

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMGEN -
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE.



Mémoire



Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Option : Physique Energetique et Matériaux.

Présenté par :

Melle. BENHABIB Loubna.

Thème :

**Modélisation d'un concentrateur cylindro-
parabolique.**

Sous la direction de :

Mr. A. BENYOUCEF.

Devant les membres de jury composés de :

Président :

Dr. L. MERAD.

Examineurs :

*Dr. M. BOUCHAOUR.
Dr. I. CHIKH-BLED.*

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2012-2013



1
6
4

TABLE DES MATIÈRES.

Liste des figures.	.....2
Liste des tableaux.	.....3
Liste des symboles.	.....4
Introduction générale.	.....6
<u>Chapitre .I. L'énergie solaire.</u>	
Introduction.	.....9
I.1 L'énergie solaire.	..... 9
I.1.1 Aperçu de la ressource.	..... 9
I.1.2 Mouvement terrestre.	.....10
I.1.3 Positionnement solaire.	.....11
• Mouvement apparent du soleil.	.....11
• Rayonnement solaire.	.....12
I.2 Transfert de chaleur.	.....14
I.2.1 Transfert de chaleur par conduction.	.....14
I.2.2 Transfert de chaleur par convection.	.....15
I.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement.	.....19
Conclusion.	.....24
 <u>Chapitre .II. La conversion thermodynamique.</u>	
Introduction.	.....26
II.1 Historique.	.....26
II.2 Etat d'art des concentrateurs solaires.	.....32
II.3 L'intérêt de la concentration.	.....33
II.4 Différents types de concentrateurs solaires.	.....32
II.4.1 Systèmes de concentration linéaire.	.....34
• Concentrateur à miroir cylindro parabolique.	.....34



Chapitre .IV. Modélisation du concentrateur cylindro-parabolique.

Introduction.	.....61
IV.1 Modélisation du CCP.	.....61
IV.1.1 Description du concentrateur.	.....61
IV.1.2 Bilan énergétique du concentrateur.	.....62
• Coefficient de concentration.	.....62
• Radiation solaire.	.....62
• Bilan final.	.....63
IV.1.3 Stratégie de la résolution.	.....64
• Hypothèses.	.....64
• Paramètres utilisés.	.....65
• Méthode de résolution.	.....66
IV.1.4 Résultats de la simulation.	.....66
IV.1.5 Discussion.	..... 71
Conclusion.	.....72
Conclusion générale.	.....74
Références bibliographiques.	
Annexes.	

LISTE DES FIGURES.

<u>Figure</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
I.1.	Mouvement terrestre.	6
I.2.	Sphère céleste et plan de l'écliptique.	7
I.3.	Position du soleil.	7
I.4.	Répartition spectrale du rayonnement solaire.	9
I.5.	Composantes du rayonnement solaire.	10
I.6.	Répartition de l'énergie incidente.	18
I.7.	Modélisation du corps noir.	18
II.1.	Théorie d'Archimèdes.	23
II.2.	Le concentrateur de Lavoisier.	24
II.3.	Le capteur à concentration d'Augustin Mouchot.	24
II.4.	Le moteur Stirling de Robert Stirling.	25
II.5.	Centrale construite en 1912.	26
II.6.	Le miroir parabolique à Mont Louis.	27
II.7.	Le premier système à miroir de Fresnel.	27
II.8.	La centrale solaire Thémis.	28
II.9.	La centrale à miroirs cylindro-paraboliques.	28
II.10.	La centrale à Tour plantée.	29
II.11.	a)PS20, b)Nevada Solar One, c)Andasol.	30
II.12.	Régions favorable du solaire concentré.	31



III.1.	Le premier CCP inventé.	40
III.2.	Le capteur cylindro-parabolique.	43
III.3.	Les constituants du CCP.	44
III.4.	Le tube récepteur.	45
III.5.	Poursuite du soleil par le collecteur CP.	47
III.6.	Progression de la technologie CP.	48
III.7.	Configuration typique d'une centrale à CCP.	49
III.8.	Hybridation d'une centrale cylindro-parabolique essentiellement fossile ISCC.	56
III.9.	Principe d'une centrale thermodynamique.	59
IV.1.	Le concentrateur cylindro-parabolique.	64
IV.2.	Variation de la densité du flux solaire en fonction Du temps.	69
IV.3.	Variation de la température du fluide à l'entrée Et à la sortie de l'absorbeur.	70
IV.4.	Variation de la température de l'absorbeur et La température moyenne du fluide	71
IV.5.	Variation de la T° de l'absorbeur et la vitre.	72



LISTE DES TABLEAUX.

<u>Tableau</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
I.1.	Propriétés de l'air.	13
I.2.	Propriétés de l'eau.	14
I.3.	L'ordre de h pour différentes configurations	15
II.1.	Projets des centrales solaires dans le monde.	35
II.2.	Principales techniques des différents systèmes de concentration solaire.	36
III.1.	Principales installations du CCP.	41
III.2.	Fluides caloporteurs/ Fluides de travail.	52
III.3.	Propriétés thermodynamiques de quelques matériaux Pour le stockage de la chaleur.	55
III.4.	Caractéristiques des principales filières.	58
IV.1.	Paramètres de simulation.	67

NOMENCLATURE :

C, Cp	Capacité calorifique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
Capp	Conductance apparente des pertes thermiques ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
C _g	Concentration géométrique moyenne -
E	Eclairement solaire ($W.m^{-2}$)
F	Facteur de trouble de Linke
h'	Conductance interne ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
h''	Conductance externe ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
h _s	Hauteur du soleil (°)
H	Enthalpie ($J.kg^{-1}$)
L	Largeur (m)
l	Longueur (m)
M	Masse (kg)
\dot{M}	Débit massique ($kg.s^{-1}$)
R	Rayonnement solaire diffus ($W.m^{-2}$)
S	Surface (m^2)
G	Rayonnement solaire direct ($W.m^{-2}$)
t	Temps (s)
T	Température (K)
U	Coefficient d'échange thermique ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
V	Vitesse (m/s)
V _l	Volume (m^3)

Lettres grecques

α	Absorptivité
ε	Emissivité
ρ	Masse volumique, Réflectivité (kgm^{-3}),
σ	Constante de Stefan ($W.m^{-2}.K^{-4}$)
τ	Transmissivité
Φ	Diamètre (m)

Indices et exposants

Abs	Absorbeur du capteur solaire
a	Ambiant
c	Convection naturelle
c _o	Concentrateur solaire
c _f	Convection forcée
e	Entrée
f _l	Fluide caloporteur
r	Rayonnement
r _f	Référence
s	Sortie
v	Vitre



INTRODUCTION GÉNÉRALE.

Le gisement solaire est une source d'énergie renouvelable disponible en grande quantité, en tout point de la surface terrestre et gratuite.

A nos jours, une importance particulière est accordée aux énergies nouvelles et renouvelables. Cet intérêt est dû d'une part à la croissance accrue de la demande mondiale en énergie conventionnelle et ses problèmes d'approvisionnement, et d'autre part, au coût élevé de cette dernière et la pollution qu'elle provoque. De ce fait, apparaît l'énergie solaire comme étant l'énergie de l'avenir. Elle aura un grand rôle à jouer tout en étant la seule solution pour l'établissement d'une chaîne de froid décentralisée et énergétiquement autonome.

L'énergie thermique du soleil permet ainsi de produire de l'électricité par voie thermodynamique. C'est ce que l'on appelle « **électricité solaire thermodynamique** », et qui est l'ensemble des techniques qui transforment l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée puis grâce aux propriétés des fluides caloporteurs en énergie mécanique puis électrique. Cette technique ne devient intéressante que lorsque le fluide caloporteur est chauffé à haute température. En effet la température de la source chaude est le paramètre déterminant du rendement thermodynamique des procédés de conversion.

Le principe du solaire thermodynamique est l'obtention de haute température grâce à la concentration du rayonnement solaire. L'énergie solaire reçue (incidente) par la surface de capteur (le plus souvent formée de miroirs) est concentrée (réfléchi) en un récepteur de surface beaucoup plus petite (foyer). Dans notre cas, et parmi les différents capteurs conçus pour la concentration du rayonnement on cite le collecteur cylindro parabolique. Et c'est ce qui va être question dans ce mémoire.

Le rapport des surfaces capteurs sur récepteur est le taux ou degré de concentration. L'intensité de la concentration est définie par ce facteur de concentration. Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante.

Dans le premier chapitre, on se propose de mettre en exergue l'aspect historique, d'un point de vue plus vaste, sur les différents systèmes de concentration disponible, ainsi que leur état de l'art.

Notre étude est de présenter un des systèmes de concentrations afin de le développer. Dans notre cas, on a choisi le système à concentrateur cylindro-parabolique. Ces systèmes sont les plus répandus dans le monde grâce au meilleur rendement obtenu.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, un aperçu global sur l'énergie solaire sera donné en détaillant les principales formules qui servent à évaluer le gisement solaire d'une région donnée en un temps donné, ainsi qu'une description des formules régissant les différents modes de transfert de chaleur qui nous servirons dans notre étude.

Le deuxième chapitre est conçu pour l'historique est les généralités des systèmes de conversion thermodynamique, où une attention particulière est réservée aux systèmes à concentration, en donnant un état de l'art de cette technique prometteuse de conversion de l'énergie solaire.

Dans le troisième chapitre, une attention particulière est donnée aux systèmes à concentrations cylindro-paraboliques, objet de notre étude. Le principe de fonctionnement de ces convertisseurs, leur état de l'art, ainsi que leur intégration dans des systèmes plus vastes (centrale électriques), sont détaillés.

Enfin dans le dernier chapitre, l'objectif principal est la modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique. Un modèle mathématique est établi pour contrôler la température de sortie du fluide caloporteur ainsi que les températures de l'absorbeur et de la vitre. La simulation du processus de chauffage du fluide est effectuée heure par heure du lever du soleil jusqu'au coucher. Cette simulation nous permet d'optimiser quelques paramètres d'entrée du système pour un fonctionnement optimal du concentrateur.

CHAPITRE. 1.
L'ÉNERGIE SOLAIRE.

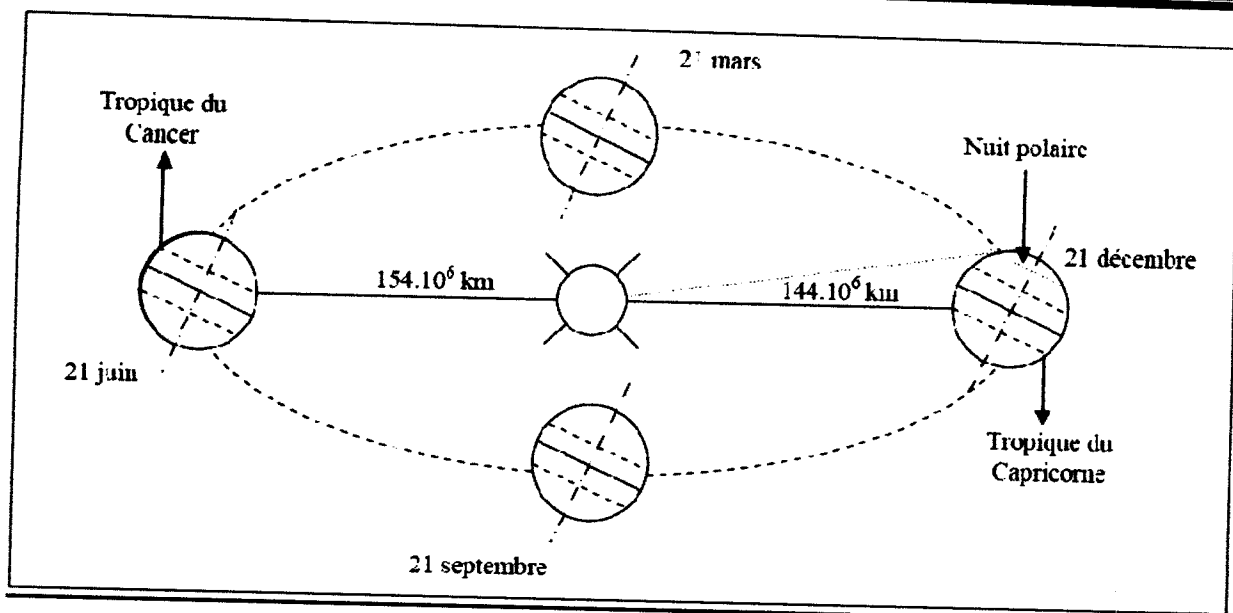


Fig.I.3. : Sphère céleste et plan de l'écliptique.

• **I.1.3. Positionnement Solaire :**

❖ **Mouvement apparent du soleil :**

Nous savons tous que c'est la Terre qui tourne autour du Soleil. Mais pour nous, qui sommes sur la Terre, c'est le Soleil que nous voyons tourner autour de la Terre d'Est en Ouest. C'est ce qu'on appelle la course apparente du Soleil. Celle-ci varie au cours des saisons. Elle varie d'autant plus que la latitude du lieu d'observation est élevée.

Le matin, le Soleil apparaît à l'Est, bas sur l'horizon, c'est le « lever ». Alors qu'à midi (heure solaire), le Soleil est placé au Sud ou au Nord, et est au plus haut de sa course apparente. Le soir, le Soleil est à l'Ouest, bas sur l'horizon, c'est le « coucher ».

On positionne le soleil suivant l'intermédiaire de deux angles, l'azimut a et la hauteur h du soleil. (Fig.I.3.)

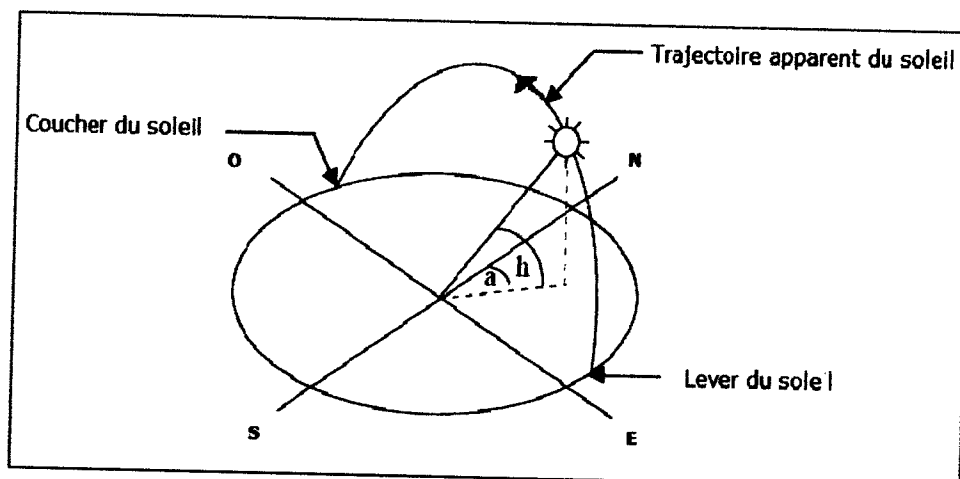


Fig.I.4. : Position du soleil.



- **La hauteur** du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal.

$$\sin(h) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (I.3)$$

- **L'azimut** est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur l'horizon avec la direction Sud ou Nord.

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (I.4)$$

L'azimut et la hauteur du soleil sont fonction de :

- La latitude du lieu \square .
- Le numéro du jour de l'année :] 365;1[\square j
- L'heure solaire dans la journée. On définit l'heure solaire TS= 12h lorsque le soleil est à son zénith soit à sa hauteur maximale.

- On définit l'angle angulaire par :

$$\omega = 15^\circ (TS - 12). \quad (I.5)$$

Où TS est le temps solaire.

- Le **temps solaire** se calcul par :

$$TS = TL - C + ET + 4 * \text{Longitude}. \quad (I.6)$$

Avec :

- **C** : qui est le décalage du fuseau horaire,
- **ET** : est l'équation du temps qui permet la correction temporelle en fonction de la vitesse de la Terre sur sa trajectoire autour du soleil.

$$ET = - [0.0002 - 0.4797 \cdot \cos(j) + 3.2265 \cdot \cos(2j) + 0.0903 \cdot \cos(3j) + 7.3509 \cdot \sin(j) + 9.3912 \cdot \sin(2j) + 0.3361 \cdot \sin(3j)] \quad (I.7)$$

-TL est le temps légal, le temps de référence du pays.

- **Longitude (L)** : correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien (origine 0°) le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest.

❖ Rayonnement solaire :

Les réactions thermonucléaires qui se produisent au sein du soleil, provoquent l'émission d'onde électromagnétique de très forte puissance ou rayonnement thermique solaire.

Le rayonnement ou spectre solaire se présente sensiblement comme celui d'un corps noir à 5 800°K. L'énergie solaire reçue par la terre en dehors de l'atmosphère est environ 1 370 W/m². Cette grandeur est appelée constante solaire.

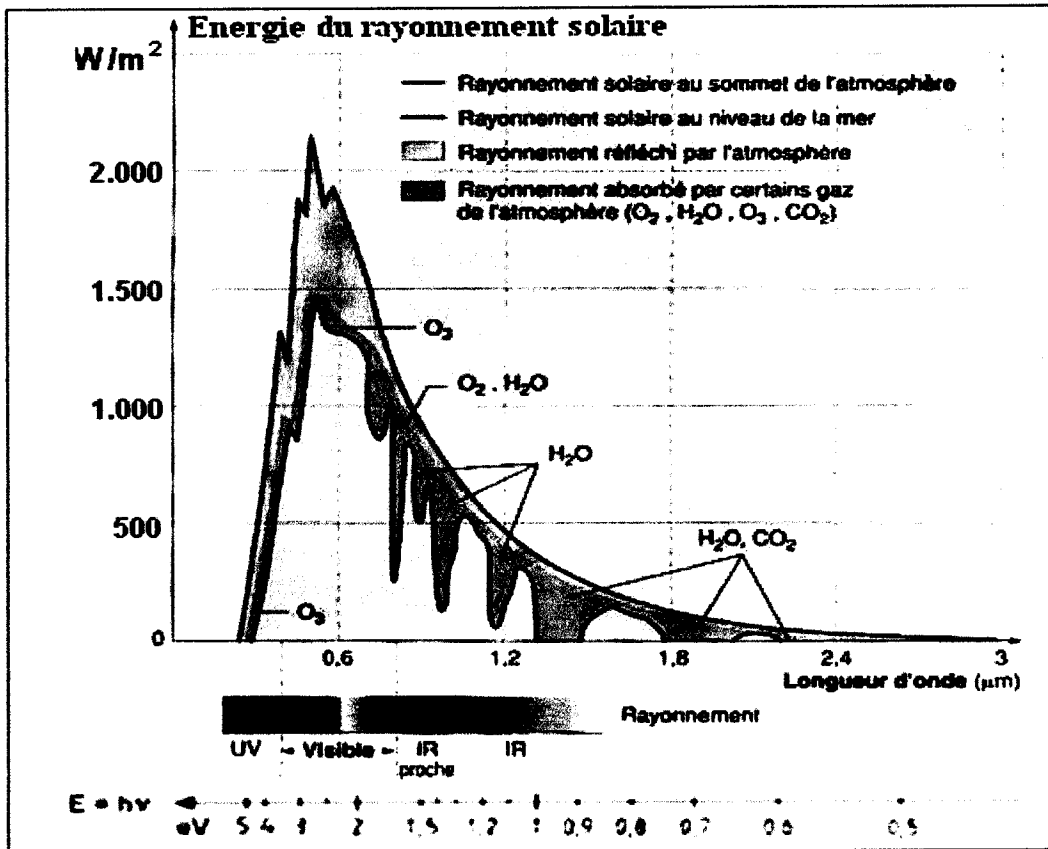


Fig.I.5. : Répartition spectrale du rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire est ainsi composé de deux types de rayonnement (la proportion du rayonnement dû à l'albédo étant très faible) :

- le rayonnement solaire **direct** définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire, Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.
- et le rayonnement solaire **diffus** correspondant au rayonnement dispersé dans l'atmosphère par la brume, le ciel lui-même, et les nuages. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit.
- l'albédo est la partie réfléchié par le sol. Dépend de l'environnement du site. On le définit comme le rapport réfléchié au sol par une surface et l'énergie incident par le soleil. (Exemple : neige. 80-90% ; eau. 0.7%).

Le rayonnement solaire global est alors la somme de ces diverses contributions (direct, diffus et albédo) et dont l'intensité est variable d'un endroit à un autre et d'une heure à l'autre.

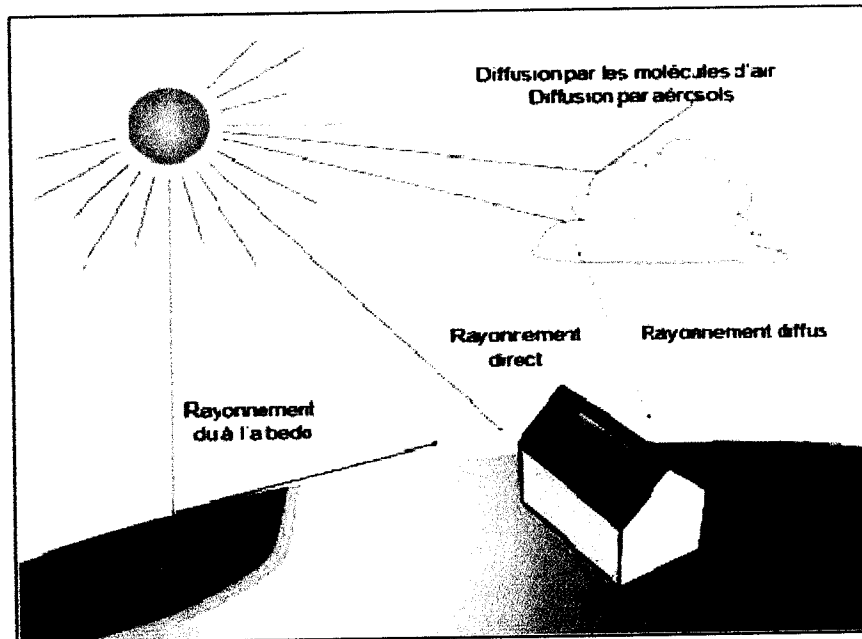


Fig.I.6. : Composantes du rayonnement solaire.

I.2. Transfert de chaleur : [1.3]

• I.2.1. Transfert de chaleur par conduction :

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts. Une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier (= la densité de flux est proportionnelle au gradient de température).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q_v \quad (I.8)$$

Avec : ρ : masse volumique (kg/m^3)

λ : conductivité thermique du matériau ($\text{w/}^\circ\text{km}$)

C_p : capacité thermique massique (J/kgk)

q_v : densité volumique du flux (w/m^3)

En posant les hypothèses suivantes :

$\lambda = \text{constante}$; $q_v = 0$; $dT/dt = 0$ (régime permanent).

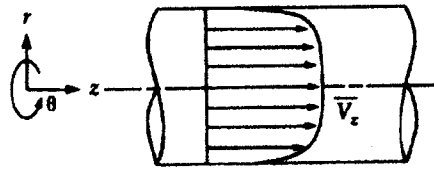
Flux monodimensionnel $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$

On va trouver une forme simplifiée de telle loi qui dit que la valeur instantanée du débit calorifique est égale à :

$$\varphi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (I.9)$$

Régime turbulent :

L'écoulement n'est pas unidirectionnel ; l'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans toutes les directions.

❖ **Calcul du coefficient d'échange par convection "h" :**

Le flux de chaleur est exprimé par :

$$\varphi = h S(T - T_0) \quad (I.10)$$

h : Coefficient d'échange par convection ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

$T - T_0$: différence de la température de la paroi et du fluide. ($^\circ C$)

En convection forcée : h est indépendant de différence de températures de la paroi et du fluide, il dépend de six grandeurs dans le cas d'une convection forcée dans un tube :

- U_m : Vitesse moyenne du fluide. (m/s)
- ρ : Masse volumique du fluide. (kg/m^3)
- C_p : Chaleur spécifique du fluide. ($J/kg \cdot ^\circ C$)
- μ : Viscosité dynamique du fluide. (Pa.s)
- D : Dimension de la surface d'échange. (m^2)
- λ : Conductivité thermique du fluide. ($W/m \cdot ^\circ C$)

A partir de ces grandeurs, on définit les nombres suivants :

- ✓ Dans un tube : à partir du théorème de Vaschy-Buckingham, h peut s'exprimer en fonction de quatre unités fondamentales (nombres adimensionnels).

Nombre de Nusselt : caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

$$Nu = \frac{h D}{\lambda} \quad (I.11)$$

Nombre de Reynolds : caractérise le régime d'écoulement.

$$Re = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad (I.12)$$

Pour $Re < 2000$ régime laminaire.

Pour $Re > 3000$ régime turbulent.

Nombre de Prandtl : caractérise les propriétés thermiques du fluide.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (I.13)$$

Remarque :

Pour des conduites non circulaires $D = D_h = \frac{4 \cdot \text{section de passage}}{\text{périmètre mouillé}}$

Pour tous les fluides $Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.33}$ -formule de Colburn-

Pour un gaz $Pr \approx 0.75$; $Nu = 0.02 \cdot Re^{0.8}$

✓ Propriétés des fluides :

Air : l'air qui se comporte comme un gaz parfait, la masse volumique s'écrit pour la pression $P = 1 \text{ Pa}$ sous la forme

Température T (°C)	Conductivité thermique λ (w/m°C)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Chaleur spécifique Cp (J/kg°C)	Viscosité dynamique μ (Pa.s)
-20	0.02256			
0	0.02313		1000	17.19*10-6
20	0.02512			
40	0.02652	1.275		
50	0.02680		1005	19.26*10-6
60	0.02791			
80	0.02931			
100	0.03070		1009	21.34*10-6

Tableau (I.1) : Propriété de l'air.

Eau : contrairement aux gaz, les propriétés de l'eau varient en fonction de la température

Température T (°C)	Conductivité thermique λ (w/m°C)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Chaleur spécifique Cp (J/kg°C)	Viscosité dynamique μ 10-3 (Pa.s)
0	0.555	1000	4220	1.789
5				1.515
10			4183	1.306
20	0.598	998	4178	1.005
30				0.802
40	0.627	992	4178	0.653
50		988		0.550
60	0.651	983	4191	0.470
70		977.7		0.406
80	0.669	971.6	4199	0.355
90		965.1		0.315
100 liquides	0.682	985.1	4216	0.282
100 vapeurs	0.025	0.8 kg/Nm ³	1900	0.012

Tableau (I.2) : Propriété de l'eau.

• En convection naturelle :

$$\Phi = h S (T - T_0) \quad (I.14)$$

✓ Grandeur caractéristique :

Nombre de Grashof :

$$Gr = \frac{l^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (I.15)$$

l : dimension linéaire de la surface d'échange.

β : coefficient de dilatation volumique du fluide.

Air : $=1/T$ (T : température en °k)

Eau : $=0.20$ (pour 20°C) ; $=0.53$ (pour 60°C) ; $=0.67$ (pour 90°C).

ΔT : écart de température paroi-fluide.

g : accélération de la pesanteur.

ρ : Masse volumique du fluide.

μ : viscosité dynamique du fluide.

- Convection turbulente $Gr > 10^9$

- Convection laminaire $Gr < 10^9$

✓ Expression du Nusselt : $Nu = C (Gr.Pr)^n \quad (I.16)$

Avec $n = 1/4$ convection laminaire $0.2 < C < 0.6$

$n = 1/3$ convection turbulente $0.07 < C < 0.15$

C : coefficient dépend du régime de convection et de la géométrie.

Le calcul du flux de chaleur dans le transfert par convection consiste à déterminer le coefficient de transfert de chaleur h. dans le tableau suivant, on trouvera l'ordre de grandeur du coefficient pour différente configuration.

Configuration	h (Wm ⁻² °C ⁻¹)
Convection naturelle	
-Plaque verticale de hauteur 0,3 m dans l'air	4,5
-Cylindre horizontal de diamètre 5 cm dans l'air	6,5
-Cylindre horizontal de diamètre 2 cm dans l'eau	890

Convection forcée	
-Courant d'air à 2 m/s sur une plaque carrée de 2 m de côté.	12
-Courant d'air à 35 m/s sur une plaque carrée de 0,75 m de côté	75
-Eau à 0,5 kg/s dans un tube de diamètre 2,5 cm	3500
-Courant d'air à 50 m/s perpendiculaire à un tube de diamètre 5 cm	180
Ebullition de l'eau	
-Dans un récipient	2500-35000
-En écoulement dans un tube	5000-100000
Condensation de l'eau sous 1 atm	
-Sur une surface verticale	1000-11000
-A l'extérieur de tubes horizontaux	10000-25000

Tableau (I.3) : L'ordre de h pour différentes configurations.

• **I.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement :**

C'est le transfert de chaleur entre deux corps séparés par un vide ou un milieu transparent. Le rayonnement est caractérisé par l'émission d'ondes électromagnétiques par la matière, ce qui signifie que le rayonnement est une forme d'énergie et non pas une forme de chaleur.

La vibration électromagnétique est caractérisée par sa fréquence qui ne varie pas avec le milieu qu'elle traverse d'où la relation de la longueur d'onde $\lambda = c/f$ [m]

Le rayonnement thermique émis par les corps se situe entre 0.1 et 100. μm

Il est aperçu : par l'œil pour $0.31 \mu\text{m} < \lambda < 0.79 \mu\text{m}$ rayonnement visible

Par la peau pour $0.79 \mu\text{m} < \lambda < 314 \mu\text{m}$ rayonnement infra rouge

D'après la loi de Planck ; une onde transporte avec elle de l'énergie.

$$E = h \cdot f \quad (\text{I.17})$$

Ou : $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ constante de Planck.

❖ **Définitions relatives au rayonnement thermique :**

-Flux énergétique : caractérise le rayonnement total émis dans toutes les directions par une surface émettrice pendant le temps :

$$\phi = \frac{dE}{dt} \quad [\text{W}] \quad (\text{I.18})$$

Pour de longueur d'onde comprise entre λ et $\lambda+d\lambda$, le flux est dit monochromatique.

$$\phi_\lambda = \frac{d\phi}{d\lambda} \quad [\text{w/m}] \quad (\text{I.19})$$

-Emittance : on sait que le flux énergétique dépend de la surface émettrice. D'où l'émittance totale :

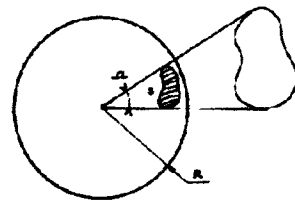
$$M = \frac{d\phi}{ds} \quad [\text{w/m}^2] \quad (\text{I.20})$$

Et l'émittance monochromatique :

$$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda} \quad [\text{w/m}^3] \quad (\text{I.21})$$

-L'angle solide :

$$\Omega = S / R^2 \quad [\text{sr}] \quad (\text{I.22})$$

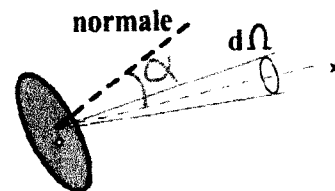


Pour un point O, le contour dS, l'angle solide est calculé par :

$$d\Omega = \frac{dS \cos\alpha}{r^2} \quad (\text{I.23})$$

-Intensité : caractérise le flux dans une direction donnée :

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad [\text{w/sr}] \quad (\text{I.24})$$



-Luminance : c'est le flux émis par unité de surface et par unité d'angle solide dans une direction donnée :

$$L_\lambda = \frac{d\phi_\lambda}{d\Omega dS \cos\alpha d\lambda} \quad [\text{w/m}^2\text{sr}] \quad (\text{I.25})$$

Et la luminance totale :

$$L = \frac{d\phi}{d\Omega dS \cos\alpha} \quad [\text{w/m}^2\text{sr}] \quad (\text{I.26})$$



La relation entre l'émittance et luminance étant :

$$M = \int_{\Omega} L \cos \alpha \, d\Omega \quad (1.27)$$

On dit qu'une source satisfait la loi de Lambert, si sa luminance ne dépend pas de la direction d'émission :

$$M = \pi L \quad (1.28)$$

❖ Définitions relatives au récepteur :

-Eclairement "E" : est le flux reçu par unité de surface réceptrice pour l'ensemble des directions.

-Répartition du rayonnement : une partie de l'énergie incidente est réfléchiée, une autre est absorbée et enfin une troisième est transmise (filtrée).

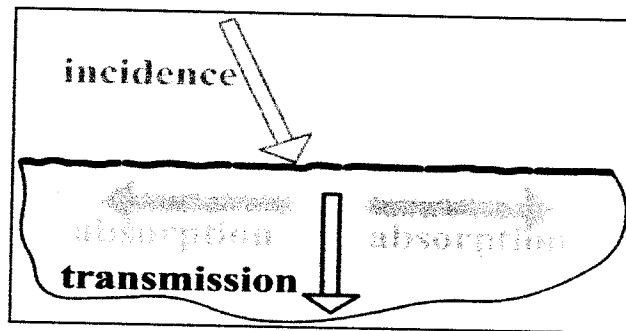


Fig.I.7. : Répartition de l'énergie incidente.

On déterminera les coefficients suivants:

- Coefficient de réflexion : $\rho = \frac{\text{flux réfléchi}}{\text{flux incident}}$
- Coefficient d'absorption : $\alpha = \frac{\text{flux absorbé}}{\text{flux incident}}$
- Coefficient de transmission : $\tau = \frac{\text{flux transmis}}{\text{flux incident}}$

$$\tau + \alpha + \rho = 1$$

Ainsi ces coefficients dépendent de la longueur d'onde et de la température T.



❖ Lois d'émission du corps noirs :

C'est un corps de référence qui absorbe intégralement tout rayonnement reçu ; $\alpha = 1$ (quel que soit la valeur de longueur d'onde et la valeur de la température).

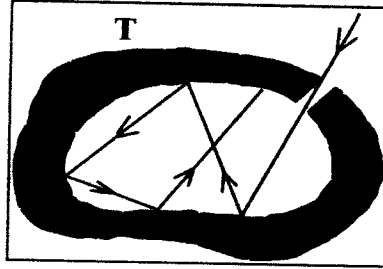


Fig.I.8. : modélisation du corps noir.

-Loi de Planck : le corps noir répond au modèle de Planck pour une luminance indépendante de la direction et s'exprime pour une seule longueur d'onde

$$L_{\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad [\text{w/m}^3 \text{sr}] \quad (\text{I.29})$$

Ou : $C_1 = 1.19 \cdot 10^{-16} [\text{w/m}^3 \cdot \text{sr}]$ et $C_2 = 1.44 \cdot 10^{-2} [\text{mk}]$

De cette loi on déduit deux autres lois importantes –loi de Wien- et –loi de Stefan-Boltzmann-

-Loi de Wien : cette loi annonce que pour chaque température donnée, il correspond une longueur d'onde particulière pour laquelle la luminance est maximale

$$\lambda_{\max} = \frac{C_3}{T} \quad [\text{m}] \quad (\text{I.30})$$

Ou : $C_3 = 2.89 \cdot 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{k}]$

-Loi de Stefan-Boltzmann : cette loi exprime l'émittance totale donnée par l'intégration de la loi de Planck sur toutes longueurs d'onde.

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{I.31})$$

Ou : $\sigma = \text{constante de Stefan Boltzmann} = 5.672 \cdot 10^{-8} [\text{w/m}^2 \text{k}^4]$

-Loi de Kirchhoff : la loi dit qu'à une température donnée, le rapport $\frac{M_{\lambda}}{\alpha} = \text{cst}$, quelle que soit le corps considéré. Comme pour le corps noir $\alpha=1$, on dit qu'il est le meilleur corps metteur ainsi bien qu'il soit le meilleur absorbant.

❖ Cas du corps gris :

Le corps gris est un corps qui absorbe le rayonnement de la même manière qu'un corps noir quel que soit la longueur d'onde. Ça nous mène à dire que l'émittance totale d'un corps gris à T est égale à l'émittance totale du corps noir à cette T multipliée par son coefficient d'absorption.

❖ L'émissivité :

L'émissivité des corps réels est défini à celle du corps noir dans les même conditions.

$$\varepsilon = \frac{M}{M_{cn}} \quad (I.32)$$

Les propriétés d'un corps réel assimilé à un corps gris à émission diffuse seront définies par son émissivité, son coefficient de réflexion s'il s'agit d'un corps opaque avec $\alpha = \varepsilon$ (d'après la loi de Kirchhoff) et $\alpha + \rho = 1$ ($\tau=0$).

Conclusion :

L'énergie solaire est l'avenir énergétique de l'humanité, puisqu'elle est abondante et inépuisable. Sa conversion en d'autres formes d'énergie passe par une étude préalable du gisement solaire de la région de conversion et elle nécessite des systèmes de conversions : photovoltaïque et photo thermique. Cette dernière forme de conversion nécessite une meilleure compréhension des mécanismes de base de transfert de chaleur (conduction, convection et/ou rayonnement) pour une conversion optimale.

CHAPITRE.2.
LA CONVERSION
THERMODYNAMIQUE.



Chapitre -II-**La conversion thermodynamique****Introduction :**

La conversion thermodynamique de l'énergie solaire est l'un des procédés les plus prometteurs en conversion d'énergie solaire. Tout comme le solaire photovoltaïque, le solaire thermodynamique tire profit du rayonnement solaire pour produire de l'électricité. Mais ces deux technologies la valorisent différemment. Alors que pour le photovoltaïque, le rayonnement solaire est directement converti en électricité, le solaire thermodynamique le convertit en chaleur puis fait intervenir un organe de conversion électrique.

Précisément, le solaire thermodynamique - aussi connu sous le nom de CSP (Concentrated Solar Power) - désigne l'ensemble des techniques visant à transformer l'énergie du rayonnement solaire en chaleur, puis à convertir 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). Il existe trois procédés principaux : les centrales à tour, les centrales à capteurs cylindro-paraboliques, les concentrateurs orientables associés à des moteurs thermiques.

On va consacrer ce chapitre à deux points essentiels qui vont être présentés comme suit :

- Historique et les différents systèmes de concentration.
- L'intérêt de la concentration.

II.1. Historique : [4, 5, 6]

L'idée d'utiliser des collecteurs d'énergie solaire pour harnacher le pouvoir du soleil est enregistré des temps préhistorique 212 av.J.C. Le scientifique / médecin Grec Archimides a imaginé une méthode pour brûler la flotte romaine en réfléchissant et concentrant les rayons du soleil dans les voiles des navires romains et ainsi les enflammer. Cela semble scientifiquement peu probable car des miroirs suffisamment grands étaient techniquement inconcevables, le miroir argentique n'existant pas encore. Seuls des miroirs en bronze poli pouvaient être utilisés.



Fig.II.1. : Théorie du scientifique médecin Grec Archimides.

Pendant le 18.ème siècle, (1743-1794) le chimiste français Antoine Laurent Lavoisier a inventé un four solaire utilisant des lentilles convergentes afin de fondre des métaux (cuivre et d'autres construit de poli-fer). Le four a atteint une température remarquable de 1750°C et il comporté une lentille de 1.32m plus une secondaire de 0.2m.



Fig.II.2. : Le concentrateur de Lavoisier.

En 1860, le professeur de mathématiques du Lycée de Tours, Augustin Mouchot a écrit "Dans le futur on ne trouvera plus de charbon en Europe...que fera l'industrie ?" Sa réponse était la maîtrise de l'énergie solaire. Après 20 ans de recherche, il a inventé le principe de la poursuite du soleil avec un capteur à concentration. La machine exposée à Paris avait un réflecteur en cuivre argenté et un circuit hydraulique dans un cylindre peint en noir, elle produisait assez de vapeur pour faire marcher un moteur avec la puissance d'un demi-cheval.

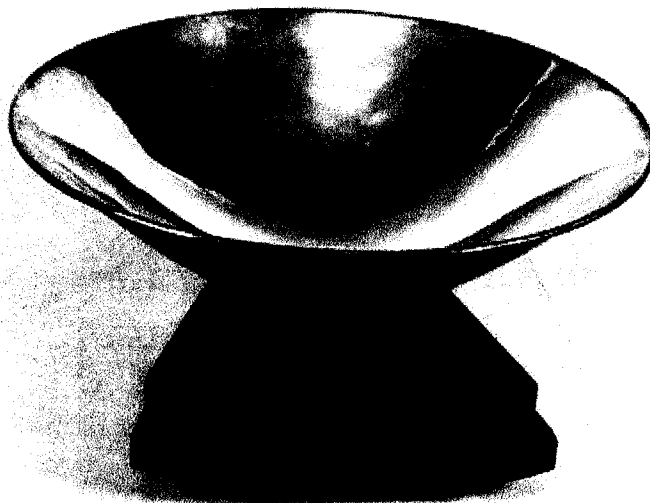


Fig.II.3. : Le capteur à concentration d'Augustin Mouchot.



Le Pasteur écossais Robert Stirling a déposé un brevet pour un "moteur à air chaud" en 1816. L'air enfermé dans un cylindre étant soumis à 4 cycles : chauffage, détente, refroidissement et compression au moyen d'une source de chaleur externe, afin de produire un mouvement rotatif. Malgré de nombreuses applications le moteur "Stirling" ne résistait pas à la compétitivité économique d'abord des moteurs à vapeur et ensuite des moteurs à combustion interne.

Actuellement, les avantages écologiques : silence de fonctionnement, rendement élevé, fiabilité nécessitant peu de maintenance et absence totale de pollution si la source de chaleur est le soleil, font que les moteurs "Stirling" sont utilisés en liaison avec des capteurs solaires à concentration pour produire de l'électricité.

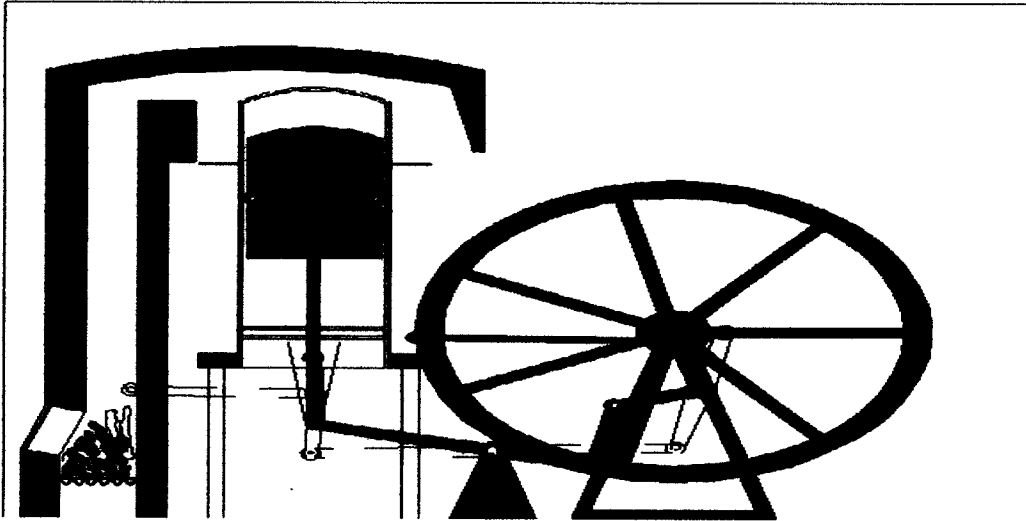


Fig.II.4. : Le moteur stirling de Robert Stirling.

Physicien anglais, Charles Vernon Boys inventeur du capteur cylindro-parabolique, qui a été mis en œuvre pour la première fois en 1912. La centrale thermique solaire à Meadi en Egypte, utilisée pour le pompage de l'eau d'irrigation. Cette centrale a été construite par l'inventeur et entrepreneur américain Frank Shuman en 1912. La conception cylindro parabolique est due au Professeur C.V. Boys. 5 réflecteurs, 60 m par 4 m d'ouverture pouvaient fournir 55 chevaux vapeur et pomper plus de 2.000 litre par minute. Les anglais ont voulu une centrale au Soudan et le gouvernement allemand a commandé des centrales similaires pour leurs colonies en Afrique, mais ces belles perspectives furent abandonnées avec la guerre.



ANOTHER VIEW OF THE SUN-POWER PLANT SHOWN ON p. 229.

Fig.II.5. : Centrale des capteurs cylindro-paraboliques construite en 1912.

En 1944, les Allemands quittent la France et abandonnent à Mont-Louis un projecteur DCA pour repérer les avions. C'est un miroir parabolique orientable au foyer duquel est placée une forte ampoule, ce qui donne un faisceau de lumière parallèle. On dirige alors ce projecteur vers le ciel, la nuit.

En vacances à Mont-Louis Félix Trombe eut l'idée de réutiliser ce projecteur abandonné là, mais à l'envers: on le dirige vers le soleil (de jour donc), et les rayons parallèles du soleil sont concentrés grâce au miroir parabolique vers le foyer. Si on tient une bûche pile à cet endroit, elle prend instantanément feu.

Il dirige en 1949 la création, à Mont-Louis (Pyrénées-Orientales), d'un prototype de four solaire d'une puissance de 50kW, puis du grand four de 1000 kW d'Odeillo Font-Romeu.

Dans le cadre des économies d'énergie ou de l'aide aux pays en voie de développement, Félix Trombe étudie d'autres formes d'exploitation de l'énergie solaire passive. Il crée avec l'architecte Jacques Michel **le Mur Trombe**. Ce mur est composé d'un bloc de béton qui accumule le rayonnement solaire du jour et restitue pendant la nuit la chaleur accumulée.

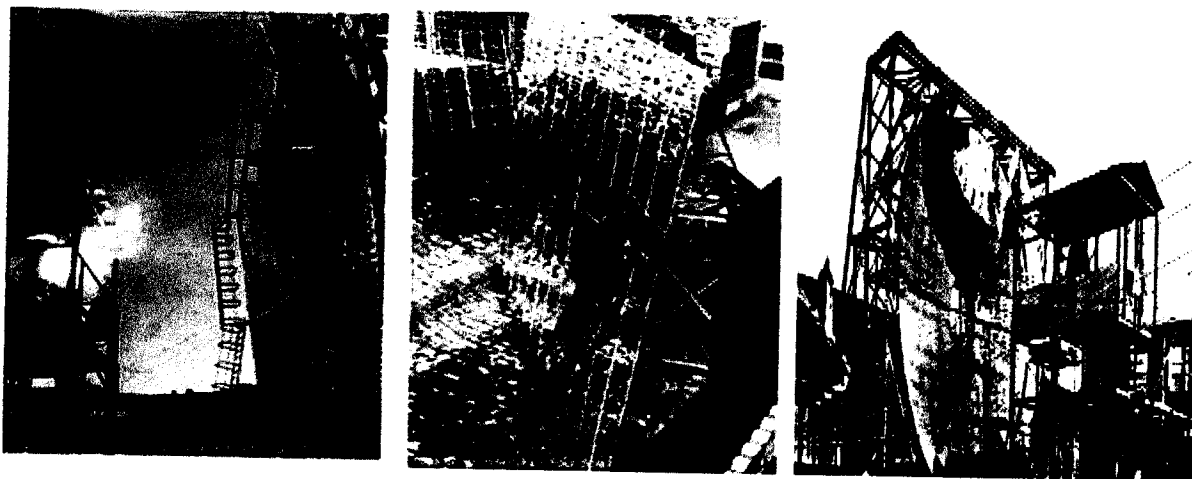


Fig.II.6. : Le miroir parabolique à Mont-Louis

Le premier système CLFR / Compact Linear Fresnel Reflector, au monde a été construit par l'italien **Giovanni Francia** et installé en collaboration avec **Marcel Perrot** à Marseille en 1963.

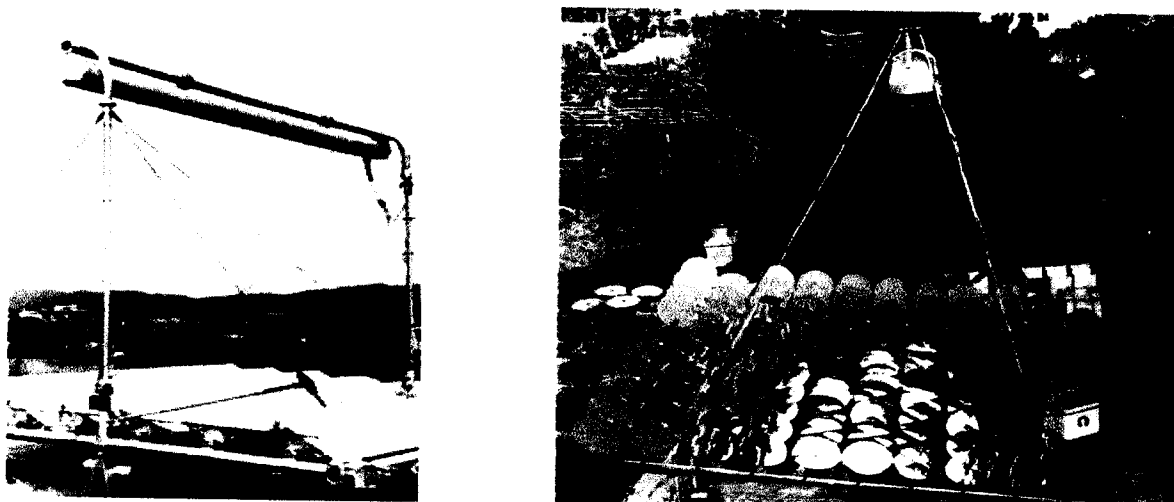


Fig.II.7. : Le premier système à miroirs de Fresnel.

Au début du 20e siècle, les premiers systèmes paraboliques produisant de la vapeur sont conçus. A la fin des années 1970, des projets pilotes de centrales solaires à concentration se développent aux Etats- Unis, en URSS, au Japon et en Europe et les années 1980 marquent le début de la construction en série de ces centrales :

- **1981** : Construction du prototype Solar One, USA. Cette centrale fonctionne de 1982 à 1986.
- **1983** : inauguration par de la centrale solaire **Thémis**, à Targassonne près de Font-Romeu. La centrale est fermée en 1986, la France ayant fait le choix de développer exclusivement la filière fission nucléaire. La centrale ouvre à nouveau en 2007 (projet **PEGASE**).

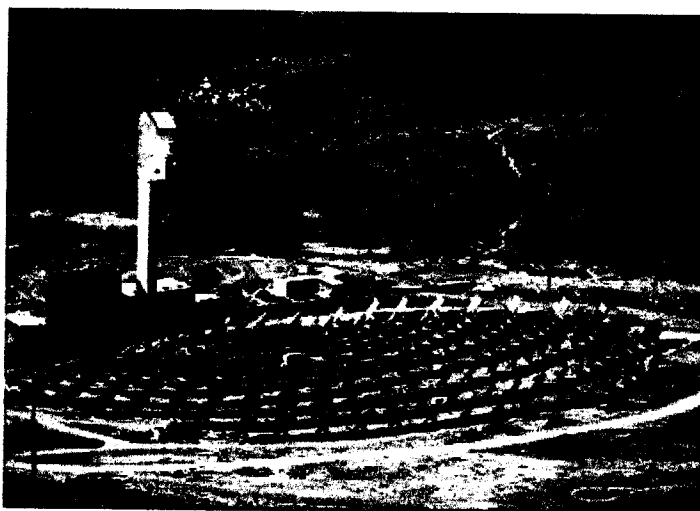


Fig.II.8. : La centrale solaire Thémis.

commerciale qui atteindra 300 MWe en 2013, de quoi alimenter en électricité l'intégralité de la ville de Séville. La construction du module PS20, 20MW se termine.

- **Juillet 2007** : Entrée en service de la centrale commerciale **Nevada Solar One**, 64 MWe, USA
- **Juillet 2008** : inauguration de la centrale **ANDASOL1**, 50 MWe, Grenade, Espagne. Centrale équipée d'un dispositif de stockage de la chaleur pour une autonomie de 8 heures.

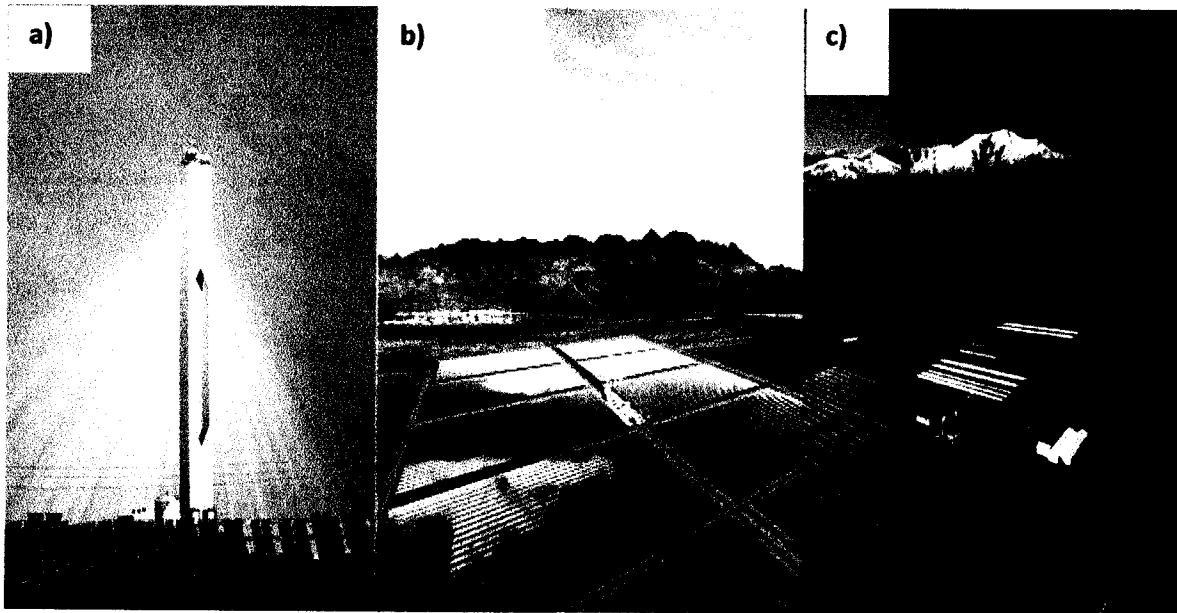


Fig.II.11. : a) PS20 ; b) Nevada Solar One ; c) Andasol

I.2. Etat d'art des concentrateurs solaires :

Un système solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui exploite le rayonnement du Soleil en orientant, au moyen de miroirs, les flux de photons. Ce système thermique concentré permet d'atteindre des niveaux de température bien supérieurs à ceux des systèmes thermiques classiques non concentrés. Alors que les chauffe-eau domestiques produisent une eau à une cinquantaine de degrés, il est possible, par la concentration, de chauffer des fluides à des températures de l'ordre de 250 à 1000°C. Il devient alors envisageable de les utiliser dans des processus industriels comme la génération d'électricité, on parle alors « d'électricité solaire thermodynamique ». D'autres utilisations directes ou indirectes des fluides chauds sont possibles comme le dessalement de l'eau de mer, le refroidissement ou encore la génération d'hydrogène.

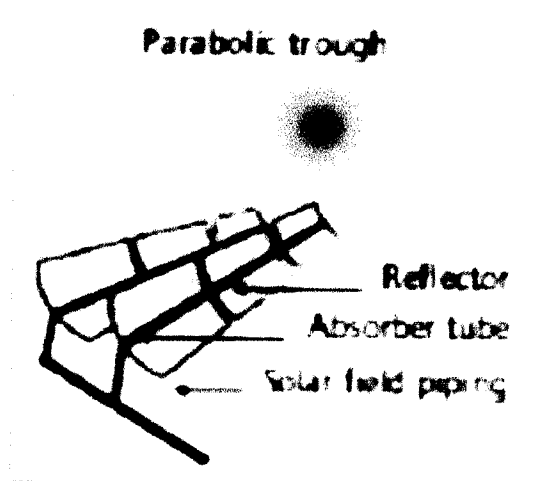
I.4. Différents types de concentrateurs solaires : [10, 6]

Un capteur à concentration est un capteur solaire comportant un système optique (réflecteur, lentilles, ...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement reçu (d'où le nom de capteur à concentration). Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. En utilisant des réflecteurs afin de concentrer les rayons du soleil sur l'absorbeur d'un capteur solaire, cela permet de diminuer grandement la taille de l'absorbeur, ce qui réduit les pertes de chaleur et augmente son efficacité à hautes températures. Un autre avantage de ce système est que les réflecteurs sont sensiblement moins coûteux, par unité de surface, que les capteurs.

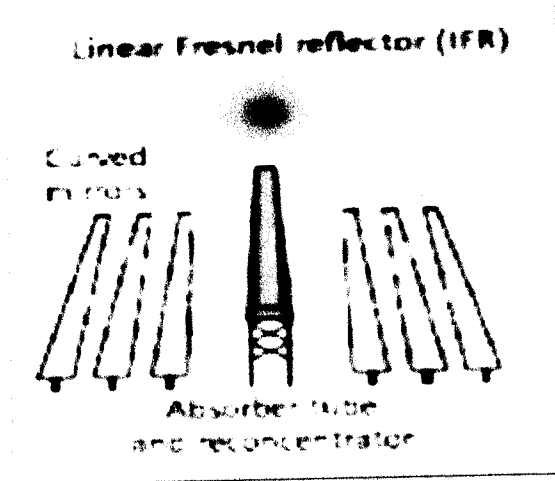
• I.4.1 Systèmes de concentration linéaire

Le rayonnement solaire est concentré sur un ou plusieurs tube(s) absorbeur(s) installé(s) le long de la ligne focale des miroirs. Ce tube contient un fluide caloporteur porté à une température de l'ordre de 250 à 500°C.

❖ Concentrateur à miroirs cylindro-paraboliques:



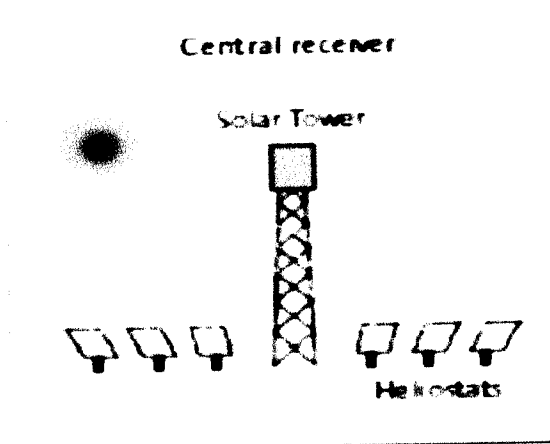
C'est la technologie la plus répandue aujourd'hui. Le foyer d'une parabole est un point, celui d'un miroir cylindro-parabolique est un axe, sur lequel est placé un tube absorbeur (le récepteur) de couleur noire, pour capter un maximum de rayonnement. Dans ce tube circule le fluide caloporteur, qui se réchauffe jusqu'à une température d'environ 500°C et qui est ensuite centralisé et transporté jusqu'au bloc de génération électrique. L'ensemble miroir cylindro-parabolique/récepteur suit le mouvement du Soleil.

❖ **Concentrateur à miroirs de Fresnel :**

Plutôt que de courber les miroirs (processus industriel coûteux), les miroirs de Fresnel « miment » la forme cylindro-parabolique avec des miroirs très légèrement incurvés, et placés à un même niveau horizontal. Seuls les miroirs bougent, la structure et le tube absorbant sont tous deux stationnaires. Les coûts des centrales solaires à miroirs de Fresnel sont donc inférieurs à ceux des centrales à miroirs cylindro-paraboliques tant à l'installation qu'à la maintenance. La focalisation est toutefois dégradée dans ce système (puisque la parabole n'est pas parfaite) : le pari est donc fait sur une baisse de coût supérieure à la dégradation de l'efficacité. Ce type de système est encore relativement peu répandu.

- **I.4.2 Systèmes de concentration par foyer**

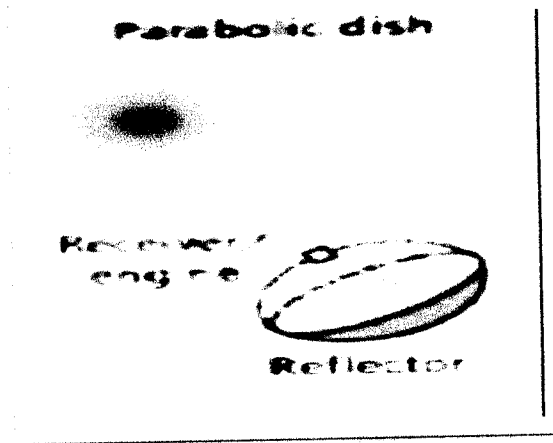
Le rayonnement solaire est concentré environ 1 000 fois à destination d'un foyer unique de taille réduite. La température peut atteindre de 500 à 1 000°C .

❖ **Tour solaire:**

Des centaines de miroirs suivant la course du soleil (les « héliostats ») réfléchissent et concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur central situé au sommet d'une tour, dans

lequel circule le fluide caloporteur. Comme dans les systèmes cylindro-paraboliques, la chaleur du fluide est alors transférée à un cycle classique à vapeur pour générer de l'électricité. Par rapport à un système cylindro-parabolique, la tour solaire offre l'avantage de ne pas avoir à faire circuler de fluide dans l'ensemble du champ de miroirs : les pertes thermiques sont donc significativement réduites. Par ailleurs, le niveau de concentration de l'irradiation peut être bien supérieur, et l'efficacité du cycle thermodynamique s'en trouve augmentée. Il reste que ces gains techniques doivent aussi se traduire par un gain technico-économique, limité par le coût de construction de la tour.

❖ **Concentrateur à miroir parabolique Dish-Stirling:**



Une parabole concentre le rayonnement sur un foyer en son point focal afin d'actionner un moteur dit « Dish-Stirling ». Une fois chauffé dans un circuit fermé, le gaz qu'il contient actionne un piston qui récupère l'énergie mécanique produite. 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.

I.5. Résumé des différentes techniques :

Les centrales solaires thermodynamiques recouvrent l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis à convertir cette chaleur en énergie mécanique et électrique au moyen d'un cycle thermodynamique moteur couplé à une génératrice électrique.

Les projets de centrales solaires dans les pays en développement (Inde, Algérie, Maroc) bénéficient de fonds d'aide au développement accordés par la Banque mondiale. D'où le tableau (II.1) indique les principaux projets.

Ainsi, le tableau (II.2) récapitulatif ci-dessous donne un aperçu de quelques caractéristiques techniques principales des différents systèmes de concentration solaire [8, 11].

Localisation	Capacité solaire	Technologie
USA	1000MW	Cylindro-parabolique +huile
Espagne	515MW 15MW 30MW	Cylindro-parabolique +huile Tour +sels fondus Tour+ vapeur saturée
Israël	100MW	Cylindro-parabolique +huile
Afrique de sud	100MW	Tour+ sels fondus
Egypte	30MW	Cylindro- parabolique+ huile et ISCC
Algérie	30MW	Cylindro- parabolique+ huile et ISCC
Maroc	20MW	Cylindro- parabolique+ huile et ISCC
Italie	20MW	Cylindro- parabolique+ sels fondus
Allemagne	1MW	Tour+ air 1atm

Tableau (II.1) : Projets de centrales solaires dans le monde.

	Systèmes paraboliques	Centrales à tours	Centrales cylindro-paraboliques	Centrales concentrateur Fresnel
Maturité de la filière	Au stade pilote (10unités)	11MWe en exploitation	355MWe en exploitation	Au stade pilote
Puissances des unités actuelles	5 à 25 kWe	10 à 20kWe	30 à 80kWe	5 MWe
Concentration	2000 à 10000 S	1000 à 2000 S	100 à 500 S	100 à 500 S
Caloporteur et sa température	He ou H2 : 600 à 1200°C	Sels fondus : 400 à 600 °C Eau :250à400°C	Huile :270à400°C Eau :250à400°C	Eau : 250°C
Stockage thermique	Non	Béton, céramique, sable	Béton, sels fondus	Béton
Cycle thermodynamique	Stirling (He ouH2, 700°C, 150bars)	Rankine (vapeur saturée ou sèche 250/565°C) ou cycle combiné au gaz	Rankine (vapeur saturée ou sèche 250/565°C)	Rankine (vapeur saturée 250°C)
Avantages et inconvénients	Unités décentralisés, très forte concentration et haute technologie : -Suivi sur 2 axes -Très haute pression -Très haute température Fiabilité Coûts élevés	Centrales industrielles à forte concentration et haute technologie : -suivi sur 2 axes -très haute température Récepteur pointu Système complexe	Centrales industrielles à moyenne concentration, technologie plus simple : -suivi sur un axe -température moyenne Pertes de charges élevées Rendements moyennes	Centrales industrielles à moyenne concentration, technologie plus simple : -réflecteurs plans -suivi sur un axe -températures moyennes Rendements faibles.
Rendements max instantanée à MT	35%	30%	25%	20%
Rendement annuel moyen actuel	19-25%	16-17%	15-16%	9%
Rendement annuel moyen à MT	30%	25%	20%	15%
Rendement optique annuel	90%	60-65%	65-70%	50%

Tableau (II.2) : Principales techniques des différents systèmes de concentration solaire.

Remarque : en fin de tableau la perspective de rendement moyen annuel à MT : (2025)

Conclusion :

D'après notre premier passage, on constate que depuis l'antiquité, les hommes tentent d'exploiter l'énergie solaire pour des usages exclusivement matériels, tels que le chauffage.

On retrouve cette idée dans plusieurs travaux cités dans la partie historique tel qu'Archimède, Lavoisier, etc. Hors, l'énergie solaire subit un essor considérable suite au choc pétrolier, ce qu'il a mené au développement du solaire à concentration.

Ce chapitre fournit un aperçu sur différents systèmes de concentration, ainsi, leur répartition dans le monde.

CHAPITRE.3.
NOTION SUR LE
CONCENTRATEUR
CYLINDRO-PARABOLIQUE.



**Chapitre -III- Notion sur le concentrateur
cylindro-parabolique.**

Introduction :

L'électricité solaire thermodynamique à concentration a le plus grand potentiel et les meilleures caractéristiques pour convertir les rayons solaires en électricité. Les centrales solaires thermodynamiques à concentration permettent de dispatcher efficacement l'énergie, de répondre précisément aux courbes de demande en énergie et peuvent en outre venir en appui à d'autres énergies renouvelables intermittentes.

On présente ici une solution un peu plus économique, avec des performances qui demeurent tout à fait honorables. Sa simplicité, son coût relativement modéré et la fiabilité déjà acquise placent ce système en meilleure position pour un déploiement immédiat de la filière.

Dans ce chapitre, on donnera un historique, quelques notions et un état de l'art sur le système à concentration cylindro-parabolique, objet de notre modélisation au chapitre suivant.

III.1 Le premier concentrateur cylindro-parabolique : [12]

Augustin Bernard-Mouchot (1825-1912) précurseur de l'énergie solaire avait une passion de développer l'utilisation industrielle de l'énergie solaire et trouver un moyen pratique de recueillir et d'utiliser directement les rayons solaires au profit de l'agriculture et de l'industrie dans les régions les plus chaudes du globe. Cependant, le travail de Mouchot n'était pas en vain, car il a formé la base pour le cylindro-parabolique inventé par le capitaine John Ericsson (1803-1889 ; inventeur et ingénieur mécanicien américain d'origine Suédoise). Ce n'était qu'en 1883 que sa vraie invention d'énergie a été faite "le cylindro-parabolique" ;(cylindro coupé en deux en long). La construction du système était beaucoup plus simple et considérablement meilleur marché.

La compagnie Luz Co. est venue à l'esprit immédiatement pour voir ou cette technologie pourrait mener. En se servant des capteurs cylindro-paraboliques Luz a dirigé 10 équipements électriques de 355MW de puissance, ce qui signifie une production de 95% de l'énergie solaire du monde. Les ingénieurs de Luz finissaient outre des conceptions pour un service méga d'énergie solaire, qui a été visé pour se produire au-dessus de 300MW à 0.069\$, et qui aurait placé le coût d'énergie solaire en conformité avec l'évaluation de la puissance traditionnelle, quand la compagnie a classé pour la faillite.

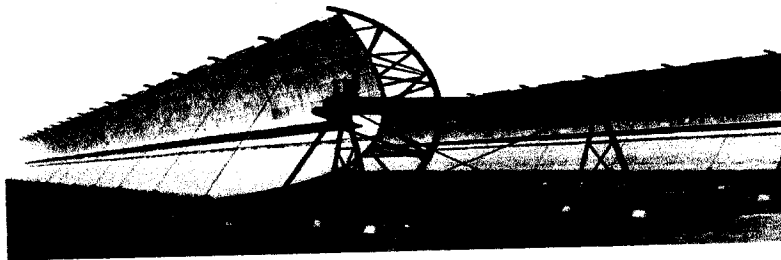


Fig.III.1. : le premier concentrateur cylindro-parabolique inventé.

Depuis, les systèmes cylindro paraboliques ont été commercialisés dès les années 80.

III.2. Le système cylindro-parabolique :[9 ;13]

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire.

On retrouve dans le tableau (III.1) toute principale installation faite pour cette technologie :

Installati on	Lieu	Promote ur	Année	Capacité nette MW	Fluide caloport eur	T. sortie °C	Surface champs solaire m ²
COSS	Vignola (France, Corse)	CEA- CNRSAF ME	1980	50kW	Huile (Gilother m)	250	1176
SSPS- DCS- ACURE X	Tabernas (Espagne)	UE + USA	1981	500kW	Huile (Sanother m)	300	2672
SEGS I	Dagget	Luz	1984	14MW	Huile	-	-
SEGS II	Dagget (Cal., USA)	Luz	1986	30	Huile (ESSO 500)	316	190338

SEGS III/IV	Kramer junction (Cal., USA)	Luz	1987	30	Huile	349	230300
SEGS V	Kramer Junction (Cal.,	Luz	1988	30	Huile	349	250500

EL NASR	Egypte	NREA	2004	-	Vap sat	175	1900
Andasol 1	Guadix, Espagne	Cobra (Espagne) Solar millenium (USA)	2008	50	Sels fondus	400	1.5 million m ²
Andasol 2			2009	50			
Andasol 3			2011	50			
Nevada solar one	Boulder city USA	DOE	2007	64	huile	300-400	1.2km ²

Tableau (III.1) : Principales installations du cylindro-parabolique.

III.3. Qu'est-ce qu'un concentrateur cylindro-parabolique PTC?

Le concentrateur est en effet un cylindre de section parabolique. Il ne comporte qu'une seule direction de courbure ; sa fabrication et sa mise en forme sont donc considérablement simplifiées. Le miroir est animé d'un seul mouvement de rotation de façon à être éclairé par le rayonnement solaire selon l'axe optique de la parabole. La concentration est obtenue sur une ligne, matérialisée par le récepteur tubulaire dans lequel circule le fluide de transfert. Le capteur cylindro-parabolique est indiqué comme suit (Fig.III.2).

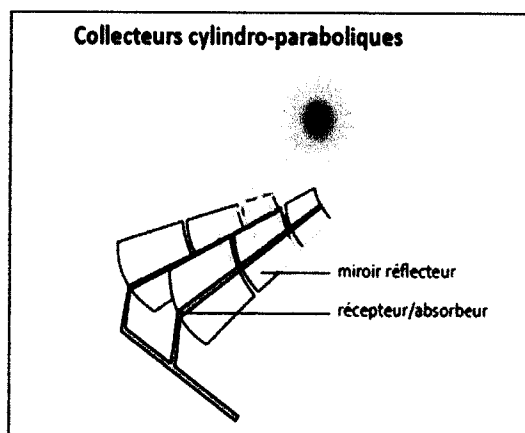


Fig.III.2. : le capteur cylindro-parabolique.

III.4. Le principe du concentrateur cylindro-parabolique :

En général, le cylindro-parabolique se compose de deux parties essentielles :

- Le réflecteur.
- Le tube absorbeur (récepteur).

Cependant, d'autres composants se mettent en jeu dans le mode de fonctionnement du concentrateur. On cite :

- Le fluide caloporteur.
- Le mécanisme de poursuite.
- La struction métallique (support).

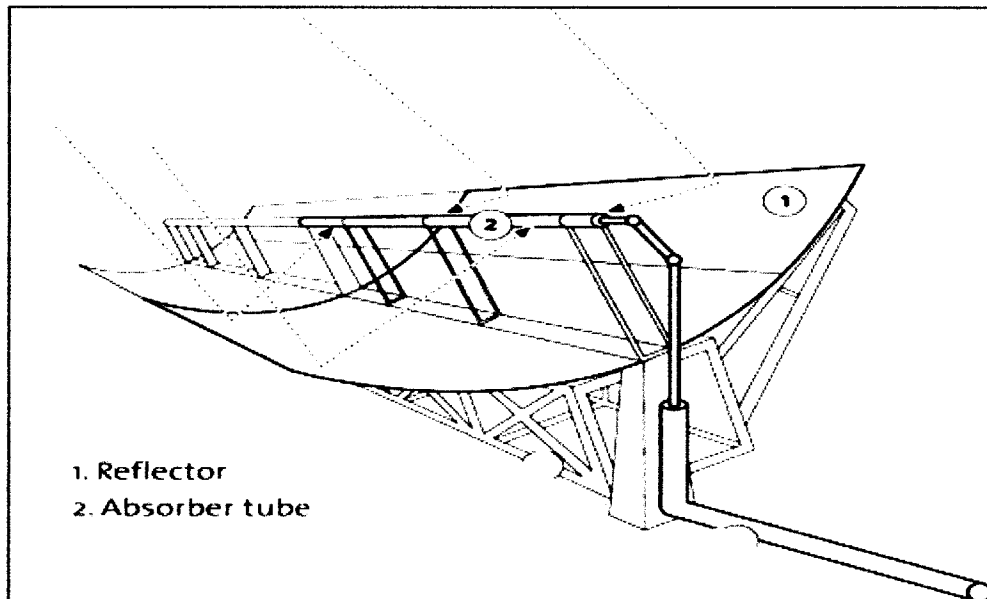


Fig.III.3. : Les constituants du concentrateur cylindro-parabolique.

• III.4.1. Le réflecteur : [9]

Un réflecteur cylindro-parabolique est un type de capteur d'énergie solaire thermique. Le miroir cylindro-parabolique est ici constitué de panneaux en verre sans fer relativement épais, généralement revêtus d'argent ou d'aluminium poli, argentés et vernis en face arrière. Ils sont largement autoportants, ce qui permet de les assembler sur une charpente relativement légère. Celle-ci est supportée par des pylônes en charpente métallique fondés au sol. Les performances technico-économique est le fait de réussir la production des panneaux de miroirs de très belle qualité d'une réflexion de 94%.

Le réflecteur est généralement aligné sur un axe nord-sud, et tourne pour suivre le soleil qui se déplace chaque jour dans le ciel. Il peut également être aligné sur un axe est-ouest, ce qui diminue l'efficacité globale du capteur à cause des modifications du cosinus. Toutefois, il est suffisant d'aligner le réflecteur en fonction du changement des saisons, ce qui évite d'installer des moteurs d'orientation.

• III.4.2. Le récepteur :[14]

Le récepteur absorbe le rayonnement concentré sur une surface noire et transforme la chaleur générée au fluide caloporteur. Le cœur du PTC est son tube de récepteur, parce que l'efficacité globale du collecteur dépend considérablement de l'optique et des propriétés thermiques de cet élément. Le tube de récepteur typique se compose de pipe (tuyau) en acier intérieure entourée par une pipe en verre transparente pour réduire des pertes de chaleur par convection. Cette pipe d'acier est équipée d'une couche sélective, qui a une absorptivité solaire élevée (>90%) et une basse émissivité dans la gamme de longueurs d'onde infrarouge (<30%), de ce fait réduisant des pertes thermiques par rayonnement.

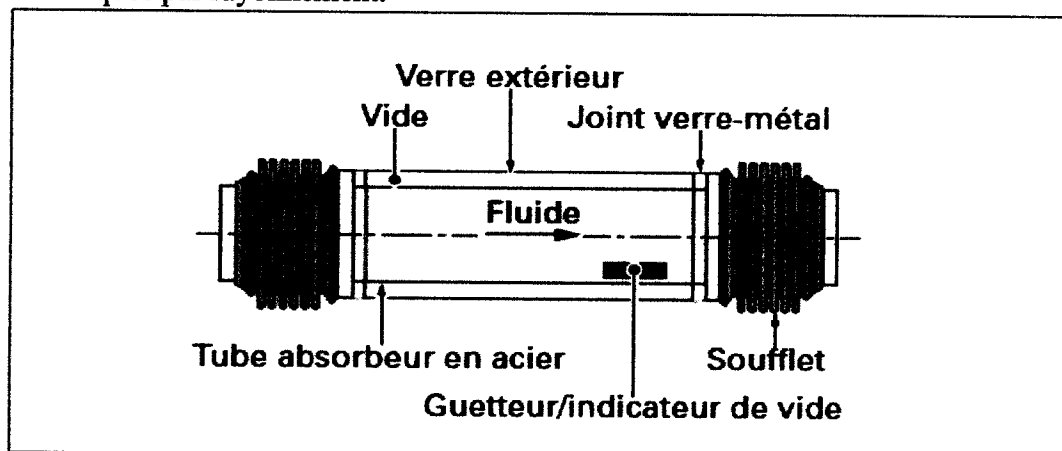


Fig.III.4. : le tube récepteur.

Le vide entre la pipe en acier et la couverture de verre, en plus de la pipe en verre fournie de couches antireflets sont utilisés pour réaliser des efficacités thermiques plus élevées et une meilleure exécution annuelle du PTC.

La couverture de verre est reliée dans la pipe en acier au moyen de soufflets métalliques d'expansion qui compensent la dilatation thermique différente du verre et de l'acier quand le tube de récepteur fonctionne à la température nominale. Le joint-verre-métal employé pour relier la couverture de verre et le soufflet est un point faible dans le tube de récepteur et lui doit être protégé contre le rayonnement solaire concentré pour éviter un effort thermique et mécanique élevé qui pourrait mener à la rupture de cette soudure. Un bouclier en aluminium est habituellement placé au-dessus du soufflet pour protéger la soudure.

Les multiples morceaux appelés les "Guetters" sont placés dans l'espace entre la pipe en acier de récepteur et la couverture de verre. La mission de ces "Guetters" est d'absorber les molécules des gaz qui passent du fluide à l'anneau par le mur de la pipe en acier pendant la durée de vie des tubes de récepteur (>20ans), généralement sont à base de Zirconium, Vanadium, Strontium.

- **III.4.3 Le fluide caloporteur : [15]**

Le choix du fluide de transfert est primordial :

- il détermine la température maximale admissible.
- il oriente le choix de la technologie et des matériaux du récepteur.
- il conditionne largement la possibilité et la commodité du stockage.

Les différents fluides utilisés :

- ❖ **Les huiles :**

Sont des fluides monophasiques qui présentent un coefficient d'échange correct. Leur gamme de température est limitée à environ 400 °C. Elles se prêtent au stockage dans des bacs à stratification. Les huiles minérales, très inflammables, sont abandonnées au profit des huiles synthétiques. C'est le fluide le plus couramment employé dans les centrales à capteurs cylindro-paraboliques et cycle de Rankine. Les huiles se comportent de manière chimiquement neutre vis-à-vis des tubes en acier. Leur mise en œuvre nécessite des précautions pour éviter les dégâts environnementaux en cas de fuite. À cause de la pression de vapeur élevée, supérieure à 1 MPa à 400 °C, les huiles ne sont pas les meilleurs fluides pour le stockage thermique car les bacs de stockage doivent être dimensionnés pour supporter la forte pression statique.

- ❖ **Les sels :**

Dont ici, sont à base de nitrates de sodium et de potassium. Ils présentent un eutectique aux environs de 120 °C. Ils sont liquides aux températures plus élevées. Ils offrent un bon coefficient d'échange et possèdent une densité élevée, ce qui en fait également de très bons fluides de stockage, meilleurs que les huiles.

- ❖ **L'eau liquide :**

Est en réalité un fluide de transfert idéal. Elle offre un excellent coefficient d'échange et possède une forte capacité thermique. De plus, elle est parfaitement neutre vis-à-vis de l'environnement, abondant et quasiment gratuit. Il faut cependant lui appliquer une pression élevée pour la maintenir liquide lorsque sa température s'élève, ce qui pose des problèmes d'épaisseur de métal et d'étanchéité des circuits. La température critique est de

371°C (pression 221 bar). Les températures de travail à l'état liquide doivent donc être sensiblement inférieures. Vaporiser l'eau dans le récepteur offre l'avantage d'absorber une grande quantité d'énergie correspondant à l'enthalpie de changement d'état. Un évaporateur fonctionne de plus à une température constante. Autre avantage, le système diphasique eau/vapeur est aussi le fluide de travail des cycles de type Rankine. Tout semble plaider en faveur de ce fluide, du moins tant que l'on se cantonne à la vapeur saturée. Car contrairement à l'eau liquide, la vapeur sèche présente un faible coefficient de transfert et se prête très mal au stockage thermique.

• III.4.4. Le mécanisme de poursuite :

Son rôle est d'adapter l'inclinaison du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur. De cette manière, la radiation est réfléchiée au foyer et concentrée sur un tube récepteur dans lequel circule le fluide caloporteur.

Le mécanisme de poursuite doit être fiable et capable de suivre le soleil, remettre le collecteur en sa position d'origine à l'extrémité du jour ou pendant la nuit, et également la poursuite du soleil durant des périodes intermittentes de nuages.

En plus, ses mécanismes sont employés pour la protection du collecteur contre les conditions de travail et environnementales dangereuses, comme, la rafale de vent.

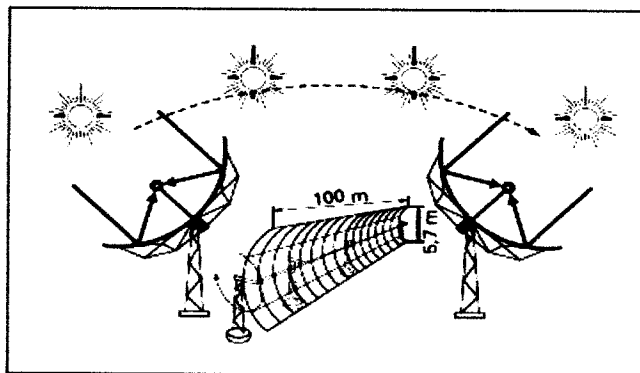


Fig.III.5. : Poursuite du soleil par le collecteur cylindro parabolique. [9]

• III.4.5. La structure métallique :

Doit suffisamment solide pour résister aux importantes contraintes mécaniques liées au vent. Elle doit de plus être munie d'extrémités assurant la compatibilité entre les dilatations thermiques inégales de l'acier et du verre.

III.5. Le développement du système cylindro-parabolique :

Un certain nombre de projets sont en cours de développement aux Etats-Unis. De plus, deux centrales, l'une en Algérie et l'autre au Maroc, comportant un cycle intégré solaire de 20MW ont été attribuées à des sociétés européennes suite à des appels d'offres. Une autre centrale du même type est en construction en Egypte et un appel d'offres pour une centrale de 100 MW à Abu Dhabi a été lancé. Enfin les pays du Moyen-Orient, la Chine et d'autres pays bénéficiant d'un ensoleillement favorable manifestent un intérêt grandissant pour cette technologie.

Le développement des principales centrales a été visualisé dans le graphe suivant afin d'opérer la progression de la technologie cylindro-parabolique :

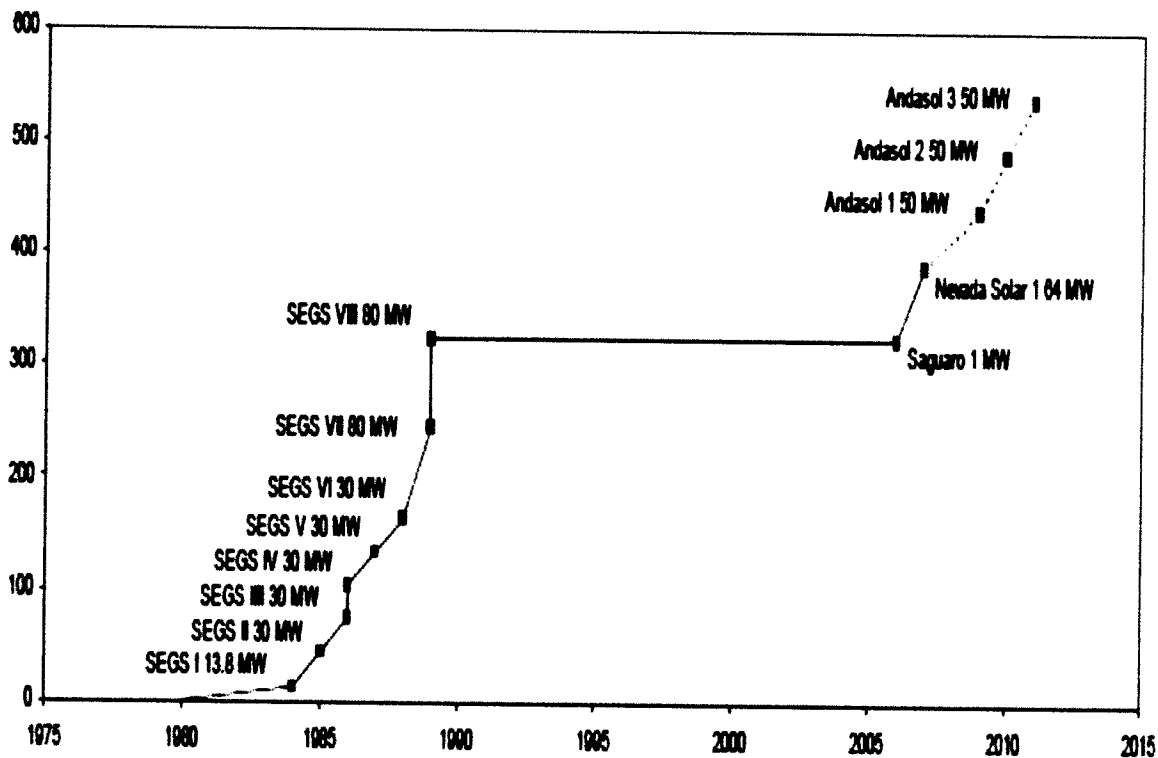


Fig.III.6. : La progression de la technologie cylindro-parabolique.[11]

III.6. La centrale à concentrateur cylindro-parabolique :

• III.6.1. Définition :

Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques sont en général installées en plein désert et dans les pays au climat aride. Ce système est aujourd'hui reconnu pour être le plus

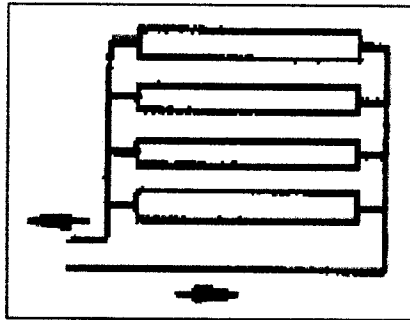
Chapitre-3- Notion sur le concentrateur cylindro-parabolique

Les collecteurs sont alignés dans la direction nord-sud, et disposent d'un système mono axial de poursuite du soleil dans la direction est-ouest. Un senseur permet de contrôler la position du soleil par rapport à la rangée de collecteur. Cette information est transmise au système de contrôle central qui ajuste l'angle d'inclinaison.

Le champ solaire peut avoir plusieurs **configurations** en fonction de la manière dont il est alimenté en fluide caloporteur. Dans tous les cas, la tuyauterie de sortie est la plus courte possible pour minimiser les pertes à l'ambiance.

Les différentes configurations sont :

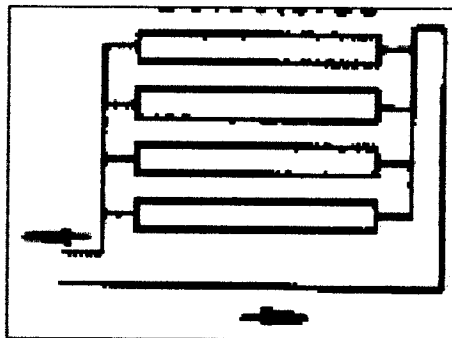
Installation à retour direct:



C'est la configuration la plus simple, Celle qui est la plus utilisée. Son inconvénient principal est le déséquilibre entre les pressions à l'entrée et à la sortie de chaque rangée de collecteurs. En effet, la distance parcourue par le fluide passant par la dernière rangée est plus courte que celle parcourue par le fluide de la première rangée.

Les pertes de charge sont donc plus ou moins importantes et le débit n'est pas identique pour chaque rangée de collecteurs. Des vannes ajustant la perte de charge doivent alors être installées sur chaque rangée de collecteurs.

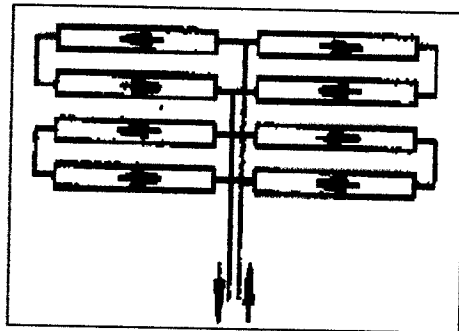
Installation à retour indirect:



Chapitre-3- Notion sur le concentrateur cylindro-parabolique

Les pertes de charge sont équilibrées pour chaque rangée en effectuant une boucle à l'entrée du champ solaire. La longueur totale de tuyauterie est légèrement augmentée, ainsi que les pertes à l'ambiance.

Installation à alimentation centralisée:



Le but de ce type d'installation est de minimiser la longueur totale de tuyauterie. Comme pour l'installation à retour direct, des vannes d'ajustement de la perte de charge sont nécessaires sur chaque rangée de capteurs.

❖ Le système de transfert :

Le fluide qui circule à l'intérieur du tuyau (tube), est chauffé à une température supérieure à 400°C.

Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs conventionnels afin de produire de la vapeur d'eau à hautes températures et pressions. La vapeur produite est ensuite intégrée dans un cycle thermodynamique générant de l'énergie électrique au moyen d'un (ou de plusieurs) alternateurs couplés à une (ou à plusieurs) turbine à vapeur.

Le tableau (III.3) suivant, résume les différents fluides utilisés pour une centrale à collecteurs cylindro-paraboliques :

Cycle	Fluide caloporteur	Fluide de travail.
Rankine	Huile	Eau/vapeur
	Sels fondus	
	Eau	

Tableau(III.2) : Fluides caloporteurs / Fluides de travail [16]

Cas de l'eau-vapeur :

On ne peut ignorer la fonction de stockage qui doit être assurée avec un minimum d'autonomie pour permettre un fonctionnement correct de la turbine à vapeur (elle ne supporterait pas un régime de fonctionnement trop haché). C'est là l'autre gros problème de la filière car le stockage de la vapeur vive est particulièrement malaisé. Son contenu énergétique volumique est dramatiquement faible, ce qui oblige à mettre en œuvre des réservoirs à pression de grande taille.

On conçoit qu'on atteigne vite les limites raisonnables de capacité de ce stockage. On utilisera donc cette technique pour réaliser des stockages dits « nébulaires » qui sont dimensionnés au plus juste : ils assurent uniquement les conditions de régularité à très court terme de la production de vapeur qui assurent un fonctionnement correct de la turbine.

Cas des huiles :

Les différentes réalisations classées ont toutes, généralement, utilisé comme fluide caloporteur des huiles de synthèse ou des huiles minérales de différentes provenances et de différentes performances.

❖ Système de génération d'électricité :

Comprend, d'une part, les sites de production d'électricité (production centralisée : centrales nucléaires, thermiques, hydrauliques ou production décentralisée : éoliennes, modules photovoltaïques, petite hydraulique, cogénération, etc...) et d'autre part les lieux de consommation (communes, entreprises, etc...).

Comme l'électricité ne se stocke pas en grande quantité, l'énergie produite doit être acheminée en temps réel jusqu'aux consommateurs. C'est le rôle du réseau électrique qui comprend un réseau public de transport, qui permet de transporter des quantités importantes d'énergie sur de longues distances, et un réseau de distribution, qui prend le relais pour acheminer l'électricité sur les derniers kilomètres, à l'échelle locale et desservir les usagers.

On distingue trois principaux modes de valorisation de l'énergie solaire collectée et de l'électricité produite :

- La **production d'électricité avec garantie de fourniture**, valeur essentielle pour un système électrique. Cela suppose d'effacer les variations de la ressource solaire et de répondre aux besoins en hiver. Il faut pour cela stocker l'énergie et « hybrider » ces centrales solaires avec des centrales thermiques fossiles, en général au gaz. Suivant la taille du stockage et le rapport entre la taille du champ solaire (la surface de captation solaire) et la puissance de la turbine, il est possible d'étaler, de déplacer, voire de concentrer la production électrique dans le temps, ce qui permet de produire plus aux heures de forte consommation, ou de lisser la production aux heures de moindre demande.

Chapitre-3- Notion sur le concentrateur cylindro-parabolique

- La **production décentralisée d'électricité**, dans des zones ne disposant pas de réseau de distribution structuré, grâce à de nouvelles technologies de micro réseau de distribution d'électricité.

- **L'intégration au sein d'unités industrielles**, qui utilisent pour leurs besoins propres, soit l'énergie électrique (par exemple pour le dessalement de l'eau de mer, le traitement de l'eau, etc...) soit la chaleur (pour la stérilisation, le chauffage, la cuisson, les traitements thermiques, etc...).

Pour récupérer la chaleur et générer l'électricité, le système le plus couramment utilisé est le traditionnel cycle de Rankine vapeur : la chaleur est transportée par l'huile synthétique depuis les collecteurs jusqu'à la chaudière, où l'eau est évaporée. La vapeur est ensuite détendue dans la turbine, condensée et comprimée puis renvoyée dans l'évaporateur.

Cependant, l'utilisation d'un cycle de Rankine nécessite des températures élevées (l'efficacité du cycle chute si la température de la vapeur à l'entrée de la turbine est inférieure à 300 °C), et l'investissement requis pour la turbine est important. Le champ solaire doit donc obligatoirement être de taille importante.

Les avantages d'un tel système sont multiples :

- Moins de pertes thermiques au niveau du collecteur.
- Possibilité de limiter la taille du champ de concentrateurs.

Le principal inconvénient est évident : la source chaude du cycle étant à une température inférieure, le rendement de Carnot est plus faible et moins d'énergie peut être récupérée.

• **III.6.3 Stockage de chaleur :**

Un atout majeur de certaines technologies solaires thermodynamiques est leur capacité de stockage qui permet aux centrales de fonctionner en continu. En effet, lorsque l'ensoleillement est supérieur aux capacités de la turbine, la chaleur en surplus est dirigée vers un stockage thermique, qui se remplit au cours de la journée.

La chaleur emmagasinée permet de continuer à produire en cas de passage nuageux ainsi qu'à la tombée de la nuit.

Cependant, Par haute température dans le domaine solaire, on entend des températures supérieures à 500°C. C'est la gamme de températures qu'on rencontre dans la production d'électricité avec capteurs à concentration. Les matériaux idéaux pour cette gamme de température sont : les sels fondus (Draw salt, HTTEC, Solar salt, etc.), l'eau pressurisée, les huiles organiques hautes températures, le béton de haute température, les céramiques réfractaires, etc. La composition et les propriétés thermo physiques de certains matériaux mentionnés ci-dessus sont données dans le Tableau(III.3).

	$\lambda(\text{W/mk})$	$C_p(\text{J/kgk})$ 350°C	$P(\text{kg/m}^3)$
Eau liquide (0°C T 100)	0.6	4186	1000
Eau vapeur (T=300)	0.04	2.026	0.3652
Draw salt 50NaNO ₃ /50KNO ₃ (220°C T 540)	0.4		1733
HITEC 40NaNO ₂ /7NaNO ₃ /53KNO ₃ (142°C T 540)	0.1		1680
Granite	2.79	775	2630
Ceramique refractaire T 400	1.35	866	3500
Beton haute T° (prog.WESPE T 400)	1	916	2750
Beton haute T° (prog.WANDA T 400)	1.3	1100	2250

Tableau (III.3) : Propriétés thermo physiques de quelques matériaux pour le stockage de chaleur. [17]

Hors le système de stockage à sel fendu peut être configuré de deux manières :

- **Système à un seul réservoir** : le stockage thermique peut se faire par l'intermédiaire d'un seul bac vertical de grande hauteur dans lequel se trouve une huile thermique (liquide dense) où la température est stratifiée. On parle, dans ce cas, de stockage à stratification où le sel chaud flotte sur le sel froid.
- **Système à deux réservoirs** : ce type de stockage est le plus classiquement utilisé ; le système emploie deux bacs ayant chacun la pleine capacité de rétention du sel en circulation. Dans ce cas, l'un des bacs contient le sel « froid » (aux alentours tout de même de 250°C) et l'autre le sel chaud. L'échangeur solaire est toujours fourni en chaleur par le réservoir chaud.



• III.6.5. Analyse économique :

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 «Levelized Electricity Cost» Il est défini comme le rapport du coût moyen annuel actualisé des investissements sur la production d'énergie électrique annuelle nette.

Il est calculé de la manière suivante:

$$LEC = \frac{C.Ki+Km+Kc}{Ee} \text{ avec : } C = \frac{kt(1+kt)^n}{(1+kt)^n-1} + Ka = 9.88\%$$

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

Km = Coût d'exploitation et d'entretien (maintenance)

Kc = Coût des ressources de combustible (carburant)

Ee = production d'énergie électrique annuelle nette

ka = assurance annuelle = 1%

kt = taux d'intérêt = 8%

n = Période de remboursement en années = 30 ans

Les caractéristiques qui paraissent les plus intéressants des principales filières sont résumées dans le tableau suivant :

Technologie	Cylindro-parabolique	Tour	Parabole-Stirling
Rendement thermique %	70	73	75
Puissance(MWh)	80-300	10-100	□0.1
Concentration	80-500	700-1200	6000-10000
T°. de travail(°C)	250-450	450-1000	600-1800
Rendement annuel de conversion solaire/électricité%	14	15	17
LES solaire(€/kWh)	0.17-0.19	0.15-0.18	□0.2
Cout total d'investissement(€/Wc)	2.8-3.5	3-4	10-14

Tableau (III.4.) : Les caractéristiques des principales filières.

III.7. Résumé :

Pour ne pas trop répéter et pour rappeler, le principe de fonctionnement d'une centrale est conclu dans la figure ci-dessous, Fig.III.9, de la façon suivante :

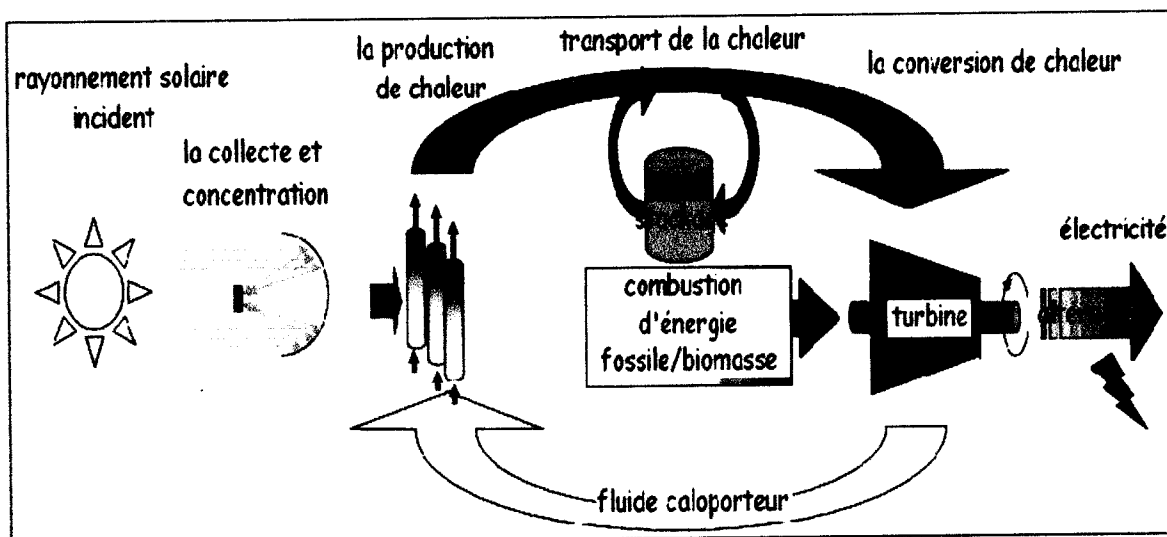


Fig.III.9. : Principe d'une centrale solaire thermodynamique.

Conclusion :

A travers ce passage, on a pu conclure que le système cylindro-parabolique est digne d'être cité qu'étudié, puisqu'il permet une conversion efficace de l'énergie solaire en énergie thermique en atteignant des températures de sortie de plusieurs centaines de degrés Celsius.

Ceci permet d'envisager d'intégrer ce système dans une centrale électrique puisqu'il remplace la partie de la chaudière à combustible, en donnant des températures et des pressions de vapeur assez grande pour faire tourner efficacement des turbines génératrices d'électricité.

Afin d'optimiser les performances de ce système à concentration, une modélisation mathématique qui prend en compte tous les bilans de chaleurs avec les spécificités géométriques de ce système s'impose. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE.4.
MODÉLISATION DU
CONCENTRATEUR
CYLINDRO-PARABOLIQUE.

Le CCP se partage d'un réflecteur cylindro-parabolique avec une enveloppe en Pyrex et un tuyau absorbeur en acier, connectés le long de la longueur du système, placé coaxialement dans la ligne focal du réflecteur. Les miroirs utilisés comme réflecteur sont de forme parabolique et plaqués avec de l'oxyde d'argent, ainsi revêtus d'un revêtement de surface spécifique pour les protéger des effets environnementaux. Les collecteurs sont fournis d'un système de poursuite pour suivre le soleil et de maintenir la focalisation du rayonnement solaire sur l'enveloppe Pyrex et l'absorbeur. Le milieu de transfert de chaleur utilisé dans les expériences est de l'eau sous pression. Ce fluide circule à l'état de phase liquide dans la conduite de l'absorbeur. Le débit massique est maintenu constant lors de l'obtention de chaque ensemble de données. (Fig.IV.1)

Son orientation est « axe rotation terrestre », c'est-à-dire que le tube récepteur est parallèle à l'axe de rotation de la terre et le suivi solaire est Est-Ouest.

- **IV.1.2. Bilan énergétique du capteur :**

- **Le coefficient de concentration :** [18]

Le coefficient de concentration est l'un des paramètres principaux de l'augmentation de température de sortie d'un capteur. Il représente la radiation concentrée sur l'absorbeur par rapport au rayonnement frappant la surface de l'absorbeur sans concentration. Cette valeur dépend directement de la géométrie du capteur. On peut la calculer par le rapport de la surface de réflecteur sur la surface de l'absorbeur :

$$C_g = \frac{S_0}{S_{Abs}} \quad [IV.1]$$

- **La radiation solaire :**

Le rayonnement solaire total reçu par l'absorbeur du concentrateur est donné par l'expression suivante :

$$E=G+R \quad [IV.2]$$

Où G et R : Rayonnements solaires direct et diffus d'expressions respectives : [19]

$$h_{cf} = 7.5 + 4 * V \quad \text{Pour } 0 < V < 4 \text{ m / s} \quad \text{[IV.11]}$$

$$h_{cf} = 7.3 * V^{0.8} \quad \text{Pour } 4 < V < 40 \text{ m / s} \quad \text{[IV.12]}$$

Le bilan matière et thermique pour le fluide caloporteur au niveau du capteur solaire est :

$$\frac{dM_{fl}^{Abs}}{dt} = \dot{M}_{e-Abs} - \dot{M}_{s-Abs} = V l_{Abs} \frac{d\rho_{fl}^{Abs}(T_{fl}^{Abs})}{dt} \quad \text{[IV.13]}$$

$$\frac{d \left[M_{fl}^{Abs} H(T_{fl}^{Abs}) \right]}{dt} = \dot{M}_{e-Abs} \int_{T_f}^{T_{e-Abs}} C_{pfl} dT - \dot{M}_{s-Abs} \int_{T_f}^{T_{s-Abs}} C_{pfl} dT + h_{cf} S_{Abs} (T_{Abs} - T_{fl}^{Abs}) \quad \text{[IV.14]}$$

• IV.1.3 Stratégie de la Résolution :

➤ Hypothèses :

- Le transfert de chaleur entre la vitre et l'absorbeur est dû uniquement au rayonnement et à la conduction à cause du vide (la pression moins que 10^{-4} mm Hg) et donc la convection est négligeable.
- Le fluide caloporteur est incompressible et sans changement de phase.
- Le tube absorbant coïncide avec le foyer de la parabole.
- La température est uniforme en chaque nœud.
- La vitre est considérée comme opaque aux irradiances infrarouges.
- Les variations temporelles dans l'épaisseur de l'absorbeur et la vitre sont négligeables.
- Le flux solaire au niveau de l'absorbeur est uniformément réparti.

Dans l'étude, les paramètres du milieu extérieur sont considérés comme étant :

- Température ambiante constante étant, $T_a=20^\circ\text{C}$, la vitesse du vent $v=0.1\text{m/s}$, le fluide caloporteur choisi est l'eau d'un débit 0.01 kg/s

➤ **Méthode de résolution :**

La programmation de ces équations a été faite par Matlab. Nous avons utilisé la méthode de Gauss pour résoudre ces équations. La méthode consiste à donner une valeur de la variable et recalculer cette variable avec l'équation et finalement on compare les deux valeurs. En fonction de la précision voulue, si la différence entre les deux valeurs calculée et proposée est inférieure à la précision fixée, on prend cette valeur sinon on prend la deuxième valeur et on reprend les calculs jusqu'à ce que la différence entre ces deux valeurs devienne inférieure à la précision.

• **IV.1.4 Résultats de la simulation :**

Un programme en Matlab est développé pour simuler la température de sortie du fluide caloporteur en comparaison avec celles du tube absorbeur et de la vitre en fonction du temps.

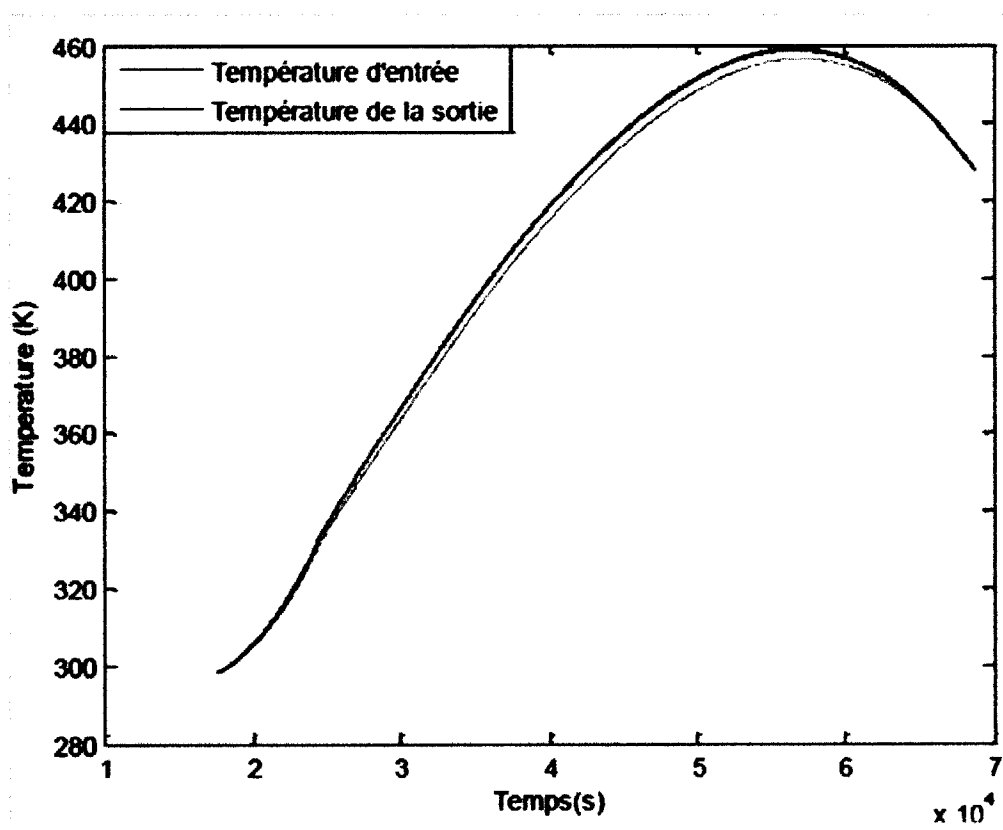


Fig.IV.3 : Variation de la température du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie de l'absorbeur.

La variation de la température du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie de l'absorbeur solaire est reportée sur la (Fig.IV.3) qui montre que la différence de température augmente continument jusqu'à qu'elle s'annule à la fin de la journée.

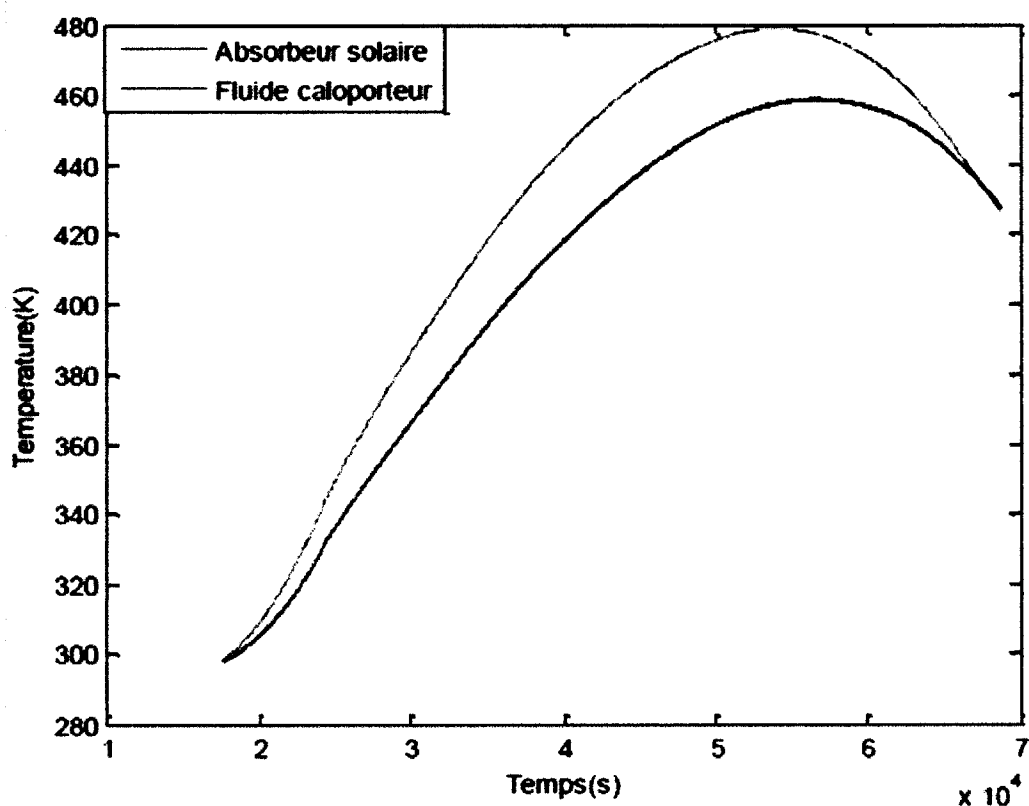


Fig.IV.4 : Variation de la température de l'absorbeur solaire et de la température moyenne du fluide caloporteur.

La (Fig.IV.4) est relative à la variation de la température de l'absorbeur solaire ainsi que le comportement de la température moyenne du fluide caloporteur dans l'absorbeur solaire.

Elle montre que tous les deux augmentent, typiquement, en même temps dès le début de la journée pour devenir égaux avec la fin de la commande solaire.

- **IV.1.5. Discussion :**

Pour atteindre des températures élevées (supérieures à 120°C), il est nécessaire de concentrer les rayons solaires. Le capteur cylindro-parabolique est souhaitable pour obtenir des températures plus de 100 °C. Sa géométrie lui permet de focaliser l'énergie solaire incidente, selon une génératrice linéaire où est placé un tube absorbeur dans le quel circule un fluide caloporteur. La contrainte principale, outre le coût des dispositifs, est le système de poursuite destiné à suivre le soleil dans sa course.

Il est évident de noter que la variation des températures dépend particulièrement de la puissance solaire incidente et des conditions climatiques environnantes.

Conclusion :

La conversion photo thermique se fait à l'aide de collecteurs thermiques qui consistent en une transformation directe du rayonnement solaire en chaleur, comme le chauffage domestique, les cuisines solaires, la chaleur pour des processus industriels.

L'étude d'un capteur cylindro-parabolique basée sur des bilans massique et thermique nous a permis de développer un modèle mathématique pour contrôler la température de sortie du fluide caloporteur ainsi que les températures de l'absorbeur et de la vitre.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a un écart de température important entre l'entrée du capteur et la sortie pour les jours de tests considérés.

La densité d'énergie au niveau de l'absorbeur est grande donc le fluide caloporteur peut travailler à température plus élevée pour la même surface de captation d'énergie.

CONCLUSION GÉNÉRALE.

Compte tenu du potentiel énergétique solaire inépuisable, le solaire à concentration se développe aujourd'hui dans plusieurs pays.

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 au km) 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 %)

Mais la concentration a un besoin impératif du rayonnement "direct" du soleil :

- Les centrales commerciales doivent se trouver dans les zones fortement ensoleillées et souvent désertiques (ensoleillement direct allant au-delà de 2000 kWh/m²/an), ce qui est le cas pour un pays comme l'Algérie.

L'étude d'un capteur cylindro-parabolique basée sur des bilans massique et thermique nous a permis de développer un modèle mathématique pour contrôler la température de sortie du fluide caloporteur ainsi que les températures de l'absorbeur et de la vitre. Ceci permet une optimisation des paramètres d'entrée pour un fonctionnement optimal.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a un écart de température important entre l'entrée du capteur et la sortie pour les jours de tests considérés.

La densité d'énergie au niveau de l'absorbeur est grande donc le fluide caloporteur peut travailler à température plus élevée pour la même surface de captation d'énergie.

Le capteur cylindro-parabolique permet de réduire les surfaces réfléchissantes ainsi que les pertes thermiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- [1] : Bhavik Shah, PDF, Solar energy : the ultimate renewable resource.
- [2] : Hamdi, mémoire de magistère, «étude théorique et expérimentale d'un concentrateur cylindro-parabolique», Uni. Kasdi Merbah, Ouargla, 2011.
- [3] : Benhabib. L. mémoire de Licence, «bilan thermique et énergétique d'un capteur solaire plan à eau», Uni. Tlemcen, juillet 2010.
- [4] : www.astro surf.com/gap47/solaires/soleil-nouveau/inventeurs.
- [5] : PDF : annuaire de la filière française du solaire thermodynamique, OSEO, 2011.
- [6] : PDF : Les centrales solaires à concentration, Quoilin Sylvain, Ingénieur civil Electromécanicien Energéticien, Mai 2007.
- [7] : PDF : solaire concentré, Gilles Flamant, Directeur laboratoire Promes- CNRS,2012.
- [8] : PDF, Dossier technique de l'ingénieur'' centrales solaires thermodynamiques'', Alain Ferrière.
- [9] : PDF, L'énergie solaire, Fransisco camacho.
- [10] : PDF : l'énergie solaire, PV et concentré.
- [11] : web / célébration de Bourgogne/1912/ décès d'Augustin Mouchot, bicyclecity.com/alternative energy.
- [10] : wikipédia.org/liste des centrales solaires thermodynamiques.
- [12] : solar energy conversion and photoenergy systems –vol1 Medium temperature solar concentrators (parabolic troughs collectors), E.Zarza.
- [13]: PDF, feuille de route solaire thermodynamique, ADEME, Février 2011.
- [14] : PDF, centrales solaires thermodynamiques/EDF/Frédéric Siros-oujda/21 Mars Octobre 2012
- [15] : etude bibliographique, école des Mines de Douai/stockage de chaleur : énergie solaire et autres applications/ !laghzaoui Amine, Perhossaini Dounia/promotion 2013.
- [16] : PDF, Jannot.Y. thermique solaire 2007.
- [17] : étude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire cylindro-parabolique, Yasmina Boukhchana, Univ. Gabès, Unité de Recherche Thermodynamique Appliquée (99/UR/11-21) Tunisie.



[18] :PDF, Desautel J. "les capteurs héliothermiques",1979.

[19] : modélisation des performances d'un séchoir solaire à absorbeur inversé avec lit thermique, thèse de Master, Khaldi Souheyla, U.de Tlemcen.

[20] : modélisation du flux solaire incident et de la température de sortie dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration du rayonnement solaire incident, Hamani Nadjette, mémoire de Magister, U.de Baskra, 2005.

ANNEXES.

ANNEXE -1- :

Utilisation de la méthode de Gauss.

```
function answer=Gauss(a,b)
%Réponse=Gauss(coefficients, constantes)
%Utilisation de la méthode de Gauss pour résoudre les équations
a(:,length(a)+1)=b; %utilisé une matrice
[rows,cols]=size(a);
answer=zeros(rows,1);
%variables
for i=1:cols
for j=i+1:rows
tmp=a(i,:).*(-a(j,i)/a(i,i));
a(j,:)=tmp+(a(j,:));
end
end
%faire une substitution
for i=length(1:rows)-(1:rows)+1 %a(i,i) le coefficient de la variable pour résoudre le
problème
% i colnnes; i à partir de la ligne
colsif(i<cols-1)
a(i,cols)=a(i,cols)-(sum(a(i,i+1:cols-1)));
end
%Calcul des I variables
answer(i)=a(i,cols)/(a(i,i));
%Substitution des variables en multipliant i-1 colonnes i par les réponses [i]
a(1:i-1,i)=a(1:i-1,i).*answer(i);
end
end
```

ANNEXE -2- :

Le tableau ci-dessous présente les valeurs de radiation solaire calculée et la température ambiante réelle pour la journée du 14/06/2011, une journée claire sur le site de Tlemcen. [20]

Temps	Ta réelle	Radiation solaire
6	19	136
7	20	367
8	22	597
9	24	794
10	27	938
11	29	114
12	31	1014
13	33	938
14	34	794
15	33	597
16	32	367
17	31	136
18	29	0
19	28	0