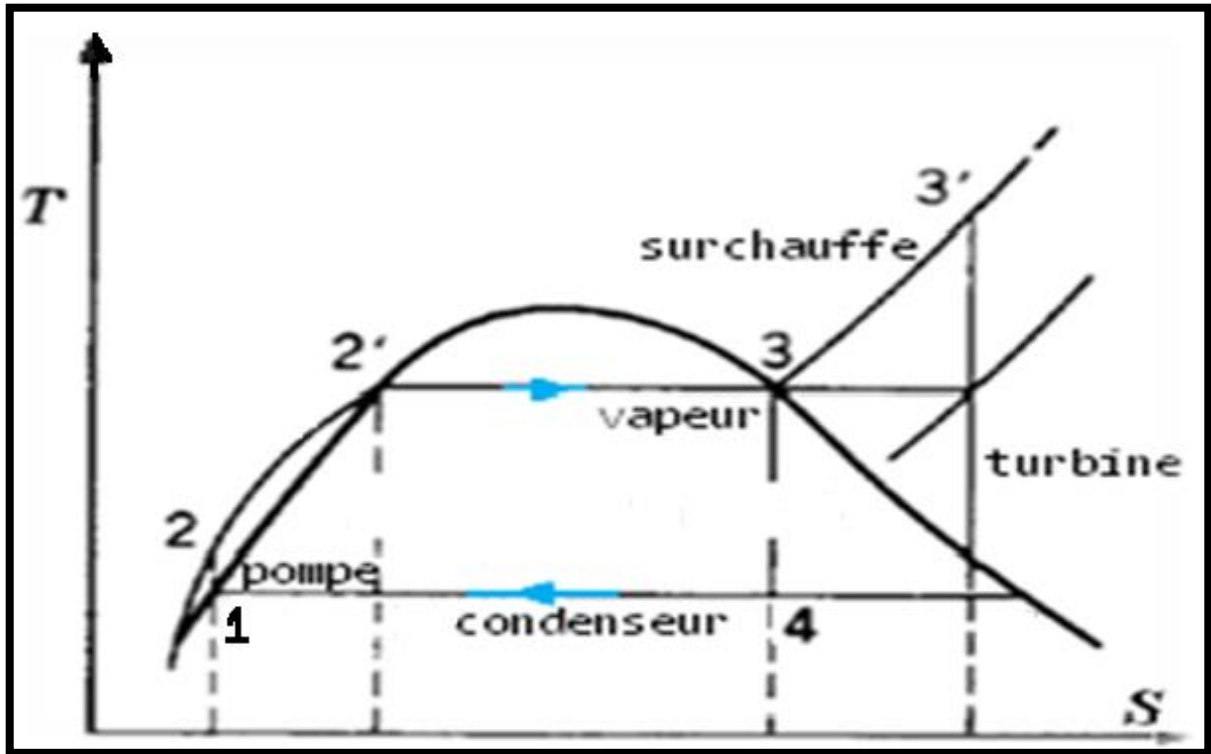


Figure II.10 Cycles de Clausius-Rankine à vapeur simple

II.5.1.5 L'exploitation de la technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques en Algérie :

L'Algérie considère des occasions idéales d'aujourd'hui de combiner le gaz naturel à l'énergie solaire grâce à l'intégration de la base de l'énergie solaire est concentrée à concentrateurs cylindro-paraboliques. Dans une première étape une centrale électrique hybride (gaz /solaire) est actuellement en service au sud de l'Algérie (Hassi Rmel) avec 224 concentrateurs d'une surface de 180000 m² des réflecteurs paraboliques et d'une puissance électrique solaire moyenne de 25MW [29].

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel de l'Algérie en énergie solaire, l'énergie moyenne reçue sur une surface horizontale soit près de 1700 KWh/m² annuellement aux régions côtières, 1900 KWh/m²/an aux hauts plateaux et 2650 KWh/m²/an aux régions Sahariennes. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque. Le solaire devrait atteindre d'ici à 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité selon le décret 04-92, publié au journal officiel de l'Algérie en Mars 2004 [30].



Figure II.11 La centrale électrique hybride de Hassi Rmel [29]

Le tableau (II.2) présente les nouveaux projets de production d'énergie électrique dans le plan d'investissement Algérien au titre du programme Moyen-Orient et Afrique du nord CSP (Middle East and North Africa MENA), avec une capacité prévue de 210 MW [30].

Tableau II.2 Les nouveaux projets CSP en Algérie

Endroit de l'installation	Capteur de l'installation	L'année
Maghaier	70 MW	2014
Naama	70 MW	2016
Hassi Rmel	70 MW	2018

II.5.1.6 Les avantages et les inconvénients :

II.5.1.6.1 Les avantage :

- Source d'énergie inépuisable et gratuite.
- Pas d'émission polluante.
- Peu fonctionner sans intermittence.

II.5.1.6.2 Les inconvénients :

- Nécessite une poursuite sensible et couteuse pour une zone climatique peut ensoleiller.
- Surface au sol importante.

II.5.2 Concentrateur parabolique :

Il y a 30 ans de nombreux prototypes de concentrateurs paraboliques sont apparus et l'objectif était d'augmenter les performances et de réduire les coûts.

Ces images ci-dessous montrent des exemples de nombreux prototypes de concentrateurs paraboliques :

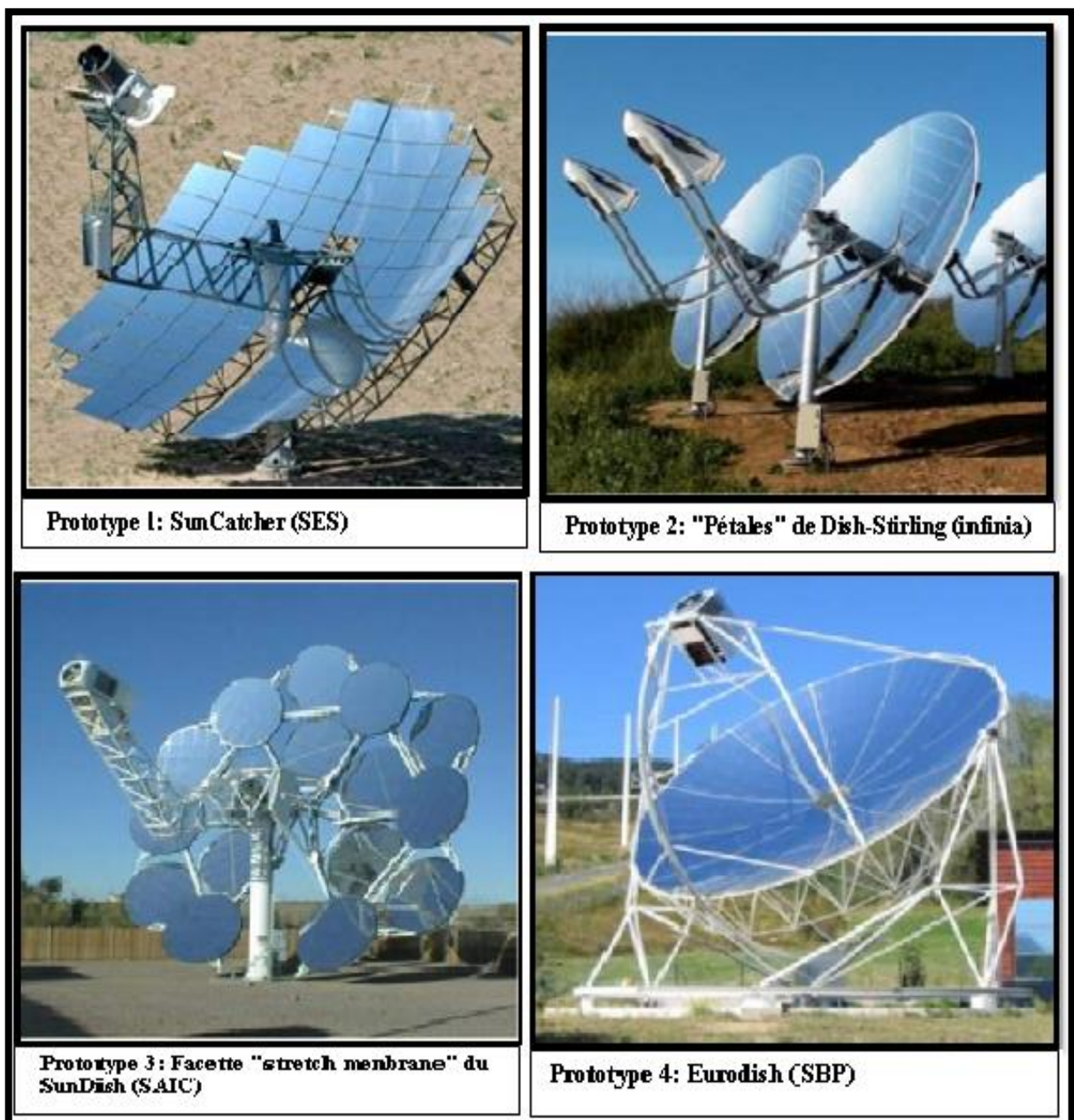


Figure II.12 Nombreux prototypes de concentrateurs paraboliques

II.5.2.1 Description :

Le concentrateur parabolique représenté schématiquement sur la figure (II.13), est composé d'une surface réfléchissante (Parabole) qui concentre le rayonnement solaire incident à son foyer (Récepteur). La contrainte majeure est la nécessité de mobiliser la parabole selon deux axes de rotation pour assurer la poursuite du soleil. Ceci entraîne une limitation de la dimension unitaire de ce concentrateur.

Trois types des surfaces réfléchissantes ont été utilisés, la première possibilité consiste en un dépôt d'argent ou d'aluminium à l'arrière d'une plaque de verre, la deuxième est basée sur le même principe mais on remplace la plaque de verre par un film plastique et la troisième possibilité consiste en des feuilles d'aluminium polies. Ces feuilles sont peu chères mais ont une faible réflectivité et une faible longévité.

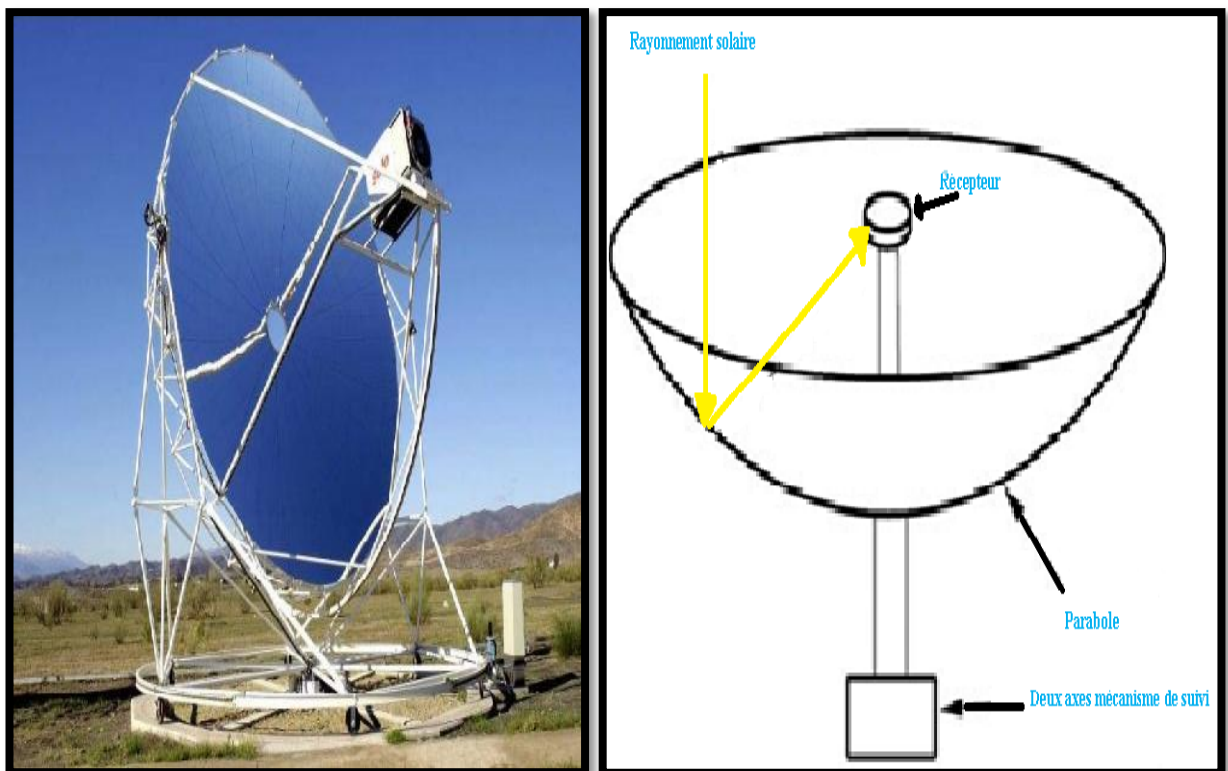


Figure II.13 Schéma d'un concentrateur solaire parabolique

II.5.2.2 Principe de fonctionnement d'un concentrateur parabolique :

Le principe de fonctionnement, lorsque la lumière tombe sur une surface réfléchissante, elle rebondit sur le même angle. Le concentrateur solaire parabolique a été conçu avec des miroirs incurvés de sorte que toute la lumière reflète en un seul point, peu importe où elle frappe la surface du concentrateur. La distance entre la surface du

concentrateur et le point où la lumière se concentre est la distance focale. Le capteur solaire réfléchit les rayons du soleil sur un point appelé point de convergence. Un concentrateur parabolique solaire correspond donc à un ensemble de miroirs incurvés qui concentrent tous les rayons du soleil incidents en un seul point correspondant au foyer ponctuel. Le miroir parabolique intercepte le rayonnement solaire. Les rayons arrivant sur le concentrateur parabolique sont réfléchis vers le point de convergence où un récepteur a été mis en place. Le rayonnement solaire se concentre sur le récepteur sur lequel la température monte. L'énergie thermique reçue est ensuite transmise au moteur Stirling. Si un moteur Stirling est installé au foyer du concentrateur, la chaleur du soleil va dilater un fluide (air, hélium, hydrogène) comprimé afin de produire de l'électricité. En effet, en ce point, le moteur Stirling récupère la totalité de la chaleur fournie par le soleil au réflecteur. Il fonctionne grâce à la montée en température et en pression d'un gaz contenu dans une enceinte fermée. Le moteur Stirling permet de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique. Un générateur directement couplé au vilebrequin du moteur, appelé génératrice de courant alternatif, transforme l'énergie mécanique en courant alternatif (énergie électrique).

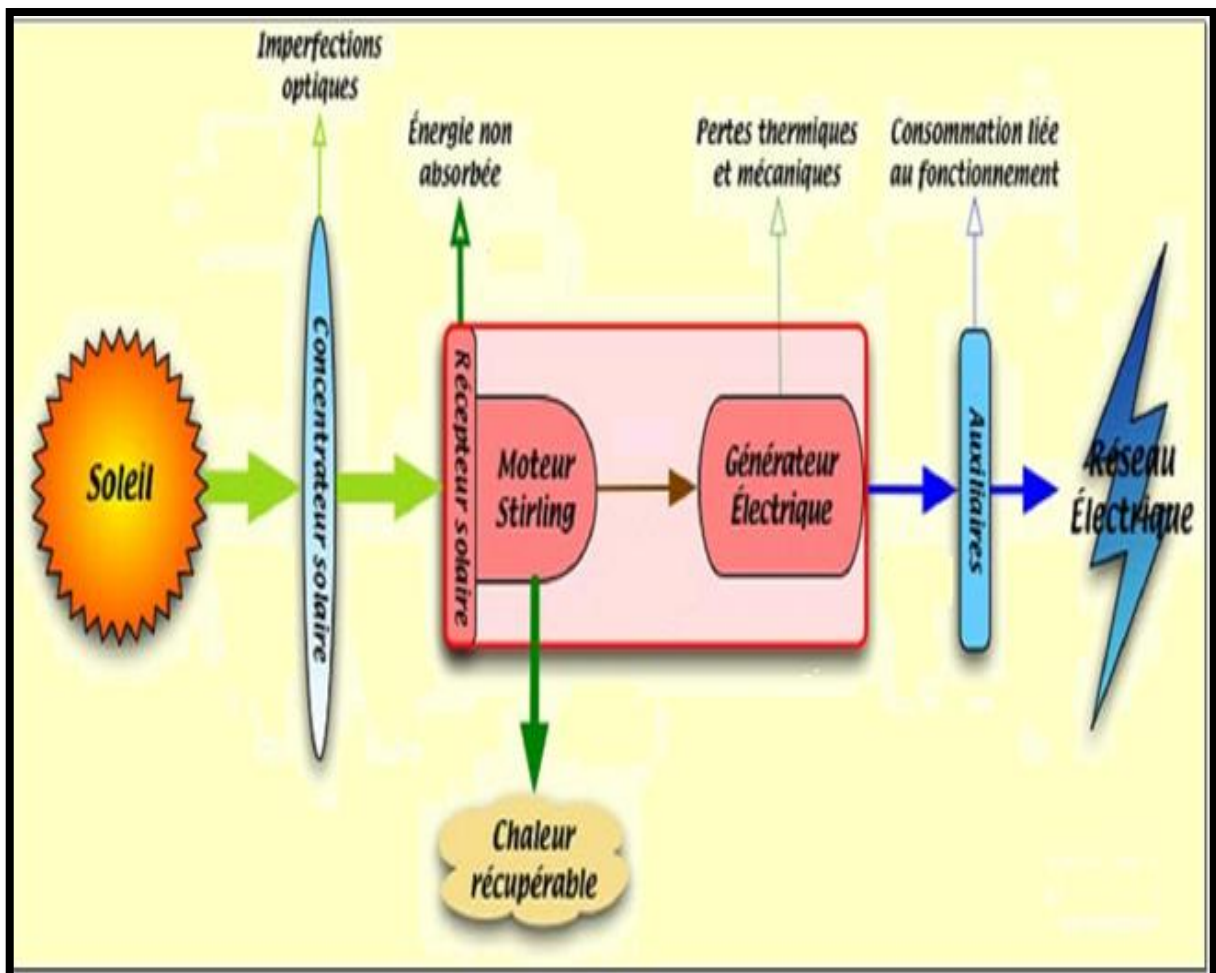


Figure II.14 Principe de fonctionnement d'un convertisseur parabole-Stirling

Le rendement du machine en est nettement amélioré puisqu'il y a une différence de près de 1000°C. Le laboratoire PROMES du CNRS possède deux paraboles. La première a une surface collectrice de 56,7m² et possède un rendement moyen de 14,7% pouvant aller jusqu'à 18%. La seconde parabole ayant une surface de 42m² et un récepteur solaire amélioré sur le moteur Stirling atteint un rendement moyen de 19% (rendement de pointe 23%) [27].

II.5.2.3 Système de transfert de chaleur et de génération électrique :

II.5.2.3.1 Le moteur Stirling :

Le moteur Stirling (du nom de son inventeur anglais Robert Stirling) est un moteur à combustion externe, c'est à dire que la source de chaleur est en dehors du moteur et peut être de différentes nature : gaz, bois, ...ou la concentration des rayonnements solaires par exemple. Il n'y a pas d'explosions dans ce moteur, il s'agit simplement de la compression et la détente d'un simple gaz enfermé à l'intérieur du moteur Stirling. Le moteur Stirling s'avère être celui qui convient le plus pour un concentrateur parabolique.



Figure II.15 Moteur Stirling

Le moteur présente un "point chaud" et un "point froid", la source chaude est assurée par le foyer du concentrateur parabolique et la source froide est assurée par l'air ambiant brassé par un ventilateur à l'arrière du moteur.

Le gaz circule entre ces deux points et subit ainsi alternativement une compression et une dilatation, cette pulsation du gaz est utilisée pour entraîner un piston qui permet de récupérer l'énergie mécanique.

Il existe différents types de moteurs Stirling à savoir : le moteur Stirling de type Alpha, le Bêta, le Gamma mais aussi des machines non conventionnelles, moins diffusées ou restant au stade du prototype telles que le Martini, le Ringbom, le free piston Sterling engine, le moteur à double effet, le moteur rotatif et la génératrice thermodynamique [27].

II.5.2.3.2 Le cycle de Stirling :

Le cycle de Stirling idéal est représenté sur la figure (II.16). Il comprend 4 transformations :

- ✓ 1-2 : Compression isotherme
- ✓ 2-3 : Echauffement isochore
- ✓ 3-4 : Expansion isotherme
- ✓ 4-1 : Refroidissement isochore

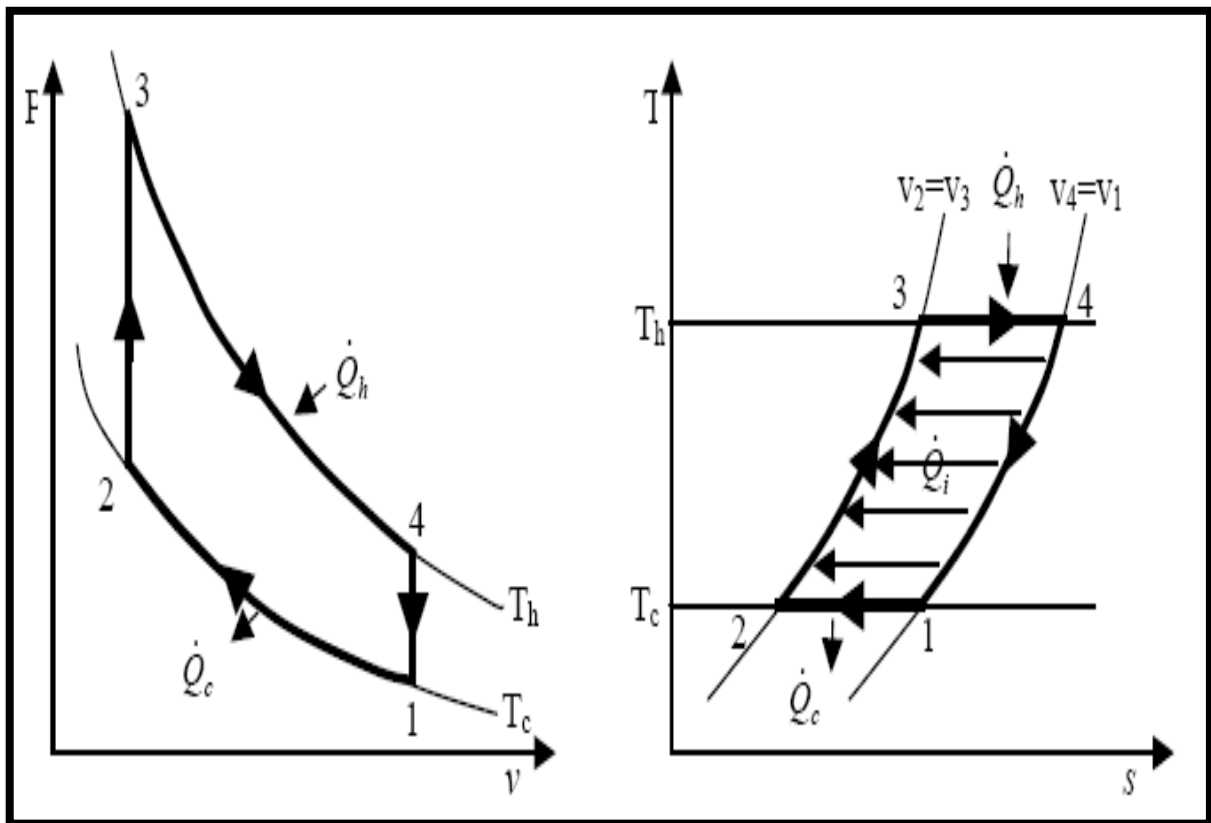


Figure II.16 Cycle de Stirling idéal

Le rendement du cycle de Stirling idéal est égal au rendement de Carnot, parce que l'expansion et la compression sont isothermes.

Pourtant, de nombreuses irréversibilités existent dans le cycle qui réduisent ce rendement, particulièrement dans le régénérateur.

Dans le cas des capteurs paraboliques, la source chaude si située généralement à une température de 700 °C et la source froide est assurée par l'air ambiant, brassé par un ventilateur à l'arrière du moteur. Le rendement chaleur-électricité du moteur Stirling à ces températures atteint 40%.

Le principal avantage du moteur Stirling est que son fluide de travail (hélium ou hydrogène à une pression de 200 bars) est totalement isolé de son environnement. Le transfert de chaleur s'effectue de façon externe, ce qui simplifie singulièrement la conception du système [23].

II.5.2.3.3 La turbine à gaz :

La turbine à gaz (au sens large du terme), est le siège de l'ensemble de transformation constituant le cycle thermodynamique décrit par le fluide ; donc, la turbine à gaz est assimilée aux moteurs à combustion interne mais les transformations s'effectuent dans des enceintes séparées et juxtaposées dans l'espace. Elle est présentée dans la figure (II.17) ci-dessous :

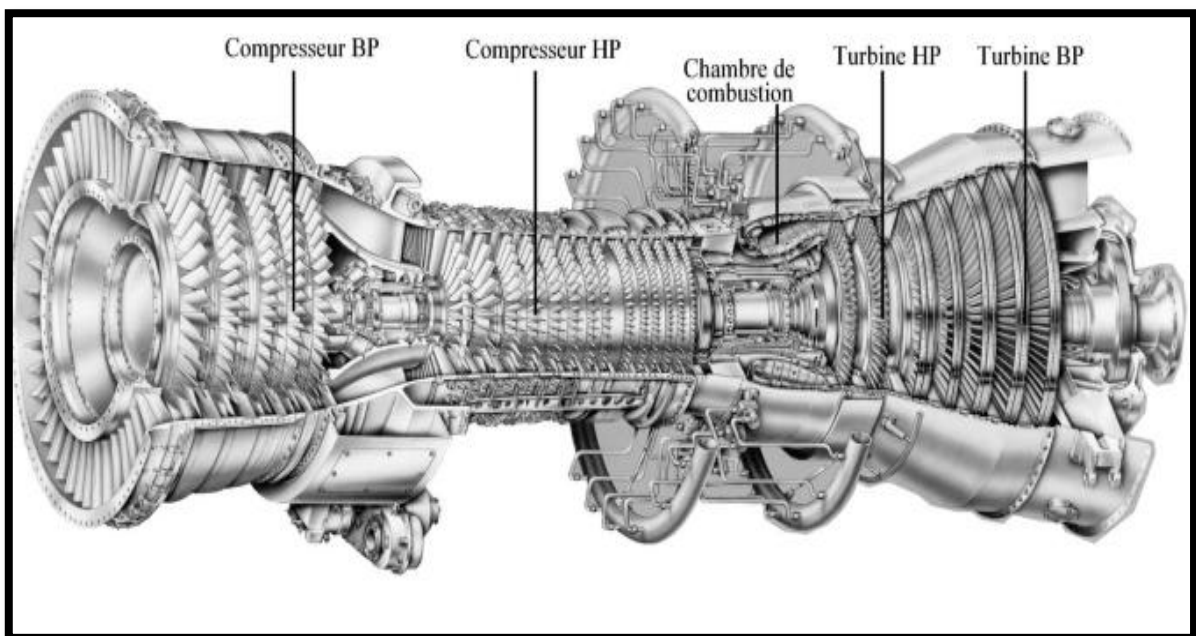


Figure II.17 Schéma globale d'une turbine à gaz

II.5.2.3.4 Le cycle de Brayton:

La compacité des turbines à gaz, en fait également un candidat très adapté aux capteurs paraboliques. Il n'existe cependant actuellement aucun exemple de capteur

parabolique utilisant ce système, principalement à cause du design plus complexe et d'un rendement inférieur. Les prédictions évaluent le rendement chaleur-électricité de la turbine à gaz pour le capteur parabolique à 30%.

Le schéma d'intégration du cycle de Brayton sur le concentrateur solaire et représenté à la figure (II.18) suivant :

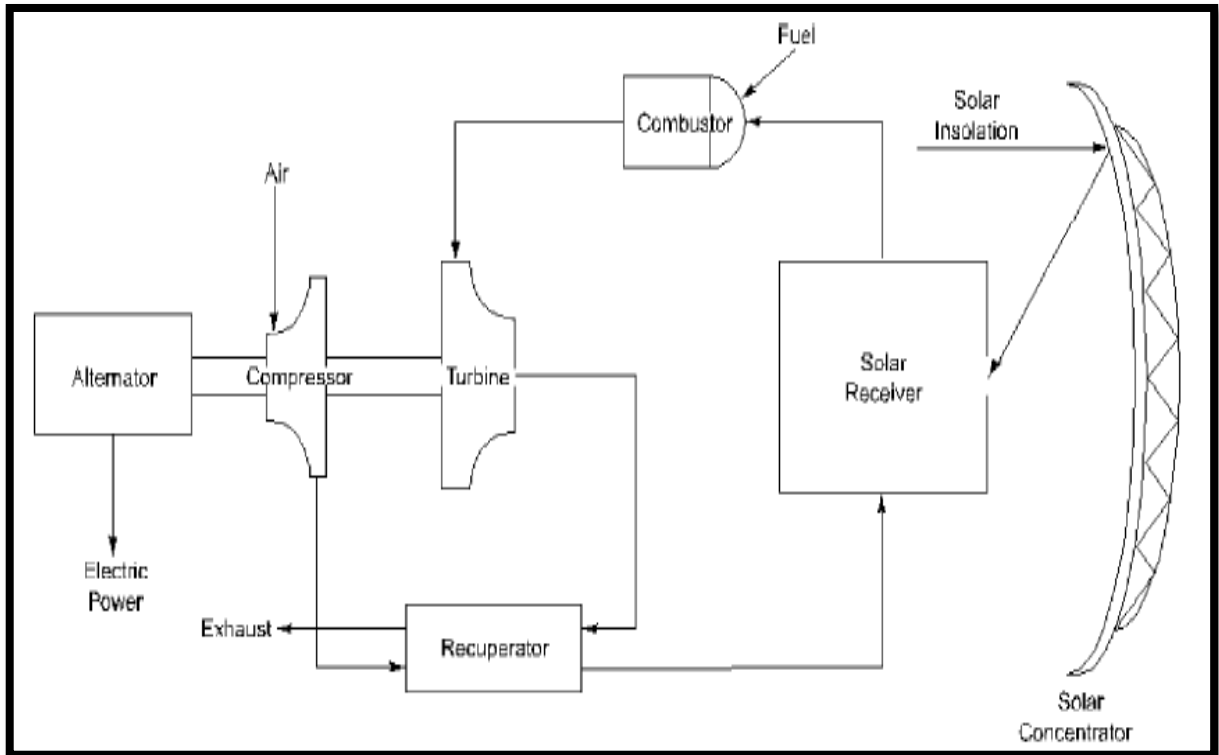


Figure II.18 Système de capteur parabolique avec un cycle de Brayton

II.5.2.4 Les avantages et les inconvénients de concentrateur parabolique :

II.5.2.4.1. Les avantage :

- ✓ Source d'énergie inépuisable et gratuite.
- ✓ Pas d'émission polluant.
- ✓ Bon rendement.
- ✓ Petite unités indépendantes.
- ✓ ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés non raccordés au réseau électrique

II.5.2.4.2. Les inconvénients :

- ✓ Fonctionnement par intermittence.

II.6 Avantages et inconvénients des systèmes de concentration :

II.6.1 Les avantages :

- Ils peuvent atteindre des températures très élevées. Les températures élevées conviennent à la production d'électricité au moyen des méthodes traditionnelles, comme la turbine à vapeur ou quelque réaction chimique directe à haute température.
- Bon rendement. En concentrant les rayons du soleil, les systèmes actuels peuvent obtenir un meilleur rendement que de simples cellules solaires.
- Une plus grande surface peut être couverte en utilisant des miroirs relativement peu coûteux plutôt que des cellules solaires onéreuses.
- La lumière concentrée peut être redirigée vers un lieu adapté via un câble à fibres optiques. Par exemple, pour éclairer des bâtiments.
- Il est possible de stocker la chaleur en vue de produire de l'énergie par temps nuageux et la nuit, bien souvent en stockant le fluide chauffé dans des ballons souterrains. Des sels fondus ont été utilisés avec succès.

II.6.2 Les inconvénients :

- Les systèmes de concentration requièrent un pointeur solaire pour que les rayons du soleil convergent en permanence vers le capteur.
- Incapacité à fournir de l'énergie dans des conditions de lumière diffuse. Les cellules solaires sont capables de fournir une certaine capacité même si le ciel se couvre légèrement, mais la puissance de sortie des systèmes de concentration est limitée.

Chapitre III:

Bilan énergétique des convertisseurs de l'énergie solaire

III.1 Introduction :

Au vue des recherches et réalisations dans le domaine d'énergie solaire, la conception d'un convertisseur thermodynamique de l'énergie solaire nécessite une analyse de son bilan énergétique contient des conditions d'utilisation afin d'évaluer son rendement. Ce dernier est le paramètre le plus important d'appréciation de l'efficacité et de la performance d'un système. On a besoin d'un modèle permettant d'évaluer l'influence des divers paramètres caractéristiques du dispositif pour effectuer une analyse.

Pour cela nous nous intéressons à faire une étude générale du bilan énergétique d'un convertisseur solaire.

III.2 Changement thermodynamique de l'énergie solaire :

On distingue trois étapes successives de Transformer la chaleur du soleil en électricité et/ou chaleur par voie thermodynamique (racontées dans la figure III.1) ci-dessous :

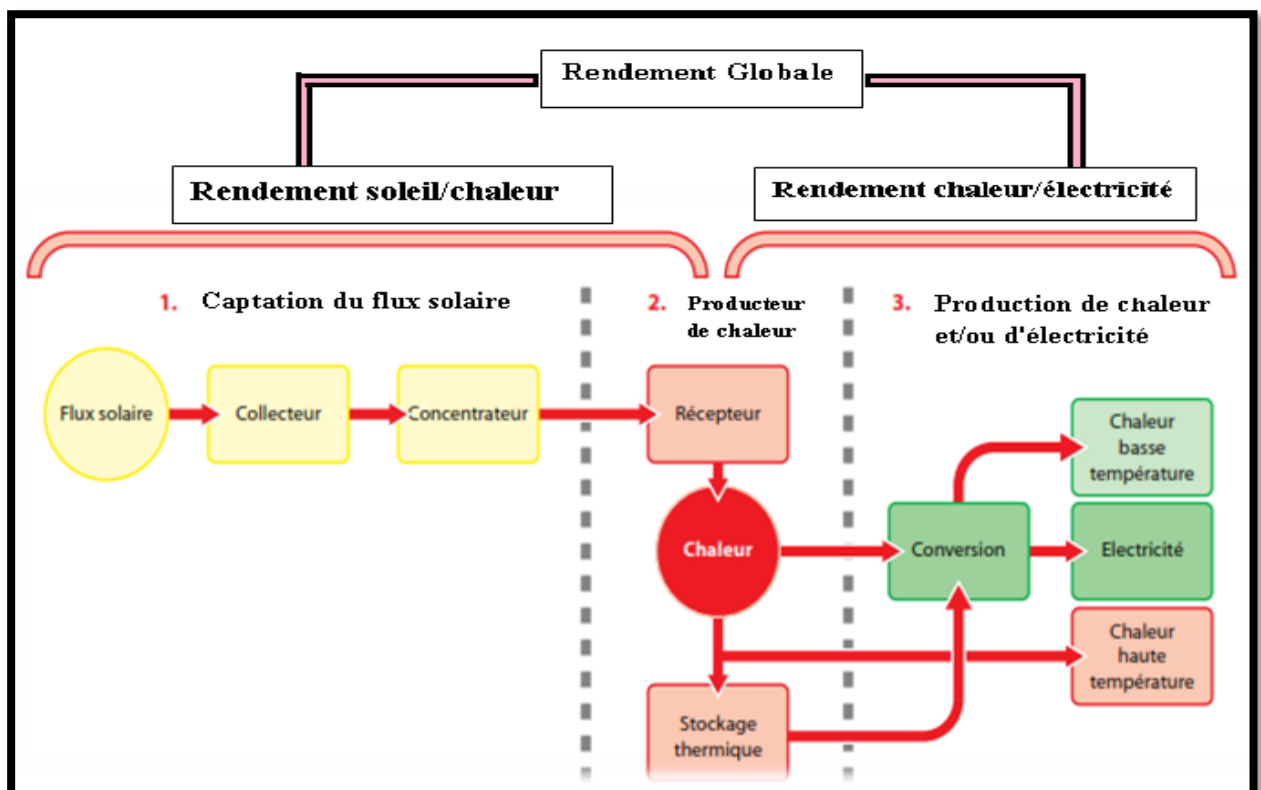


Figure III.1 Processus de transformation de la chaleur du soleil en électricité par voie thermodynamique

- La collecte et la concentration du flux solaire pour chauffer le fluide caloporteur.
- La production de chaleur (vapeur d'eau ou autre fluide selon la température de source chaude).
- La conversion de chaleur en électricité qui rejette de la chaleur basse température [28].

III.2.1 La collecte :

Un concentrateur pointé vers le soleil reçoit un rayonnement incident d'intensité I (ensoleillement en (W/m^2)) sur une surface de captation du réflecteur $S_{réf}$ donc une puissance capté par le réflecteur :

$$P_c = I S_{réf} \quad (3.1)$$

Cette même puissance est réfléchi (concentrée) sur la cavité réceptrice S_r (foyer ou récepteur ou point focal du dispositif de concentration appelé aussi absorbeur), est réduite à cause des pertes. La puissance absorbée est donnée par la formule suivante [32] :

$$P_a = P_c \eta_{ot} = \eta_{opt} I S_{réf} \quad (3.2)$$

Avec :

P_a = puissance thermique de la cavité réceptrice

= Puissance absorbé par le récepteur

η_{opt} : rendement optique du concentrateur.

Le rendement optique [33] :

$$\eta_{opt} = \Gamma \tau \alpha \rho \quad (3.3)$$

Avec :

Γ : Rapport de captation (fraction de l'énergie reflétée par le réflecteur) [34].

$$\Gamma = (S_{réf} - S_r) / S_{réf} \quad (3.4)$$

Avec :

α : Facteur d'absorption de la surface de l'absorbeur.

τ : Facteur de transmission de l'absorbeur.

ρ : Facteur de réflexion de surface de réflecteur (miroir du concentrateur).

- **Puissance correspondant aux pertes thermiques :**

Une fois que l'énergie solaire passe vers la surface de la cavité réceptrice, elle relève sa température au-dessus de la température ambiante, cette variation de température provoque un processus des pertes de chaleur, ce sont des pertes par convection, par rayonnement et par conduction.

III.2.2 La production de chaleur (bilan thermique):

La puissance thermique P_t transmise par la cavité réceptrice à l'échangeur (fluide caloporteur) est alors la puissance utile [35] :

$$P_t = P_a - P_p \quad (3.5)$$

Avec :

P_p = La puissance correspondant aux pertes thermiques est donnée par l'expression suivante [36] :

$$P_p = P_{p,cv} + P_{p,r} + P_{p,cd} \quad (3.6)$$

Avec :

p_{cv} : Pertes par convection.

P_{pr} : Pertes par rayonnement.

P_{pc} : Pertes par conduction.

III.2.2.1 Pertes par convection :

La convection est un phénomène encore peu connu pour la plaque plane. Elle est de plus liée à la vitesse et la direction du vent sur le site. Ces pertes sont proportionnelles à la

surface du récepteur et la différence entre la température de surface d'absorbeur et l'air ambiant [32].

$$P_{p,cv} = h_{cv} \cdot S_r \cdot (T_r - T_a) \quad (3.7)$$

Avec :

S_r : surface d'ouverture du récepteur

T_r : température du récepteur

T_a : température ambiante

h_{cv} : Coefficient de transfert thermique par convection [37].

III.2.2.2 Pertes par rayonnement :

Ces pertes dépendent de la forme du récepteur mais plus particulièrement de la Température du récepteur. Ils sont proportionnels à l'émissivité de l'absorbeur [36].

$$P_{pr} = \varepsilon \sigma S_r (T_r^4 - T_a^4) = h_r S_r (T_r^4 - T_a^4) \quad (3.8)$$

Avec :

ε : facteur émissivité de l'absorbeur

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

$h_r = \varepsilon \sigma$ Coefficient de transfert thermique par rayonnement

III.2.2.3 Pertes par conduction :

Ces pertes sont liées à la nature du matériel utilisé :

$$P_{pc} = \lambda S_r (T_r - T_a) \Delta x \quad (3.9)$$

Avec :

λ : Conductivité de l'absorbeur.

Δx : épaisseur de l'absorbeur.

Mais les pertes par conduction sont petites comparées aux pertes par convection ou par rayonnement, et sont généralement combinées avec les pertes par convection dans la plupart des cas.

$$P_p = S_r [h_{cv} (T_r - T_a) + h_r (T_r^4 - T_a^4)] \quad (3.10)$$

Ainsi :

$$P_t = \eta_{opt} I_s S_{ref} - S_r [h_{cv} (T_r - T_a) + h_r (T_r^4 - T_a^4)] \quad (3.11)$$

On montre par ailleurs que les pertes thermiques peuvent s'écrire sous une forme plus simple :

$$P_p = S_r U (T_r - T_a) \quad (3.12)$$

Où :

U est le coefficient global des pertes thermiques donné par :

$$U = h_{cv} + h_r \quad (3.13)$$

III.2.3 La conversion de chaleur (rendement) :

III.2.3.1 Cas du Concentrateur cylindro-parabolique :

Dans le cas idéal le rendement optique égal à 1, le rendement énergétique (soleil/chaleur) s'écrira :

$$\eta_e = \frac{P_t}{P_c} = \frac{\eta_{opt} I_s S_{ref} - S_r [h_{cv} (T_r - T_a) + h_r (T_r^4 - T_a^4)]}{I S_{ref}} \quad (3.14)$$

$$\eta_e = 1 - \frac{[h_{cv} (T_r - T_a) + h_r (T_r^4 - T_a^4)]}{C I} \quad (3.15)$$

Avec :

$$C = \frac{\text{Surface du réflecteur}}{\text{Surface du récepteur}} = \frac{S_{ref}}{S_r} = \text{Concentration} \quad (3.16)$$

Le rendement du concentrateur dépend de l'intensité du rayonnement et de la différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.

D'autre part :

$$\eta_e = 1 - \frac{[h_{cv}(T_r - T_a) + h_r(T_r^4 - T_a^4)]}{CI} \quad (3.17)$$

$$C = \frac{h_{cv}(T_r - T_a) + h_r(T_r^4 - T_a^4)}{[1 - \eta_e]} \quad (3.18)$$

III.2.3.2 Cas du concentrateur solaire parabolique (avec comme convertisseur Le moteur Stirling) [32] :

C'est le calcul du rendement énergétique η_e d'un capteur qui permet d'apprécier sa performance ou efficacité. Le rendement est le rapport de l'énergie thermique transmis par le récepteur au fluide caloporteur du dispositif de conversion à l'énergie reçue par le concentrateur [29,40].

$$\eta_e = \frac{P_t}{P_c} = \eta_{opt} - \frac{S_r [h_{cv}(T_r - T_a) + h_r(T_r^4 - T_a^4)]}{I S_{ref}} \quad (3.19)$$

Puisque :

$$P_t = \eta_{opt} I S_{ref} - S_r [h_{cv}(T_r - T_a) + \varepsilon \sigma (T_r^4 - T_a^4)]$$

$$\text{Et : } P_c = I S_{ref} ; \varepsilon \sigma = h_r$$

Ou encore :

$$\eta_e = \eta_{opt} - \frac{K_{cv}}{C} (\Theta_r - 1) - \frac{K_r}{C} (\Theta_r^4 - 1) \quad (3.20)$$

Avec :

$$C = \text{degré de concentration géométrique du concentrateur} = S_{ref} / S_r$$

$$K_{cv} = \text{coefficient de perte par convection de la cavité réceptrice} = h_{cv} T_a / I$$

$$K_r = \text{coefficient de perte par rayonnement de la cavité réceptrice} = h_r T_a^4 / I$$

$$\text{Et : } \theta_r = T_r / T_a$$

Cette étude porte sur l'utilisation des moteurs Stirling pour la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique puis électrique.

La puissance utile transmise par la cavité réceptrice au fluide de travail du moteur (grâce à l'échangeur de chaleur) est :

$$P_t = K_x S_x (T_r - T_x) \rightarrow T_x = T_r \frac{P_t}{K_x S_x} = T_r - \frac{\eta_e I S_{réf}}{K_x S_x} \quad (3.21)$$

Avec :

S_x = surface d'échange

K_x = coefficient de transfert thermique

T_x = température du fluide de travail dans l'échangeur

On peut écrire sous la forme sans dimension :

$$\Theta_x = \Theta_r - \frac{\eta_e C}{K a_x} \rightarrow \eta_e = (\Theta_r - \Theta_x) \frac{K a_x}{C} \quad (3.22)$$

Avec :

$\alpha_x = S_x / S_r$ = rapport de la surface d'échange du réchauffeur à la surface de la cavité réceptrice.

$k = K_x T_a / I$ = coefficient sans dimension de transfert thermique de l'échangeur réchauffeur,

$\theta_x = T_x / T_a$ = température sans dimension du fluide de travail dans l'échangeur réchauffeur.

D'autre part en tenant compte que le rendement théorique maximal que peut avoir le moteur thermique est le rendement de Carnot η_c .

$$\eta_c = 1 - \frac{1}{\Theta_x} \quad (3.23)$$

Et du rendement second principe fonction de la conception de la machine η_m , la puissance mécanique produite par le moteur :

$$P_m = \eta_{glob} I S_c \quad (3.24)$$

Avec:

η_{glob} : Le rendement global de conversion de la puissance solaire reçue par le concentrateur en puissance produit par le moteur :

$$\eta_{glob} = \eta_e \eta_c \eta_m = (\Theta_r - \Theta_x) \frac{K a_x}{c} \left(1 - \frac{1}{\Theta_x}\right) \eta_m \quad (3.25)$$

Ces différentes expressions nous permettent de déterminer comment le rendement de conversion de l'énergie solaire évolue en fonction du degré de concentration (donc de la température) de l'énergie solaire.

Chapitre IV:

Calcul des paramètres énergétiques et analyse économique

IV.1 Introduction :

La conception d'un convertisseur thermodynamique de l'énergie solaire nécessite des calculs de paramètres énergétiques et une analyse économique.

Le rendement et la concentration sont les paramètres clés d'appréciation de l'efficacité et de la performance d'un système.

IV.2 Calcul du rendement et de la concentration :

IV.2.1 Cas du Concentrateur cylindro-parabolique :

Dans le but de voir la variation du rendement et de la concentration en fonction de la température de l'absorbeur, on se donne un exemple avec des conditions extérieures dans lesquelles le concentrateur est placé :

Le rayonnement direct incident est constant et vaut : $I = 800 \text{ W m}^{-2}$.

La température ambiante $T = 24^\circ\text{C} = 297^\circ\text{K}$.

Le coefficient d'échange convectif : $h_{cv} = 7.3 V^{0.8}$, pour $4 \leq V \leq 40 \text{ m/s}$.

Avec : V : est la vitesse du vent (8 m/s) [38].

Le coefficient d'échange radiatif : $h_r = \varepsilon \sigma$.

D'après le chapitre trois les formules (3.17 et 3.18) donnant le rendement énergétique η_e et la concentration C on a :

$$\eta_e = 1 - \frac{[h_{cv}(T_r - T_a) + h_r(T_r^4 - T_a^4)]}{CI}$$

$$C = \frac{h_{cv}(T_r - T_a) + h_r(T_r^4 - T_a^4)}{[1 - \eta_e]}$$

Pour différentes températures du récepteur T_r et pour différentes concentrations C , les résultats de calcul des rendements énergétiques η_e correspondant sont donnés dans le tableau (IV.1) ci-dessous :

Tableau IV.1 Variation du rendement énergétique en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration

		Concentration					
η_e	T_r (K)	C=80	C=100	C=120	C=140	C=160	C=180
Rendement	473	0.87	0.89	0.91	0.92	0.93	0.94
	493	0.85	0.87	0.9	0.91	0.92	0.93
	513	0.82	0.86	0.88	0.9	0.91	0.92
	533	0.8	0.84	0.87	0.89	0.9	0.91
	553	0.78	0.82	0.85	0.87	0.89	0.9
	573	0.76	0.8	0.84	0.86	0.88	0.89
	593	0.73	0.79	0.82	0.85	0.87	0.88
	613	0.71	0.76	0.8	0.83	0.85	0.87
	633	0.68	0.74	0.79	0.82	0.84	0.86
	653	0.65	0.72	0.77	0.8	0.82	0.84
	673	0.62	0.7	0.75	0.79	0.81	0.83

Pour différentes températures du récepteur T_r et pour différents rendements énergétiques η_e , les résultats de calcul des concentrations C correspondant sont donnés dans le tableau (VI.2) ci-dessous :

Tableau IV.2 Variation de la concentration en fonction de la température pour différentes valeurs du rendement énergétique

		Rendement					
C	T _r (K)	$\eta_e = 0.2$	$\eta_e = 0.3$	$\eta_e = 0.4$	$\eta_e = 0.5$	$\eta_e = 0.6$	$\eta_e = 0.7$
Concentration	473	13.09	15.87	18.52	22.22	27.78	37.04
	493	15.8	18.05	21.06	25.27	31.59	42.12
	513	17.79	20.34	23.72	28.47	35.59	47.45
	533	19.89	22.73	26.52	31.82	39.78	53.04
	553	22.09	25.25	29.45	35.35	44.18	58.91
	573	24.41	27.9	32.55	39.06	48.82	65.09
	593	26.85	30.69	35.08	42.96	53.67	71.6
	613	29.42	33.62	39.22	47.07	58.84	78.46
	633	32.13	36.72	42.84	51.41	64.27	85.69
	653	34.99	39.99	46.66	55.99	69.99	93.32
673	38.02	43.45	50.69	60.83	76.03	101.37	

Les courbes ci-dessous représentant respectivement la variation de η_e en fonction de la température T_r (du récepteur ou absorbeur) pour différentes valeur de C dans la figure (IV.1) et la variation de C en fonction de la température T_r pour différentes valeurs du rendement η_e dans la figure (IV.2).

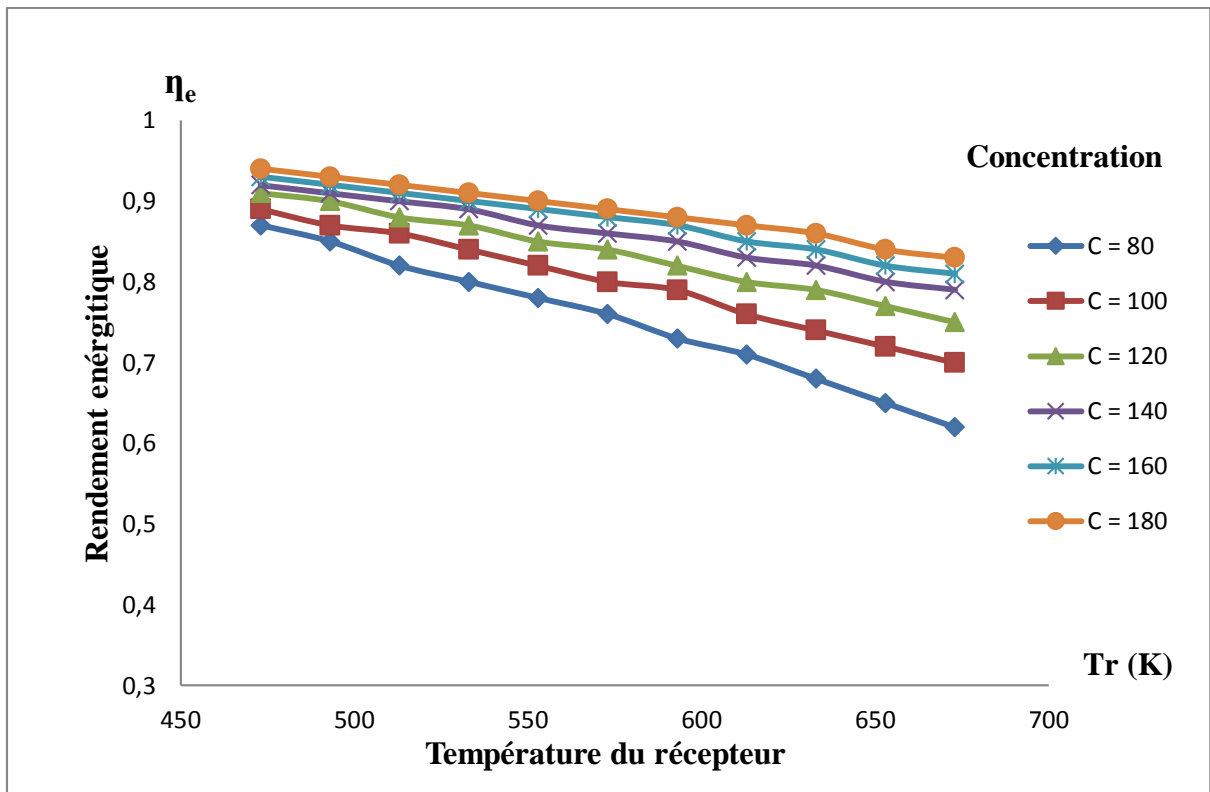


Figure IV.1 Variation du rendement énergétique en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration

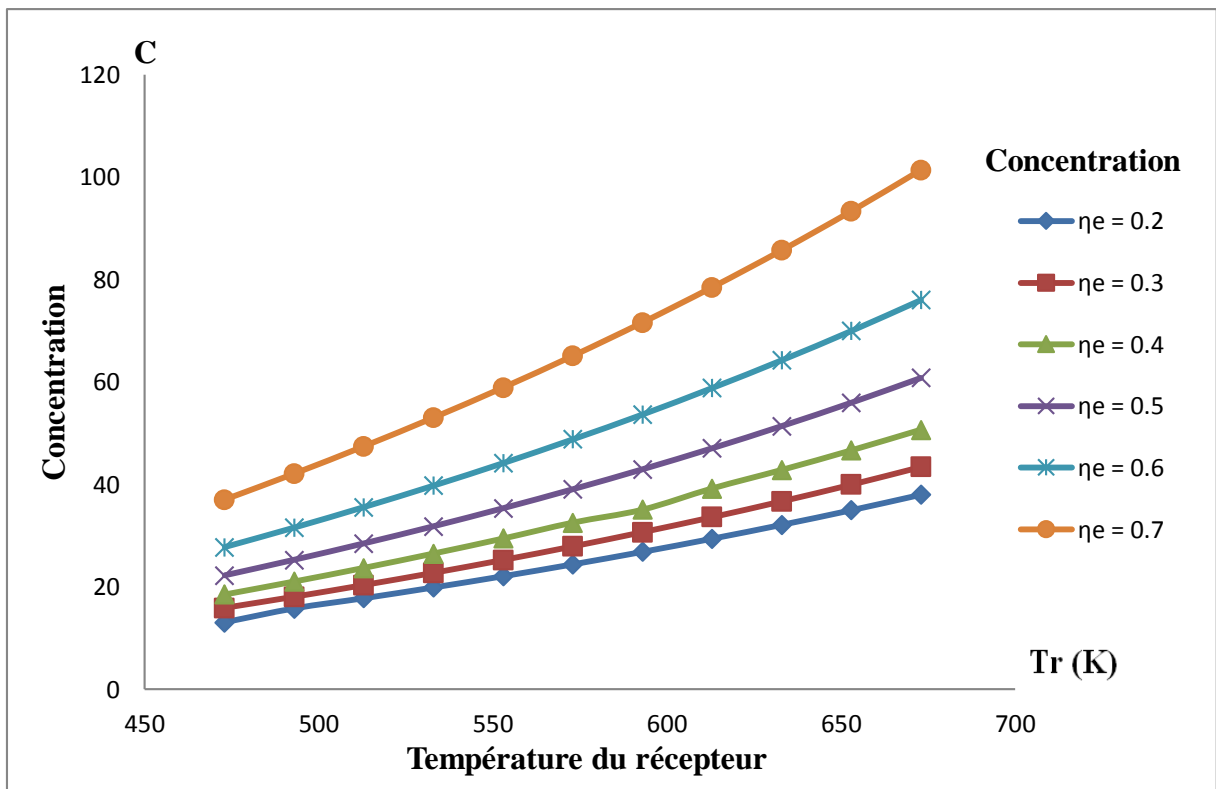


Figure IV.2 Variation de la concentration en fonction de la température pour différentes Valeurs du rendement énergétique

Interprétation :

D'après les figures (IV.1) et (IV.2), nous constatons que le rendement d'un concentrateur cylindro-parabolique est d'autant plus faible que la température du tube absorbeur est élevée. Cela est prévisible à partir du moment où l'énergie perdue est en rapport de proportionnalité direct avec la température T_r du tube (récepteur).

Par conséquent, afin d'améliorer le rendement du système, pour la même concentration, il faut diminuer l'énergie des pertes thermiques avant de diminuer le niveau de température de l'absorbeur.

IV.2.2 Cas du Concentrateur parabolique :

La figure (IV.3) nous permet de voir l'évolution de la température optimale pour un concentrateur en fonction du degré de concentration de l'énergie solaire.

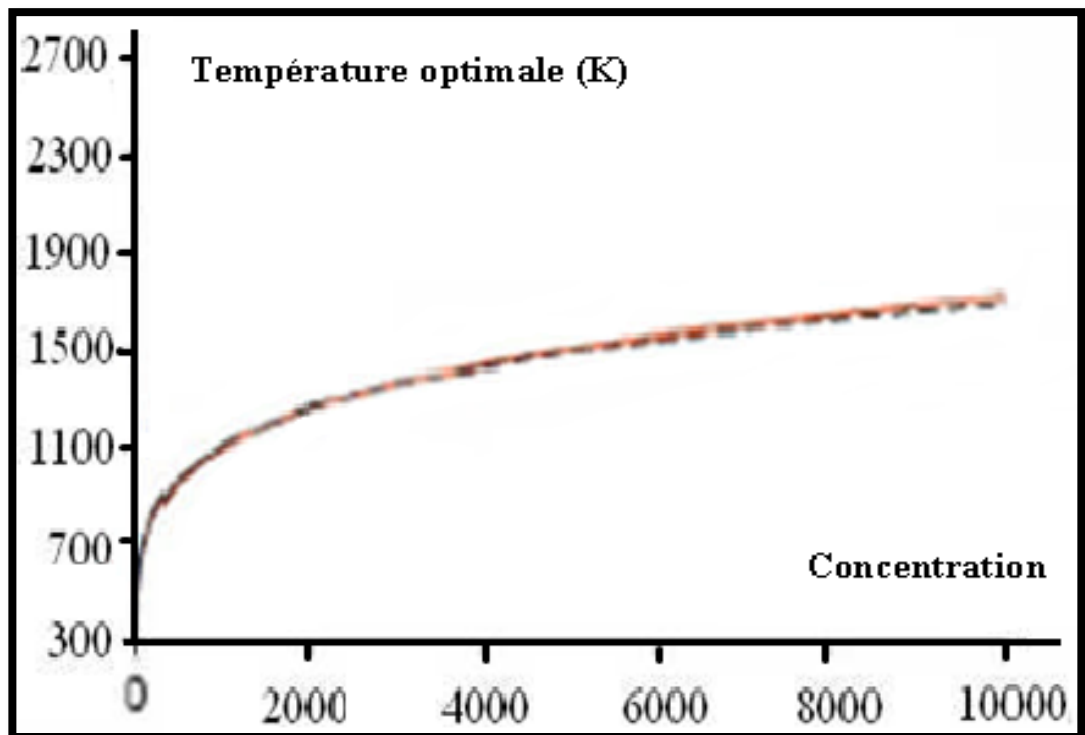


Figure IV.3 Variation de la concentration en fonction de la température

Nous remarquons que les valeurs de la température de récepteur augmentent sérieusement dans la région où C est inférieur à 2000. Au-delà cette température tend à se stabiliser à 1600K.

Dans le but de voir la variation des rendements en fonction de la température Θ_r de l'absorbeur, il convient de traiter un exemple avec les conditions extérieures dans lesquelles le concentrateur est placé en utilisant les formules (3.19, 3.20, 3.23, 3.22, 3.25) [42]:

$$K = 825 ; K_r = 0.4 ; K_{cv} = 12.71 ; a_x = 1 ; \eta_m = 0.7 ; \eta_{opt} = 1 ; K_x = 2500$$

Les courbes sont établies en considérant $\theta_r = T_r / T_a$ comme variable indépendante. Les paramètres du modèle simplifié sont choisis par consultation et comparaison avec des valeurs représentatives d'installations réelles :

Tableau IV.3 Variation du rendement énergétique en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration.

η_e	Θ_r	Concentration		
		C = 500	C = 800	C = 1000
Rendement	2.3	0.945	0.965	0.972
	2.6	0.923	0.952	0.961
	3	0.885	0.928	0.942
	3.3	0.847	0.904	0.923
	3.7	0.782	0.863	0.891
	4	0.719	0.824	0.859

La figure (IV.4) ci-dessous représente la variation du rendement énergétique en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration :

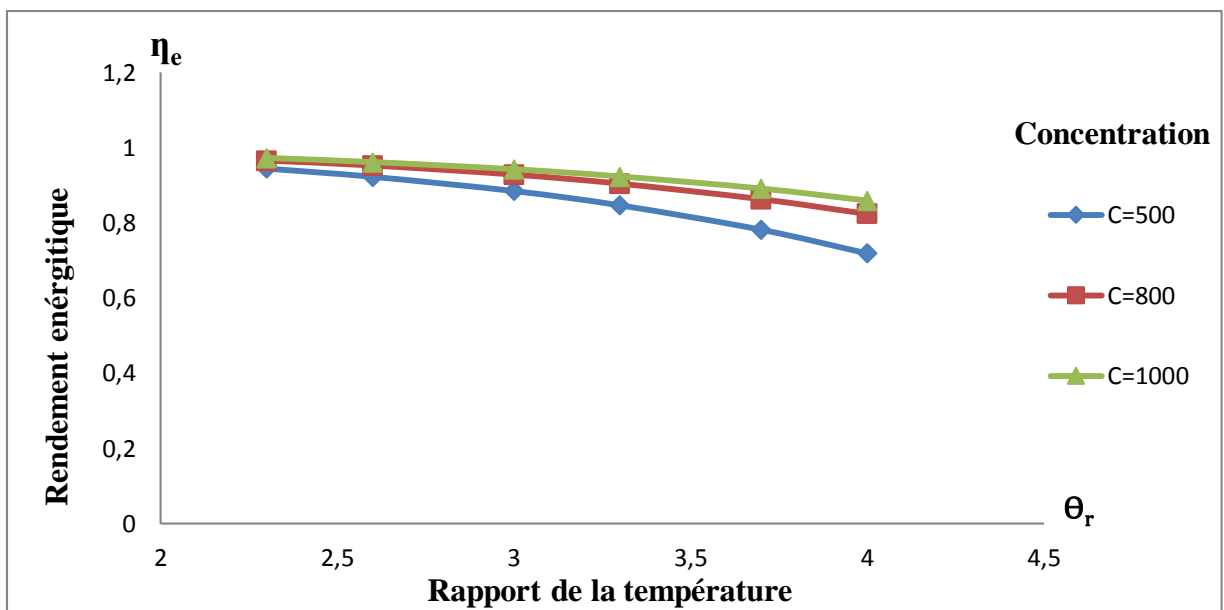


Figure IV.4 Variation du rendement énergétique en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration.

Interprétation :

Sur la figure (IV.4), nous avons représenté la variation du rendement énergétique en fonctions de la température pour différentes valeurs de la concentration. Nous remarquons que le rendement énergétique diminue sérieusement avec la température du récepteur (moteur Stirling) et la concentration du système.

Tableau IV.4 Variation du rendement de Carnot en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration

		Concentration		
η_c	Θ_r	C = 500	C = 800	C = 1000
Rendement	2.3	0.421	0.266	0.108
	2.6	0.509	0.403	0.303
	3	0.594	0.523	0.461
	3.3	0.641	0.587	0.541
	3.7	0.69	0.65	0.618
	4	0.719	0.687	0.662

La figure (IV.5) ci-dessous représente la variation du rendement de Carnot en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration :

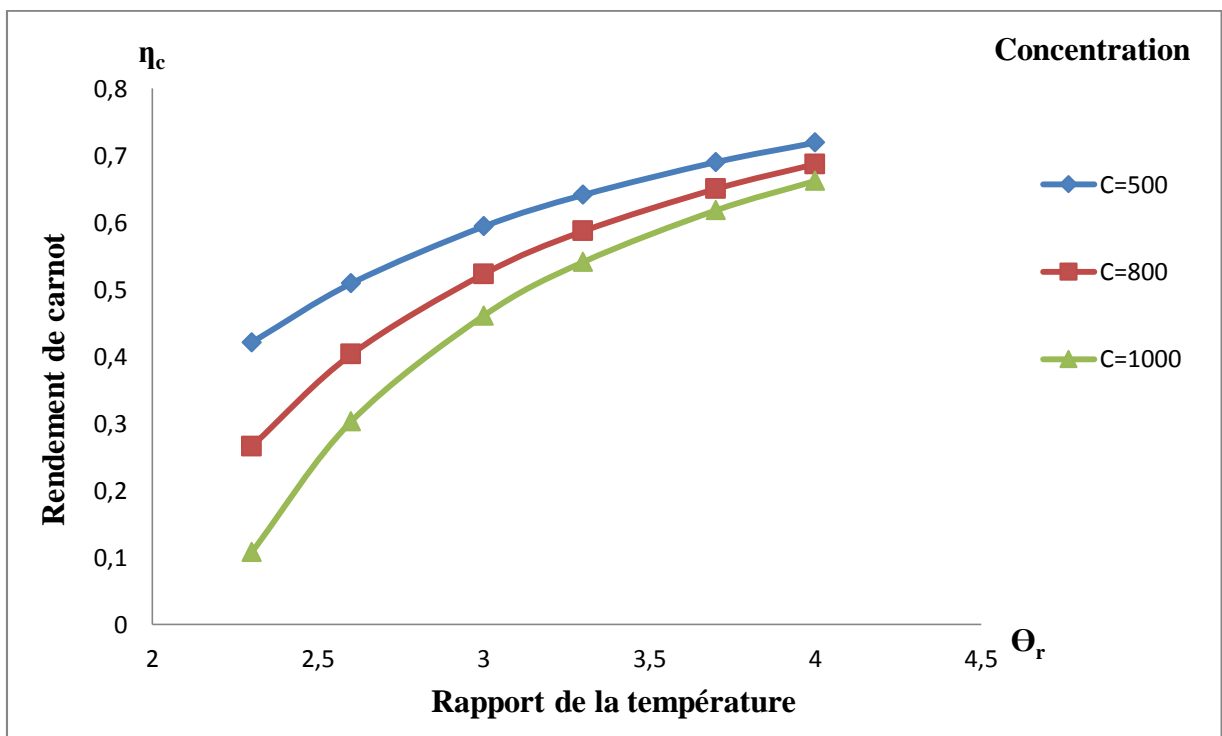


Figure IV.5 Variation du rendement de Carnot en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration

Interprétation :

Sur la figure (IV.5), nous avons représentés la variation du rendement de Carnot en fonctions de la température pour différentes valeurs de la concentration. Nous remarquons que ce rendement augmente sérieusement avec la température du récepteur (moteur Stirling) et la concentration du système surtout pour les concentrations élevées.

Tableau IV.5 Variation du rendement global en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration

		Concentration		
η_{glob}	Θ_r	C = 500	C = 800	C = 1000
Rendement	2.3	0.278	0.179	0.073
	2.6	0.328	0.268	0.203
	3	0.367	0.339	0.303
	3.3	0.38	0.371	0.349
	3.7	0.377	0.392	0.385
	4	0.361	0.396	0.398

La figure (IV.6) ci-dessous représente la variation du rendement global en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration :

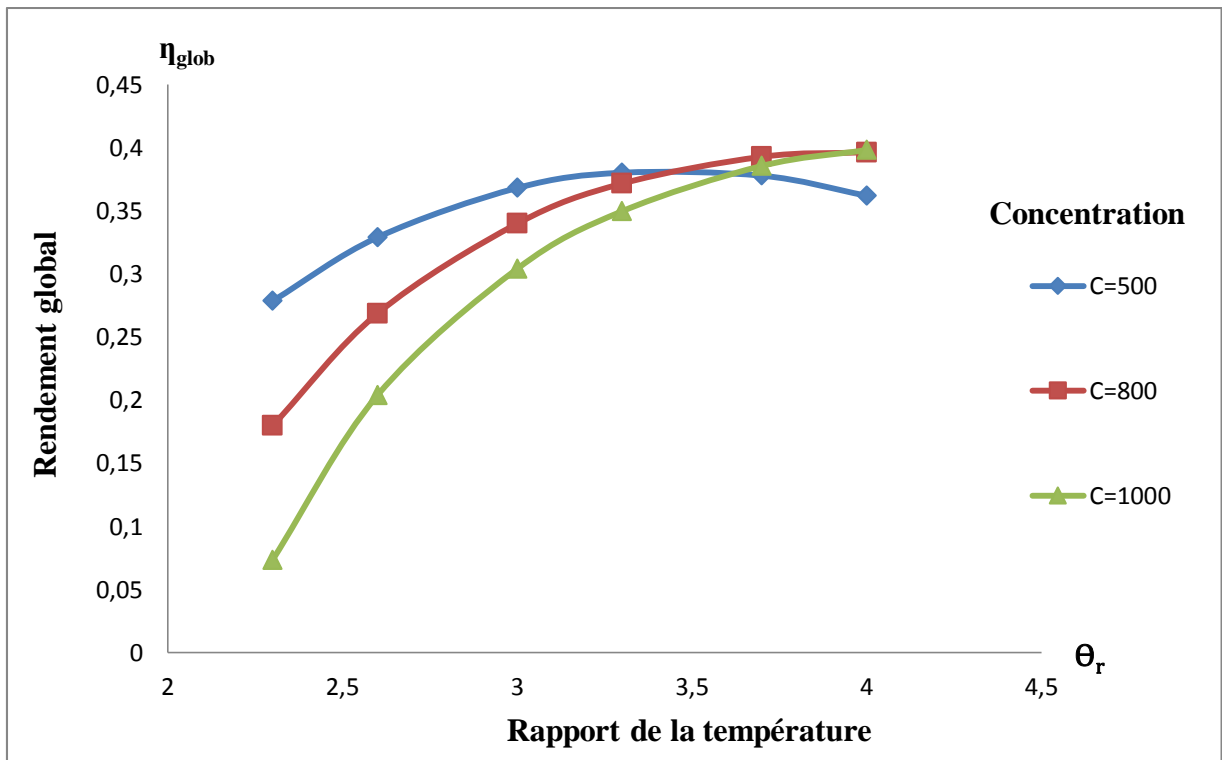


Figure IV.6 Variation du rendement global en fonction du rapport de température pour différentes valeurs de la concentration

Interprétation :

Sur la figure (IV.6), nous remarquons que le rendement global augmente avec la température du récepteur (moteur Stirling) et la concentration du système.

Tableau IV.6 Variation des rendements en fonction de la température pour une valeur de la concentration.

Concentration (C = 1000)			
θ_r	η_e	η_c	η_{glob}
2.5	0,972	0,108	0,073
2.6	0,961	0,303	0,203
3	0,942	0,461	0,303
3.3	0,923	0,541	0,349
3.7	0,891	0,618	0,385
4	0,859	0,662	0,398

La figure (IV.7) ci-dessous représente la variation des trois rendements dans un même graphe en fonction de la température pour différents valeurs de la concentration.

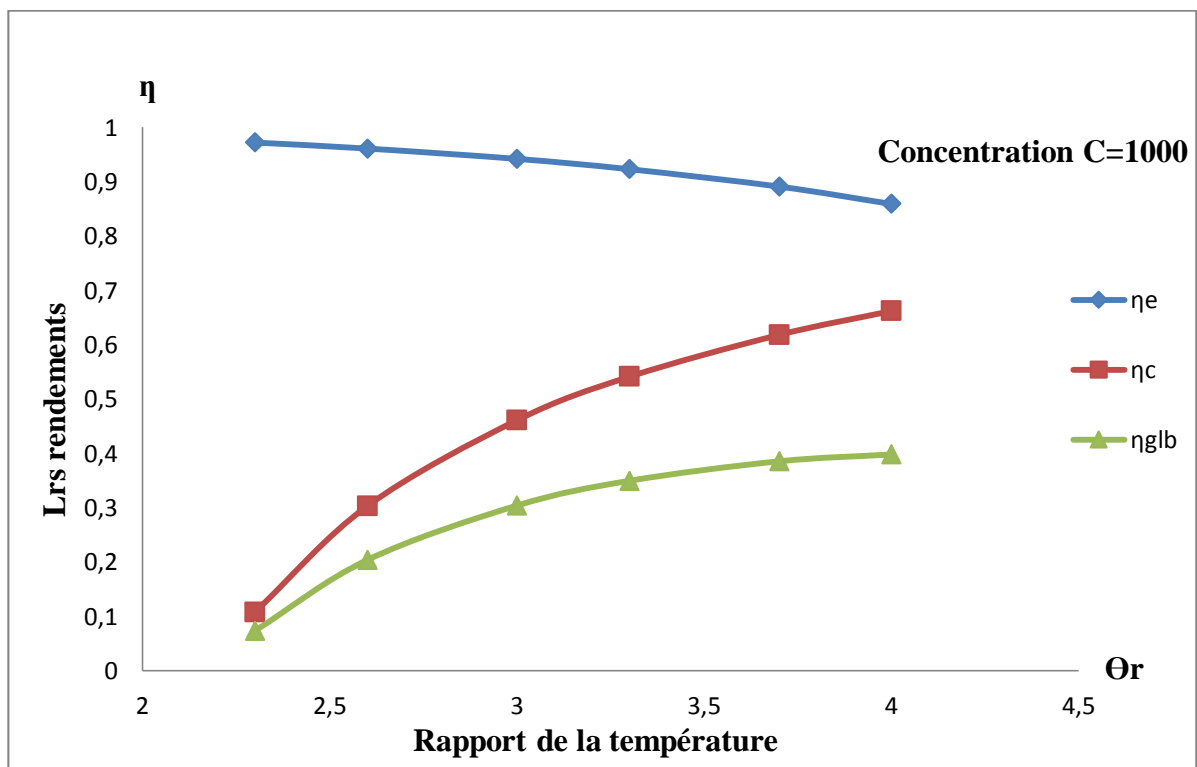


Figure IV.7 Variation des rendements en fonction de la température pour une valeur de la concentration.

Interprétation :

La figure (IV.7), montre que le rendement énergétique diminue sérieusement, par contre pour le rendement de Carnot et le global augmentent progressivement avec la température du récepteur (moteur Stirling) et la concentration.

IV.2.3 Calculs pour chauffe-eau domestique avec concentrateur cylindro-parabolique :

Pour obtenir de l'eau chaude domestique on peut utiliser un convertisseur cylindro-parabolique. Ce dernier est un concentrateur linéaire utilisé pour chauffer le fluide caloporteur (eau).

Le schéma ci-dessous illustre le concentrateur cylindro-parabolique considéré pour nos calculs.

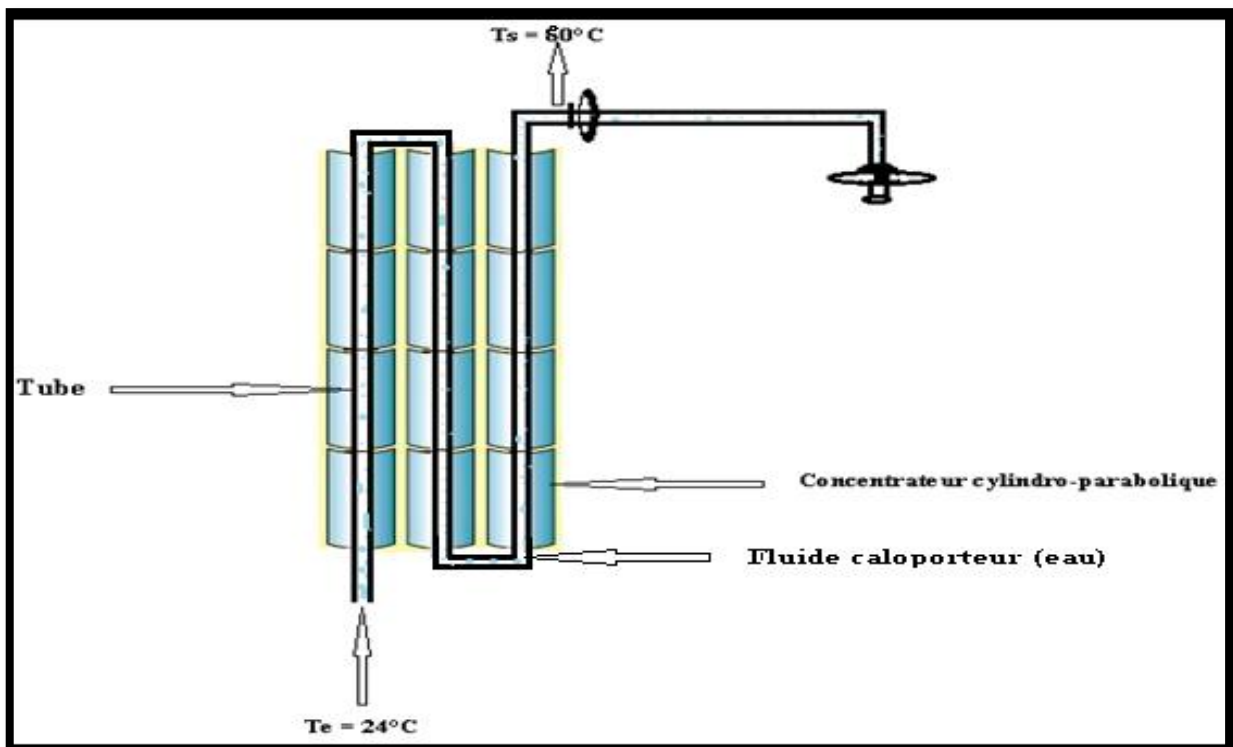


Figure IV.8 Schéma du concentrateur cylindro-parabolique

Les données pour le concentrateur cylindro-parabolique sont :

$$\text{On a: } T_e = 24^\circ\text{C} = 297\text{K}; \quad T_s = 60^\circ\text{C} = 353\text{K}; \quad I = 800\text{W m}^{-2};$$

$$C_p = 4180 \text{ J/Kg K pour l'eau ;}$$

$$S_{\text{réf}} = 2 \text{ m}^2 \text{ et pour les 3 réflecteurs } S_{\text{réf}} = 6\text{m}^2 ;$$

$L = 2$ m et pour les trois tubes $L = 2 \times 3 = 6$ m ;

$S_{réf} = 2$ m² et pour les 3 réflecteurs : $S_{réf} = 6$ m²

IV.2.3.1 Calcul de la puissance utile :

$$\eta_e = \frac{P_t}{P_c} = \eta_{opt} - \frac{S_r [h_{cv}(T_r - T_a) + h_r(T_r^4 - T_a^4)]}{I S_{réf}} \rightarrow P_t = \eta_e P_c$$

Aussi : $P_t = \dot{m} C_p \Delta T$

Avec : \dot{m} : le débit massique m/s.

C_p : Chaleur spécifique à pression constante J/Kg K ou Kj/Kg °C

ΔT : La variation de température en K ou °C

Où $\Delta T = T_s - T_e$

- Pour calculer la puissance utile on utilise la formule suivante :

$$P_t = \eta_e P_c = \eta_e I S_{réf}$$

- D'après la figure (IV.2) on choisit :

$$\eta_e = 0.7 \quad \text{pour} \quad T_r = 613\text{K} \quad \text{et} \quad C = 80$$

$$P_t = 0.7 \times 800 \times 6 = 3360\text{W}$$

IV.3.2.2 Calcul du débit massique :

- Pour calculer le débit on utilise la formule suivante :

$$P_t = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \rightarrow \dot{m} = \frac{P_t}{C_p (T_s - T_e)}$$

$$\dot{m} = \frac{P_t}{C_p (T_s - T_e)} = \frac{3360}{4180 \times (333 - 297)} = 0.00223\text{kg/s} = 2.23 \times 10^{-2}\text{kg/s}$$

$$\dot{m} = 2.25 \times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$$

IV.3.2.3 Calcul du diamètre :

On propose que la vitesse d'écoulement de fluide caloporteur (eau) dans le tube soit constante et vaut 1m/s.

- Pour calculer le diamètre on applique la formule du débit suivante :

$$\dot{m} = V.S = V \frac{\pi D^2}{4} \rightarrow D = \sqrt{\frac{4 \times \dot{m}}{\pi V}}$$

$$\text{Où : } S = \frac{\pi D^2}{4}$$

Avec : V : la vitesse en m/s.

S : la section en m^2 .

D : diamètre en m.

Donc :

$$D = \sqrt{\frac{4 \times \dot{m}}{\pi V}} = \sqrt{\frac{4 \times 2.25 \times 10^{-5}}{3.14 \times 1}} = 0.0035 \text{ m} = 3.5 \text{ mm.}$$

On remarque que ce diamètre est trop petit, ceci peut être dû à la valeur du rendement considérée (élevée).

Ce résultat nous oriente à refaire les calculs en considérant un diamètre plus grand.

Prenons $D = 15 \text{ mm}$ et calculons le nouveau rendement.

$$\eta_e = 1 - \frac{S_r [h_{cv} (T_r - T_a) + h_r (T_r^4 - T_a^4)]}{I S_{réf}}$$

Où : $S_r = \pi D L/2$.

L : longueur du récepteur (tube) en m

Donc :

$$S_r = \frac{3.14 \times 0.015 \times 6}{2} = 0.1413 \text{ m}$$

$$\text{Et : } \eta_e = 1 - \frac{S_r [h_{cv} (T_r - T_a) + h_r (T_r^4 - T_a^4)]}{I S_{réf}} = 1 - \frac{0.1413 [38.52 (613 - 297) + 4.536 \times 10^{-8} ((613)^4 - (297)^4)]}{800 \times 6}$$

$$\eta_e = 0.46 \qquad \eta_e = 46\%$$

Comme prévu, pour une valeur du rendement de 46% la valeur du diamètre est acceptable.

IV.3 Analyse comparative économique et financière :

IV.3.1 Evaluation des coûts :

L'efficacité économique reste un critère capital dans l'évaluation de la crédibilité d'une filière de production électrique à grande échelle. Afin de comparer les coûts de génération de l'électricité entre eux et pour chaque technique de production, plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

- Le coût d'investissement
- Le coût d'opération et de maintenance
- Les coûts liés à l'utilisation de l'énergie primaire

L'indicateur le plus utilisé pour les centrales solaires et dans beaucoup d'autres systèmes est le coût unitaire moyen ; communément appelée méthode LEC (de l'anglais « Levelized Electricity Cost. »).

Il est défini comme le rapport du coût moyen annuel actualisé des investissements sur la production d'énergie électrique annuelle nette [26].

Il est calculé de la manière suivante :

$$LEC = \frac{C \cdot K_i + K_m + K_c}{E_e} \quad \text{avec :} \quad C = \frac{k_t (1 + k_t)^n}{(1 + k_t)^n - 1} + k_a = 9.88\%.$$

K= Coût total de l'investissement (liés à l'achat des équipements de la central et à sa construction)

K_i = Coût d'exploitation et d'entretien (maintenance).

K_{cm}= Coût des ressources de combustible (carburant).

E_e = production d'énergie électrique annuelle nette.

K_a = assurance annuelle = 1%.

k_t = taux d'intérêt = 8%.

n = Période de remboursement en années = 30 ans.

Les valeurs indiquées sont celle utilisées par la banque mondiale dans son rapport : Strategy for the Market Development of Concentrating Solar Thermal Power.

Le graphique suivant donne, à titre indicatif, le LEC en \$cts/kWh calculé pour différentes technologies de production d'électricité en Californie :

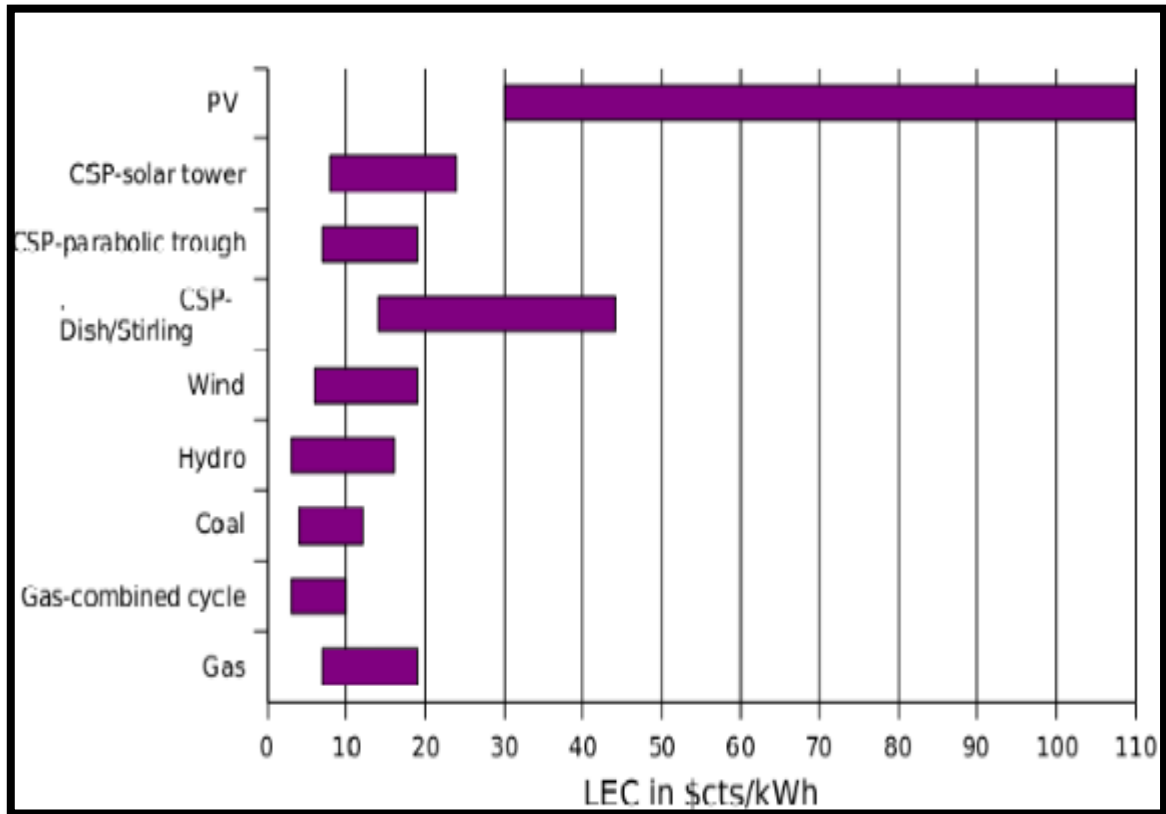


Figure IV.9 LEC en \$cts/kWh calculé pour différentes technologies de production d'électricité en Californie

On constate que l'électricité provenant des centrales solaires est bien moins coûteuse que celle produite par panneaux photovoltaïques. Parmi les différentes technologies de concentration solaire, on remarque que les capteurs paraboliques produisent l'électricité à un coût supérieur par rapport aux deux autres techniques.

- Le cas des centrales de 50MWe, avec ensoleillement d'Espagne (2014kWh/m²/an) [43].

Année	1985	2005	2015
Puissance typique (MWe)	30	40-80	200
Rendement annuel moyen	8%	13-15%	16-17%
Coût de production (/KWhe)	0.25	0.16-0.19	0.06-0.07

- Les coûts de production baissent.

IV.3.2 Evaluation des coûts et des performances :

Les concentrateurs solaires se distinguent par leurs dimensions élémentaires, donc leur puissance, leurs performances et leur coût. Une étude comparative de ces caractéristiques a été faite [43].

Nous résumons dans le tableau suivant les caractéristiques qui nous paraissent les plus intéressantes des principales filaires :

Technologie (filaires)	Cylindro-parabolique	Parabole-Stirling
Rendement thermique (%)	70	75
Puissance (MWth)	80-300	< 0.1
Concentration	80-500	6000-10000
Température de travail (°C)	250-450	600-1800
Rendement annuel de conversion solaire/électricité (%)	14	17
LEC solaire (€ /KWhe)	0.17-0.19	> 0.2
Coûte total d'investissement (€ /We)	2.8-3.5	10-14

Interprétation :

- Centrales Cylindro-paraboliques : C'est la technologie la plus puissante.
- Les centrales parabolique Dish-Stirling : Cette technologie n'est pas adaptée à une production industrielle de masse du fait de son coût élevé, d'où le retard de son développement. Cependant, c'est la seule technologie thermodynamique qui puisse être mise en œuvre dans des sites isolés de petite taille.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie solaire apparaît comme une bonne alternative aux autres énergies. C'est une énergie durable et disponible.

La concentration du rayonnement solaire permet de produire la chaleur (températures élevées) nécessaire pour le fonctionnement des machines thermodynamiques classiques.

L'électricité solaire thermodynamique permet de réduire la superficie de captage solaire pour une puissance donnée (jusqu'à 100 MW/km^2) et d'améliorer le rendement des cycles thermodynamique d'un système de pompage solaire (selon les machines utilisées et les cycles mis en œuvre, les rendements de conversion solaire/ thermodynamique varient de 23 % à plus de 50 %)

Au final, couplé sur des alternateurs, le rendement de conversion solaire/électricité moyen net annuelle se situe autour de 15%.

La plupart des projets actuels de centrales solaires se tournent vers les fortes puissances des installations pour baisser le coût de l'énergie produite.

Ceci nous a motivés pour faire cette étude sur les convertisseurs énergétiques solaires en générale, et particulièrement l'étude comparative entre le convertisseur parabolique et cylindro-parabolique.

Pour chaque type de concentrateur le travail consiste à connaître l'évolution du rendement énergétique et de la concentration en fonction de la température du récepteur.

Pour le concentrateur cylindro-parabolique (mieux adapté pour la turbine à vapeur): le rendement est d'autant plus faible que la température du tube absorbeur est élevée. Cela est prévisible à partir du moment où l'énergie perdue est en rapport de proportionnalité direct avec la température T_r du tube (récepteur).

Pour le concentrateur parabolique (moteur Stirling): le rendement énergétique diminue sérieusement avec la température du récepteur et la concentration du système.

Du point de vue économique, les systèmes Cylindro-paraboliques se présentent comme la technologie la plus puissante.

Conclusion générale

Par contre, les centrales parabolique Dish-Stirling ne sont pas adaptées à une production industrielle de masse du fait de leur coût élevé. Cependant, c'est la seule technologie thermodynamique qui puisse être mise en œuvre dans des sites isolés de petite taille.

Enfin il faut signaler que le temps est insuffisant pour traiter tous les aspects du sujet et mener à bien cette étude.

Référence bibliographique

- [1] J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [2] C, Vauge. Introduction générale sur les différentes énergies renouvelables, Techniques de l'Ingénieur, B263. (1982).
- [3] J.M Chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [4] R. Bernard; G. Menguy; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2^{ème} édition 1980.
- [5] S. Saadi, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique ; UMC, 2010.
- [6] L'abc des technologies de l'énergie renouvelable, septembre 2003, www.pollutionprobe.org
- [7] J, Bonal; P, Rossetti. Les énergies alternatives, Omniscience. (2007).
- [8] D, K, Edwards. Capteurs solaires, Edition SCM, paris. (1979).
- [9] Kalla Fayçal, «Conversion thermodynamique de l'énergie solaire: Etude et modélisation d'un capteur solaire », mémoire de magistère en MÉCANIQUE Option: ENERGÉTIQUE, UNIVERSITÉ DE BATNA, (2014).
- [10] A, Sfeir ; G, Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [11] J, A, Duffie; W, A, Beckman; Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons. (1980).
- [12] J.A Duffie and W.A Beckman, Solar Energy Thermal Processes; 2nd edition, Wiley Interscience, New York, 1974.
- [13] P. Rivet, Le Rayonnement solaire ; CNRS.
- [14] O, Sotehi. Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire; thèse de magistère, Université de Constantine. (2009).
- [15] Rachid El Mokni, Néji AMAIMIA, «Animateurs de la formation»,

[16] Dvid wilgenbus. Dossier « L'énergie solaire »; *La main à la pâte* – Société française de physique.

http://www.inrp.fr/lamap/?Page_Id=16&Action=2&Element_Id=380&DomainScienceType_Id=7)

[17] M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.

[18] A, Mefti; M, Y, bouroubi; H, Mimouni. Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002).

[19] K, Merzouk. Potentiel énergétique éolien, Bulletin des Energies Renouvelables, N°1, p 11, Juin. (2002)

[20] M, Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985).

[21] Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique .Syndicat des énergies renouvelables 13-15, rue de la Baume 75008 Paris. juin 2012.

[22] « Feuille de route Solaire Thermodynamique » guide de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (A D E M E) Version finale Juin 2010.

[23] Quoilin. S, 2007. Les Centrales Solaires à Concentration. Université de Liège.

[24] Bruno Rivoire, Le solaire thermodynamique. Groupe d'évaluation scientifique Thémis : de 1982 à 1987. Un laboratoire propre du CNRS, site d'Odeillo.

[25] Alain FERRIERE (PROMES-CNRS, Odeillo), <<Les centrales solaires à concentration, une solution pour la production massive d'électricité verte ?>>. Laboratoire Procédés, Matériaux et Energie Solaire UPR-CNRS 8521 Odeillo et Perpignan. Ecole Polytechnique - 30 janvier 2009.

[26] Sylvain Quoilin, les centrales solaires à concentration. Faculté des sciences Appliquées, Université de Liège (Mai 2007)

[27] Alban MAHON et al. <Concentrateurs solaires et réalisation d'un mini concentrateur solaire>. Projet de Physique P6-3 STPI/P6-3/2011 – groupe36.

[28] energy.siemens.com/Steam-Turbines.

- [29] El Gharbi.N, Derbal.H, Bouaichaoui.S, Said.N, 2011. A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies. *Energy Procedia* 6, 565–572.
- [30] Boukelia.T, Mecibah. M. S, 2013. Parabolic trough solar thermal power plant: Potential, and projects development in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21, 288–971
- [31] A.Steinfeld et R.Plumbo, solar thermo chemical process technology .edition : *Encyclopedia of physical science et technology*, 2001
- [32] S. Bonned et A. Alaphillipe, Conversion thermodynamique de l'énergie solaire dans des installations de faible et moyenne puissance. *Energ. Ren : 11^{ème} journées internationales de thermique*. pp. 73-80. 2003.
- [33] M. B. Habeebullah, A. M. Khalifa, and I. Olw, The oven receiver an approach toward the revival of concentrating solar cookers, *Solar Energy*, Vol. 54, No. 4, pp. 227-237, 1995.
- [34] M.Geyer, and, W.B.Stine, *Power From the Sun (Powerfromthesun.net)*. J.T. Lyle Center, 2001.
- [35] for the Bernd Hafner, Christian Faber, Methods design and thermal characterisation of solar cookers, *Solar cooker test procedure ECSCR, Version 2*, 1993.
- [36] D.Kedwards, L.Marlot, *Capteurs Solaires*, Edition S C M, Paris 1979.
- [37] Ari.Rabl, *Optical and Thermal Properties of Compound Parabolic concentrators*, *Solar Energy* .Vol18, pp 497-511. Pergamon press 1976.
- [38] Paulin Gallet, François Papini, George Péri, *physique des convertisseurs hélio-thermiques*, EDI SUD (1980)
- [39] J.E .Braun et J.C .Mitchell, *Solar geometry for fixed and tracking surface*. *Solar Energy*, vol.31.N°.pp394-444, (1983).
- [40] S.J. Harrison, Q. Lin and L.C.S. Mesquita, *Intégral stagnation temperature control for solar*. *SESCI 2004 Conférence University of Waterloo Waterloo, Ontario, Canada August 21st–25th*, 2004.
- [41] Bruno Rivoire, *Le solaire thermodynamique*. Groupe d'évaluation scientifique Thémis : de 1982 à 1987. Un laboratoire propre du CNRS, site d'Odeillo.

[42] A. FERRIERE, Séminaire IPN Orsay, 17 sep. 2007.

[43] El Hadj Malick KANE, Intégration et Optimisation Thermoéconomique & Environnementale de Centrales Thermiques Solaires Hybrides thèse de doctorat N° 2565 Lausanne, EPFL (2002).