

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Université A. Mira- Bejaia
Faculté De la Technologie
Département De Génie Electrique

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention d'un diplôme Master en Electrotechnique
Option : Electromécanique

Thème : Amélioration des performances de
l'absorbeur du Concentrateur cylindro-
parabolique

Réalisé par :
H.BETTACHE

Encadré par :
Mr. Y. MEBARKI
Mr. O. GEUNOUNOU

Promotion 2012/2013

Remerciements

Avant tout, je remercie le bon dieu, le tout puissant de m'avoir donné la force nécessaire pour mener à terme ce travail.

Ensuite, je voudrai exprimer ma reconnaissance à mes promoteurs Mr .Y.MEBARKI et Mr O.GUENOUNOU pour leur encadrement efficace, leur soutien et leur disponibilité. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Mes vifs remerciements vont aussi à l'ensemble des employés de l'atelier Hall de Technologie pour leurs collaborations et leurs sympathies et de m'avoir ouvert les portes de l'atelier afin que je puisse effectuer mon projet d'étude.

Je tiens à remercier vivement les membres de ma familles qui m'ont toujours encouragée et soutenue.

Je remercie, tous ceux qui on contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, de même que ceux qui ont participé à ma formation, qu'ils trouvent ici l'expression de m'on profonde gratitude.

Enfin, sans oublier je remercie les jurys qui me feront l'honneur de juger ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents.

Ma sœur Belinda.

Mon frère Layachi.

Tous mes proches.

Tous mes amis.

Table des matières

Introduciton

Chapitre I : Energie solaire

I. 1. L'énergie solaire.....	3
I. 1. 1. Le soleil	3
I. 1. 2. Le rayonnement solaire	4
I. 1. 2. 1. Rayonnement direct	6
I. 1. 2. 2. Rayonnement diffus	6
I. 1. 2. 3. L'albédo ou Réfléchi.....	6
I. 1. 2. 4 Rayonnement global.....	7
I. 1. 3 Les formes d'énergie solaire.....	7
I. 1. 3 .1 Le solaire passif.....	7
I. 1. 3 .2 Le solaire actif	7
I. 1. 3 .3 L'électricité solaire	8
I. 2. solaire photovoltaïque.....	8
I. 2. 1. Effet photovoltaïque.....	8
I. 2. 2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	8
I. 2. 3. Les modules photovoltaïques.....	9
I. 2. 4. Le photovoltaïque dans les systèmes énergétiques	10
I. 2. 5. La batterie	10
I. 2. 6. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque..	10
I. 2. 6. 1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque.....	10
I. 2. 6. 2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	11
I. 3. Solaire thermique.....	11
I. 3. 1. Principe de l'effet de serre.....	11
I. 3. 2. Les collecteurs thermiques	12
I. 3. 3. Taux de concentration	12
I. 3. 4. Captation sans concentration	13
I. 3. 4. 1. Le capteur solaire plan vitré.....	13
I. 3. 4. 2. Le capteur solaire plan non vitré.....	14

I. 3. 4. 3. Distillateur solaire	15
I. 3. 4. 4. Séchoir solaire	16
I. 4. Solaire thermodynamique.....	17
I. 4. 1. Captation avec concentration.....	17
I. 4. 1. 1. Capteur à miroir de Fresnel.....	18
I. 4. 1. 2. Technologie à capteur cylindro-parabolique	19
I. 4. 1. 3. Technologie à concentrateur parabolique	21
I. 4. 1. 4. Technologie à tour (héliostat)	22
I. 4. 2. Quelques avantages de la concentration.....	22
I. 4. 3. Les cycles thermodynamiques	23
I. 4. 3. 1. Le cycle Stirling.....	24
I. 4. 3. 2. Le cycle Brayton.....	25
I. 5. système de stockage	25
I. 5. 1. Stockage sans échangeur	25
I. 5. 2. Stockage a échangeur.....	26
I. 5. 3. Stockages a deux réservoirs chaud et froid.....	26
I. 6. Principaux paramètres caractérisant un capteur.....	26
I. 6. 1. Le rendement.....	26
I. 6. 2. La superficie	26
I. 6. 3. Orientation et inclinaison des capteurs solaires.....	27
I. 7. Conclusion	27

Chapitre II : les différents modes de transfert de chaleur

II .1-Conduction.....	28
II. 1. 1. Loi de Fourier.....	29
II. 1. 2. Résistance thermique	29
II. 1. 3. Équation générale de la conduction.....	29
II. 2. Convection.....	30
II. 2. 1. Nombres sans dimension.....	32
II. 2. 1. 1. Nombre de Nusselt	32
II. 2. 1. 2. Nombre de Prandtl.....	32

II. 2. 1. 3. Nombre de Reynolds.....	32
II. 2. 1. 4. Nombre de Grashof	33
II. 2. 2. Expression de Nusselt en convection naturelle	33
II. 2. 3. Expression de Nusselt en convection forcée.....	33
II. 3. Transfert de chaleur par rayonnement	34
II. 3. 1. Le corps noir	34
II. 3. 2. L'émittance (totale)	34
II. 3. 3. Loi de Stefan Boltzmann.....	34
II. 3. 4. Rayonnement entre un corps et le milieu environnant	35
II. 3. 5. Répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide.....	35

Chapitre III : Étude thermique et expérimental

III. 1. Étude thermique.....	36
III. 1. 1. Généralités.....	36
III. 1. 1. 1. Tube absorbeur	36
III. 1. 1. 2. Fluide caloporteur.....	37
III. 1. 1. 3. Critère d'inertie thermique	37
III. 1. 2. Étude thermique de tube absorbeur	38
III. 1. 2. 1. Absorbeur en cuivre	38
III. 1. 2. 1. 1. Transfert de chaleur entre le tube absorbeur et l'environnement.....	39
III. 1. 2. 1. 2. Transfert de chaleur entre le tube absorbeur et le fluide caloporteur.....	40
III. 1. 2. 1. 3. Bilan global	41
III. 1. 2. 1. 4. Evaluation des coefficients d'échange convectif. 42	
III. 1. 2. 1. 4. 1. Calcul du coefficient d'échange convectif entre le tube absorbeur et l'environnement.....	42
III. 1. 2. 1. 4. 2. Calcul du coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur	44
III. 1. 2. 2. Absorbeur à tube sous vide.....	45

III. 1. 2. 2. 1. Transfert de chaleur entre l'enveloppe de verre et l'environnement	47
III. 1. 2. 2. 2. Transfert de chaleur entre l'absorbeur et l'enveloppe de verre	49
III. 1. 2. 2. 3. Transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.....	49
III. 1. 2. 2. 4. Bilan global.....	50
III. 1. 2. 2. 5. Evaluation des coefficients d'échange convectif	50
III. 1. 2. 2. 5. 1. Calcul du coefficient d'échange convectif entre l'enveloppe de verre et l'environnement	50
III. 1. 2. 2. 5. 2. Calcul du coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur	52
III. 2. Étude expérimental.....	53
III. 2. 1. Introduction	53
III. 2. 2. Description de l'expérience.....	54
III. 2. 2. 1. Essai avec tube sous vide.....	54
III. 2. 2. 2. Essai avec un simple tube en cuivre	54
III. 2. 3. Expérience.....	54
III. 2. 3. 1. Essai avec tube sous vide.....	54
III. 2. 3. 1. 1. Essai avec réflecteur non recouverte du papier aluminium.....	54
III. 2. 3. 1. 2. Essai avec réflecteur recouverte d'un papier en aluminium.....	58
III. 2. 3. 2. Essai avec un simple tube en cuivre	61
III. 3. Conclusion.....	64
.....	

Liste des figures

Figure I. 1. Répartition spectrale du rayonnement solaire	5
Figure I. 2. Différents composants de rayonnement	6
Figure I. 3. Schémas d'une cellule élémentaire	9
Figure I. 4. Relation entre le taux de concentration et la température du récepteur	13
Figure I. 5. Capteur solaire thermique	14
Figure I. 6. « moquette solaire »	15
Figure I. 7. Capteurs solaires sans vitrage.....	15
Figure I. 8. Principe de la distillation solaire à effet de serre.....	16
Figure I. 9. Séchoir solaire	17
Figure I. 10. Schéma de principe d'un capteur à concentration à lentille de Fresnel	18
Figure I. 11. Concentrateurs solaire à ébullition directe à Almeria	19
Figure I. 12. Schéma d'une centrale cylindro-parabolique	20
Figure I. 13. Capteur parabolique.....	21
Figure I. 14. Solar II central receiver plant in Barstow, California.....	22
Figure I. 15. Schéma d'une machine motrice	23
Figure I. 16. Cycles de Clausius-Rankine à vapeur simple.....	23
Figure I. 17. Cycles de Stirling idéal.....	24
Figure I. 18. Système de capteur parabolique avec un cycle de Brayton	25
Figure II. 1. Echange de chaleur par conduction	28
Figure II. 2. Transfert de chaleur par convection.....	31
Figure II. 3. Répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide.....	35

Figure III. 1. Evolution de la température du fluide dans le capteur	41
Figure III. 2. Tube sous vide.....	46
Figure III. 3. Système de circulation de l'eau.....	46
Figure III. 4. Bloc de l'absorbeur à tube sous vide.....	56
Figure III. 5. Variation de température en fonction du temps(essai N°1)	57
Figure III. 6. Variation de température en fonction du temps(essai N°2)	60
Figure III. 7. Bloc du tube en cuivre.....	62
Figure III. 8. Variation de température en fonction du temps(essai N°3)	63

Liste des tableaux

Tableau III. 1. Propriétés de l'air.....	42
Tableau III. 2. Propriétés d'eau	44
Tableau III. 3. Relevés de températures du 10/06/2013	55
Tableau III. 4. Relevés de températures du 11/06/2013	59
Tableau III. 5. Relevés de températures du 12/06/2013	61

Liste d'abréviation

NOTATION	UNITES
Φ_c : Flux de chaleur transmis par conduction	[w]
λ : Conductivité thermique du milieu	$[\frac{w}{m \cdot ^\circ k}]$
x : Variable d'espace dans la direction du flux	[m]
S : Aire de la section de passage du flux de chaleur	[m ²]
T: température fonction du temps et de la position dans l'espace	[°k]
P: génération de puissance thermique	$[\frac{W}{m^3}]$
a : Diffusivité thermique du fluide	$[\frac{m^2}{s}]$
Φ_{cv} : Flux de chaleur transmis par convection	[w]
h : Coefficient de transfert de chaleur par convection	$[\frac{w}{m^2 \cdot ^\circ k}]$
T _s : Température de surface du solide	[°k]
T _∞ : Température du fluide loin de la surface du solide	[°k]
S : Aire de la surface de contact solide/fluide	[m ²]
L : dimension caractéristique de la surface d'échange	[m]
μ : viscosité dynamique	$[\frac{kg}{m \cdot s}]$

C_p : Chaleur massique	$\left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}\right]$
ν : Diffusivité mécanique	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$
u : La vitesse d'écoulement de fluide	$\left[\frac{m}{s}\right]$
β : Coefficient de dilatation du fluide	$[^\circ K^{-1}]$
g : Accélération de la pesanteur	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
ΔT : L'écart de température	$[^\circ K]$
ρ : masse volumique	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
M : Émittance	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
σ : La constante de Stefan Boltzmann	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K^4}\right]$
Φ_r : Énergie de chaleur transmis par rayonnement	$[W]$
ϵ_p : Facteur d'émissivité du corps	
A : Aire de la surface	$[m^2]$
T_p : Température du corps	$[^\circ K]$
Φ_i : Énergie incident	$[W]$
ρ : Pouvoir réfléchissant	
α : Pouvoir absorbant	
τ : Pouvoir transmittant	
h_p : Constante de Planck	$\left[\frac{J}{s}\right]$
c : vitesse de la lumière dans le vide	$\left[\frac{m}{s}\right]$
ν : Fréquence	$\left[\frac{1}{s}\right]$
λ : Longueur d'onde	$[m]$
S_o : Surface d'ouverture	$[m^2]$
S_r : Surface de l'absorbeur	$[m^2]$
Q : La puissance absorbée par la vitre	$[W]$
Q_u : La puissance utile récupérée par le fluide caloporteur	$[W]$

Q_p : La puissance perdue	[w]
Q_s : La puissance stockée sous forme de chaleur vive lorsque le régime thermique est variable	[w]
m_i : Masse de l'élément i	[kg]
C_{p_i} : Chaleur spécifique de l'élément i	$[\frac{J}{kg \cdot ^\circ k}]$
dt : Pas de temps	[s]
D_{ext} : Diamètre extérieur du tube absorbeur	[m]
D_{int} : Diamètre intérieur du tube absorbeur	[m]
λ_{cu} : Conductivité thermique du cuivre	$[\frac{w}{m \cdot ^\circ k}]$
$C_{p_{cu}}$: Chaleur spécifique du cuivre	$[\frac{J}{kg \cdot ^\circ k}]$
ρ_{cu} : Masse volumique du cuivre	$[\frac{kg}{m^3}]$
G_n : Flux solaire concentré au tube	$[\frac{w}{m^2}]$
L : Longueur de l'absorbeur	[m]
η_{opt} : Rendement optique	
α_{cu} : L'absorptivité du tube en cuivre	
C : Taux de concentration	
S_c : Surface du capteur	[m ²]
S_a : Surface du tube absorbeur	[m ²]
T_{cu} : Température de l'absorbeur	[°k]
T_c : Température du ciel	[°k]
ϵ_{cu} : Émissivité du cuivre	
T_{am} : Température ambiante	[°k]
T_f : Température du fluide caloporteur	[°k]
M_f : Débit volumétrique	$[\frac{m^3}{s}]$
C_{p_f} : Chaleur spécifique du fluide caloporteur	$[\frac{J}{kg \cdot ^\circ k}]$

ρ_f : Masse volumique du fluide caloporteur	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$
T_{fS} : Température du fluide caloporteur à la sortie de tube absorbeur	$[^{\circ}\text{k}]$
T_{fE} : Température du fluide caloporteur à l'entrée de tube absorbeur	$[^{\circ}\text{k}]$
h_{cu} : Coefficient d'échange convectif entre le tube absorbeur et l'environnement	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}\right]$
λ_{air} : Conductivité thermique d'air	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^{\circ}\text{k}}\right]$
Cp_{air} : Chaleur spécifique d'air	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{k}}\right]$
ρ_{air} : Masse volumique d'air	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$
μ_{air} : Viscosité dynamique d'air	$\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}\right]$
D_1 : Diamètre intérieure de l'absorbeur	$[\text{m}]$
D_2 : Diamètre extérieur de l'absorbeur	$[\text{m}]$
D_3 : Diamètre intérieure de la vitre en verre	$[\text{m}]$
D_4 : Diamètre extérieure de la vitre en verre	$[\text{m}]$
h_f : Coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}\right]$
α_v : L'absorptivité de l'enveloppe de verre	
ϵ_{ab} : Émissivité de l'absorbeur	
T_v : Température de l'enveloppe du verre	$[^{\circ}\text{k}]$
T_a : Température de l'absorbeur	$[^{\circ}\text{k}]$
ϵ_v : Émissivité de l'enveloppe du verre	
h_{va} : Est le coefficient d'échange convectif entre l'enveloppe de verre et l'environnement	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}\right]$
α_{coating} : L'absorptivité de la couche absorbante dont est recouvert le capteur	
Nombres sans dimension	
Nu : Nombre de Nusselt	
Pr : Nombre de Prandtl	

Re : Nombre de Reynolds

Gr : Nombre de Grashof

Ra : Nombre de Rayleigh

Introduction

Le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique. Le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'importation de source d'énergies fossiles, motivée par des considérations économiques. D'autres facteurs comme les émissions de CO₂, le caractère limité de nos réserves fossiles, et l'indépendance énergétique nationale n'ont pas été pris en compte [14].

Le dernier choc pétrolier (1973) et la catastrophe de la centrale nucléaire de Tchernobyl, ont beaucoup stimulé la recherche et le développement de nouvelles sources d'énergies renouvelables et particulièrement solaires.

Cette énergie peut être transformée en chaleur à basse température, par des capteurs plans, utilisant conjointement l'absorption par une surface sélective et l'effet de serre créé par le vitrage, ces capteurs ne permettent pas en général de dépasser la température de 100°C [1].

L'énergie thermique du soleil permet aussi de produire de l'électricité par voie thermodynamique. C'est ce que l'on appelle « **électricité solaire thermodynamique** », 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 le rendement thermodynamique des procédés de conversion [16].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé

pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules (PV) en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) [3].

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à l'étude thermique de l'absorbeur d'un concentrateur cylindro-parabolique et à l'effectuation des essais expérimentaux sur la température de sortie de l'eau de l'absorbeur.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente un aperçu sur les différents types d'énergie solaire, ainsi que les technologies utilisées pour bénéficier de cette source d'énergie.
- Le second chapitre présente des définitions et des théories relatives aux différents modes de transfert de chaleur, ainsi les nombres adimensionnels utilisés pour l'estimation du coefficient d'échange convectif.
- Le troisième chapitre est consacré à une étude thermique et expérimentale de l'absorbeur du concentrateur.

Finalement on fait clôturer le mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I Energie solaire

I. 1. L'énergie solaire

L'énergie solaire présente certains avantages non négligeables sur les autres sources énergétiques. Elle est : locale, gratuite, propre et durable. L'énergie solaire peut être utilisée presque sur toute la surface de la terre. Il suffit de la capter et de l'utiliser [15].

I. 1. 1. Le soleil

La connaissance du gisement solaire pour une région donnée est nécessaire pour les applications solaires, tels que le dimensionnement du système de conversion. La méthode la plus précise est la mesure directe avec les appareils de mesure.

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint 1391000[km]. Il est situé à une distance moyenne de $149,598 \cdot 10^6$ [km] de la terre. Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes [10].

Le pourcentage d'hydrogène est de 73.46 %, et celle d'hélium est de 24.85 %. Le reste est une fraction d'éléments plus lourds.

Avec une puissance de rayonnée de $3,83 \cdot 10^{26}$ [w] qui donnent naissance à un rayonnement électromagnétique qui se propage à une vitesse de $217 \left[\frac{\text{km}}{\text{s}}\right]$. La température de son noyau atteint $15,1 \cdot 10^6$ [°k] qui décroît vers l'extérieur jusqu'à un palier d'environ 5770 [°k] [12].

Le Soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales :

- a. L'intérieur: où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire et qui est inaccessible aux Investigations, car le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches extérieures.
- b. La photosphère: l'épaisseur est d'environ 300 [km] qui est responsable de la presque totalité du rayonnement solaire que nous recevons.
- c. Chromosphère et couronne solaire: où la matière est très diluée, fait qui explique bien que la température y soit très élevée, le rayonnement émis est très faible [12].

I. 1. 2. Le rayonnement solaire

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde varie de $0,22\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$, la figure (I.1) représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement. Sur ce graphe on constate que pour $\lambda \leq 0,3\mu\text{m}$ le rayonnement est négligeable alors que pour la partie visible du rayonnement, pour des valeurs entre $0,3$ et $0,7\mu\text{m}$ l'absorption par l'atmosphère est faible [12].

La lumière peut être considérée sous forme d'onde électromagnétique de longueur d'onde λ ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie E liée à λ par la relation suivante [4].

$$E = h_p \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Avec

h_p : Constante de Planck $\left[\frac{\text{J}}{\text{s}}\right]$.

c : vitesse de la lumière dans le vide $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$.

ν : Fréquence $\left[\frac{1}{\text{s}}\right]$.

λ : Longueur d'onde $[\text{m}]$.

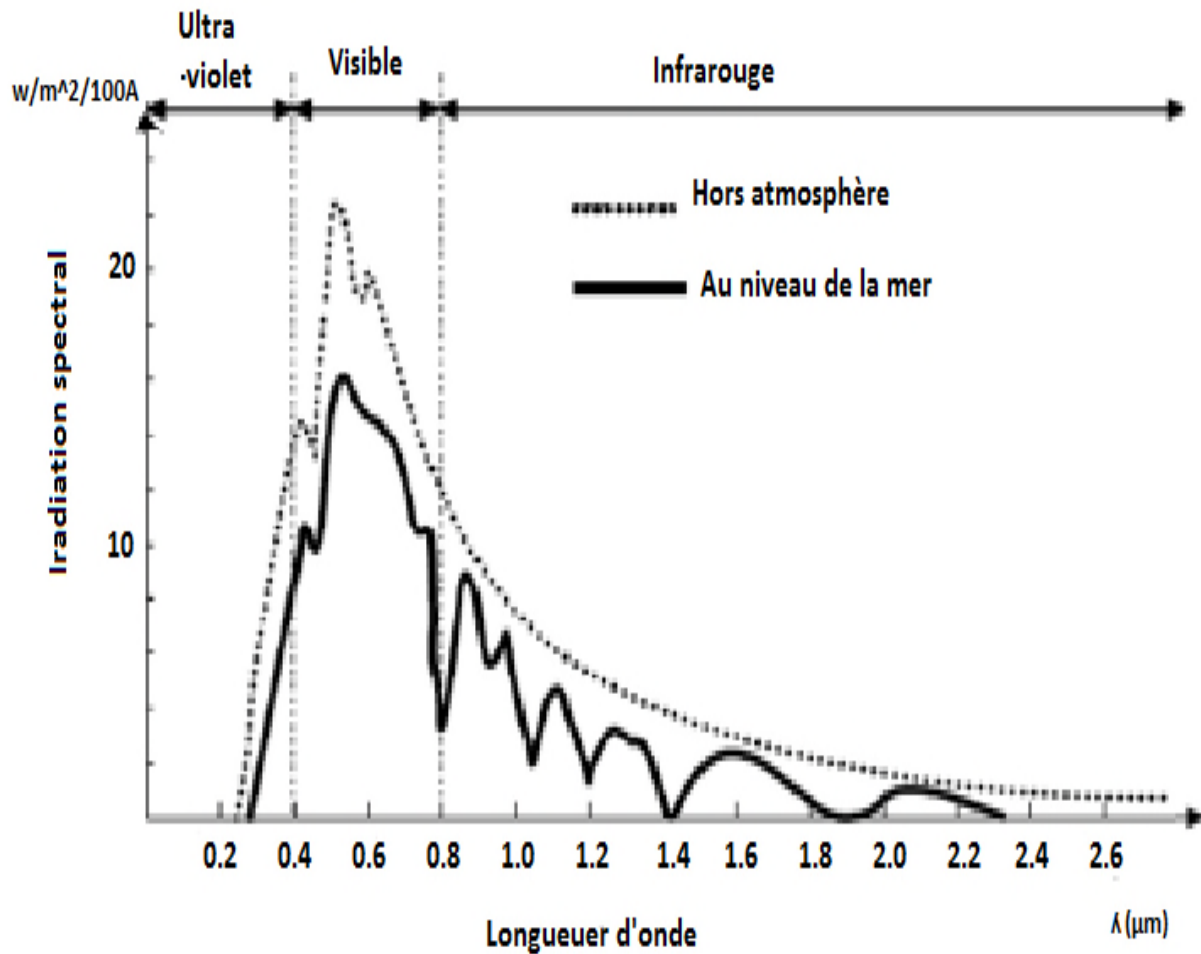


Fig. I. 1. Répartition spectrale du rayonnement solaire [15].

Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. En dehors de l'atmosphère terrestre, il donne un éclairement énergétique à peu près constant et égale à 1367 w/m^2 , appelé de ce fait constante solaire [1].

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes.

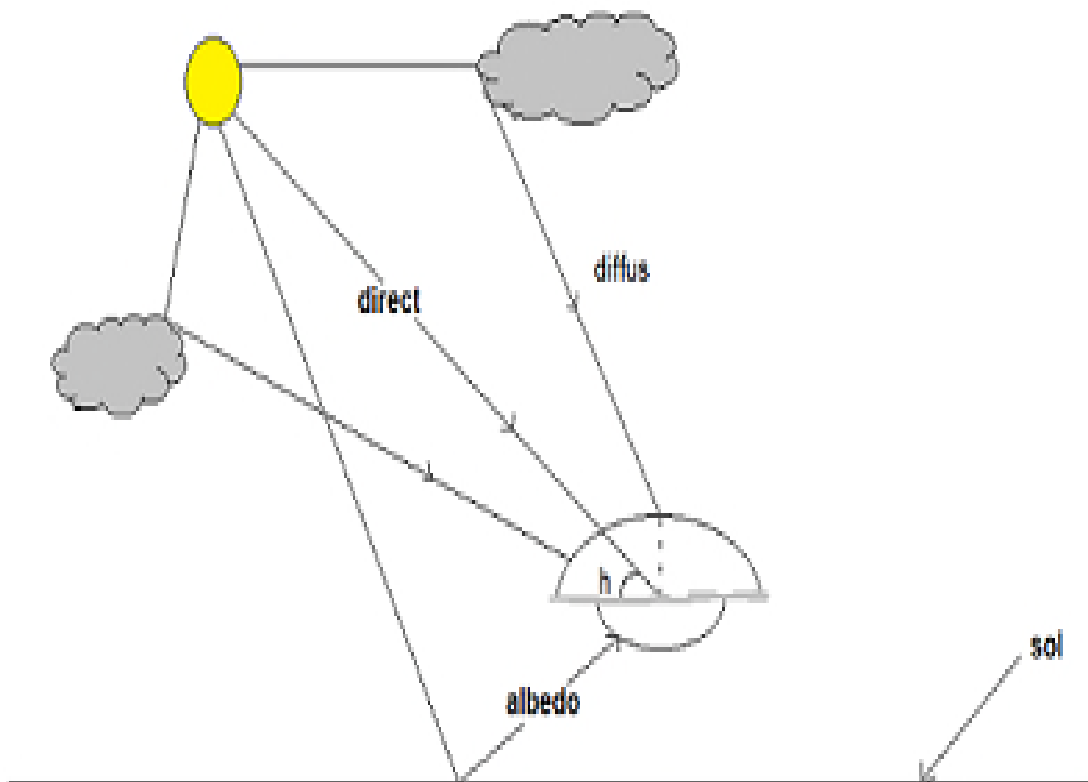


Fig. I. 2. Différents composants de rayonnement [4].

I. 1. 2. 1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un «pyrhéliomètre» [4].

I. 1. 2. 2. Rayonnement diffus

Le Rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voûte céleste [4].

I. 1. 2. 3. L'albédo ou Réfléchi

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol et aux nuages. Sachant qu'un corps noir possède un albédo nul [4].

I. 1. 2. 4. Rayonnement global

Le Rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus, et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs solaires [4].

I. 1. 3. Les formes d'énergie solaire

Aujourd'hui, nous captons l'énergie solaire pour chauffer les maisons, l'eau et pour produire de l'électricité, au moyen de trois différentes méthodes et technologies :

L'énergie solaire passive, L'énergie solaire active et l'énergie photovoltaïque [13].

I. 1. 3. 1. Le solaire passif

Le terme «passif» renvoie aux techniques utilisées pour capter l'énergie, ces techniques misent sur la conception des immeubles et le type de matériaux utilisés pour les construire. La conception solaire passive ne date pas d'hier. Il y a cent ans, des familles peignaient des réservoirs noirs et les plaçaient au soleil pour chauffer leur eau. Les surfaces noires absorbaient la chaleur qui était transférée du métal des réservoirs à l'eau. Cette méthode est toujours utilisée dans les pays chauds.

Aujourd'hui, la conception solaire passive utilise les éléments fondamentaux d'un immeuble, les murs, la toiture et les fenêtres, pour contrôler la quantité d'énergie solaire absorbée ou perdue [13].

I. 1. 3. 2. Le solaire actif

Le système d'énergie solaire active utilise des capteurs solaires pour capter l'énergie du soleil et produire de l'électricité afin d'alimenter des pompes et des ventilateurs qui distribuent de l'eau et de l'air chaud, tels que les systèmes à chauffe eau solaire qui utilisent les capteurs plans vitrés ou sous vide pour chauffer l'eau, les locaux ou pour la ventilation solaire. Un autre exemple est celui qui utilise les centrales solaires thermodynamiques [15].

I. 1. 3. 3. L'électricité solaire

Le processus photovoltaïque transforme l'énergie solaire en courant électrique continu. Le physicien Antoine Becquerel a découvert l'effet en 1839, mais ce n'est que vers la fin des années 1950 que les cellules photovoltaïques pratiques ont été commercialisées [15].

I. 2. Solaire photovoltaïque

I. 2. 1. Effet photovoltaïque

La conversion de la lumière en électricité est un phénomène physique correspond à l'apparition d'une tension entre deux électrodes séparées par un solide ou un liquide lorsqu'il est éclairé par une lumière incidente

La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux cellules photovoltaïques dont le rôle est de convertir le rayonnement solaire en électricité [2].

I. 2. 2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur les propriétés des matériaux semi conducteur. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque. Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur dopées différemment.

L'une est de type N (les électrons sont les porteurs de charge majoritaire), l'autre est de type P (les trous sont les porteurs de charge majoritaire) d'où l'apparition d'une différence de potentiel, l'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi-conducteur (Fig. I.3).

L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti relet est en suite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée.

Les cellules les plus répandues actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0.6V) [3].

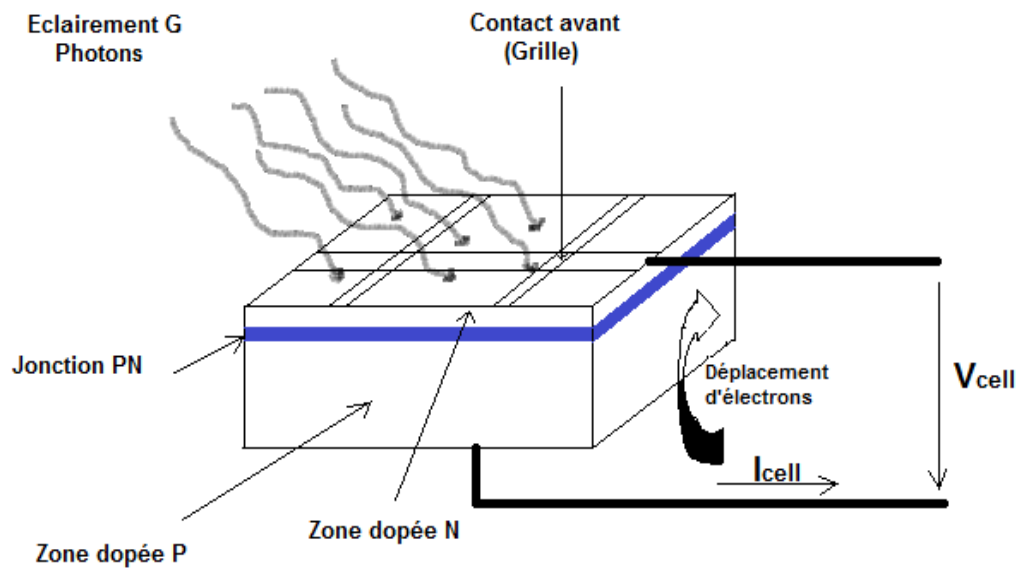


Fig. I. 3. Schémas d'une cellule élémentaire [3].

I. 2. 3. Les modules photovoltaïques et technologies des onduleurs couplés au réseau

Chaque cellule fournit fort peu d'énergie électrique, sous une tension max de l'ordre de 0.45V environ, il est donc indispensable de grouper ces cellules, pour obtenir une énergie exploitable, sous une tension pratique à utiliser. Généralement les cellules sont montées en série, la tension du module étant égale à la somme des tensions des cellules, par contre, le courant est celui d'une seule cellule [15].

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules (générateurs) solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau.

L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de l'énergie électrique.

Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau [3].

I. 2. 4. Le photovoltaïque dans les systèmes énergétiques

A l'heure actuel, les consommateurs de l'énergie électrique sont surtout alimentés par des centrales électriques situés à de grandes distances. Ceci nécessite de longues lignes de transmission et réseaux de distribution. Ces réseaux d'alimentation fournissent au consommateur un courant alternatif présentant une fréquence et une tension pratiquement constantes. Il est convenable de compléter ces infrastructures par des systèmes décentralisés de génération de chaleur et d'électricité. Cette alimentation en énergie décentralisée se caractérise par des unités d'alimentation relativement petites et situées à proximité immédiate du consommateur.

Ceci permet de faire une exploitation plus intense de l'électricité permettant ainsi d'améliorer l'utilisation de sources d'énergie sur le terrain(en particulier les énergies renouvelables d'origine solaire, éolienne ou hydraulique ou encore celle issue de la biomasse) [3].

I. 2. 5. La batterie

Les caractéristiques de l'énergie solaire posent le problème du stockage au niveau des installations photovoltaïques. Le moyen le plus adapté aux systèmes photovoltaïques est le stockage électrochimique. Le système le plus couramment utilisé est la batterie d'accumulateur électrochimique qui permet le stockage d'énergie électrique sous forme chimique pour la restituer sur demande grâce des réactions réversibles [15].

I. 2. 6. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I. 2. 6. 1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :

- La production de cette électricité renouvelable et propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petites taille, et leur opération silencieuse.

- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans[4].

I. 2. 6. 2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'atténuer, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [4].

I. 3. Solaire thermique

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil [4].

I. 3. 1. Principe de l'effet de serre

Un matériau recevant le rayonnement du soleil, réémet des rayons infra rouges invisibles, calorifiques. L'effet de serre est obtenu en intercalant entre le soleil et l'absorbeur un matériau transparent aux rayons du soleil et arrêtant les rayons infra rouges réémis.

Le verre et certains plastiques ont cette particularité, l'énergie ainsi réémise par le corps noir est absorbée par le verre, qui s'échauffe.

A l'équilibre le verre retransmet cette énergie pour moitié vers le corps noir, l'autre moitié vers la voûte céleste, pour récupérer à nouveau la moitié des émissions extérieures de la vitre on peut réutiliser l'effet de serre en plaçant une seconde vitre [5].

I. 3. 2. Les collecteurs thermiques

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. Elle se fait selon deux manières : une captation avec concentration et sans concentration [1].

I. 3. 3. Taux de concentration

La définition la plus commune du taux de concentration est basée sur la notion de surface. Elle est donnée comme étant le rapport de la surface de l'ouverture sur la surface du récepteur. De ce fait le taux de concentration du flux est défini comme le rapport du flux moyen d'énergie de la surface du récepteur sur le flux d'énergie moyen de la surface de l'ouverture [15].

$$C = \frac{S_o}{S_r}$$

S_o : Surface d'ouverture.

S_r : Surface de l'absorbeur.

Le paramètre de concentration détermine de façon directe la température d'utilisation (Fig. I.4), on peut distinguer :

- Les faibles concentrations : ($1 < C < 10 \Rightarrow T_c \sim 150^\circ\text{C}$).
- Les moyennes concentrations : ($10 < C < 100 \Rightarrow T_c \sim 300^\circ\text{C}$).
- Les fortes concentrations : ($C \geq 10 \Rightarrow T_c \geq 500^\circ\text{C}$).

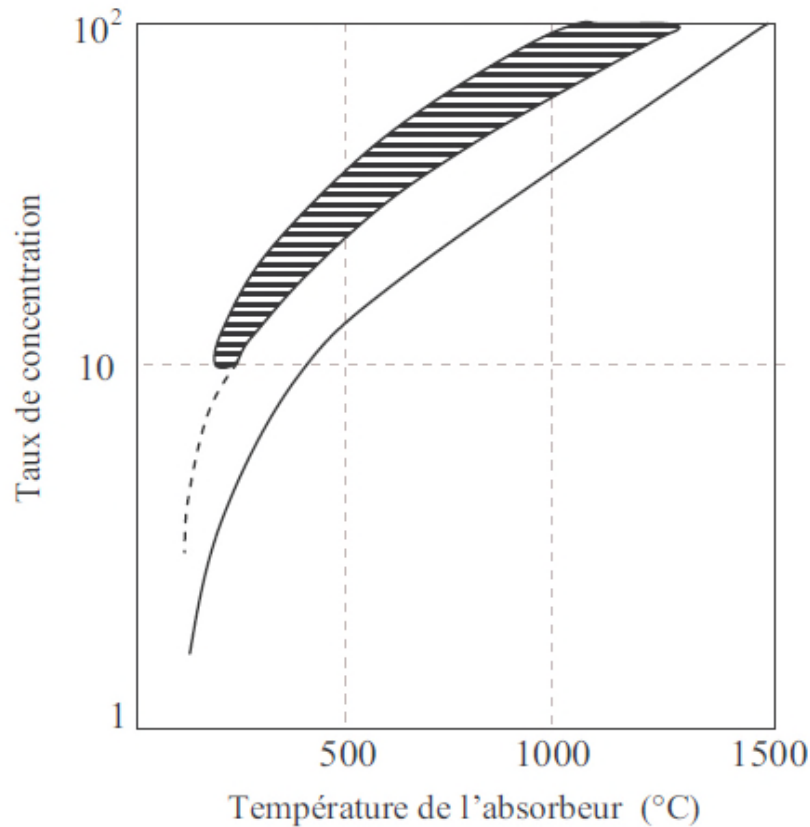


Fig. I. 4. Relation entre le taux de concentration et la température du récepteur [15].

- La limite minimale : lorsque les pertes thermiques sont égale à l'énergie absorbée.
- ▨ La zone hachurée : correspond à l'intervalle de fonctionnement du concentrateur.

I. 3. 4. Captation sans concentration

I. 3. 4. 1. Le capteur solaire plan vitré

C'est un dispositif sans concentration dans lequel la surface de l'absorbeur est une plaque métallique sensiblement plane et noircie pour absorber le maximum de rayonnement. Elle est recouverte d'une vitre sur la face avant et isolée sur les faces latérales et arrière. Les rayons solaires qui traversent la vitre sont absorbés par l'absorbeur qui s'échauffe et émet des rayons infrarouges. Ces derniers restent piégés dans le capteur à cause de la vitre (effet de serre) et de l'isolant sur les autres parois. Un liquide dans des tubes récupère la chaleur et la véhicule jusqu'au point d'utilisation. Les avantages des capteurs plans sont :

- Structure simple et robuste.
- Rapport performance prix favorable.

- Faciles à intégrer grâce à leur surface plane

L'absorbeur doit être doué d'un coefficient d'absorption le plus élevé possible. Les meilleurs coefficients sont de l'ordre de 0,95. Seules les couleurs foncées permettent d'obtenir des valeurs aussi élevées, l'idéal étant le noir évidemment. Par ailleurs, il vaut mieux que cet aspect ait été obtenu par un traitement (chimique ou autre) plutôt que par une couche de peinture [11].

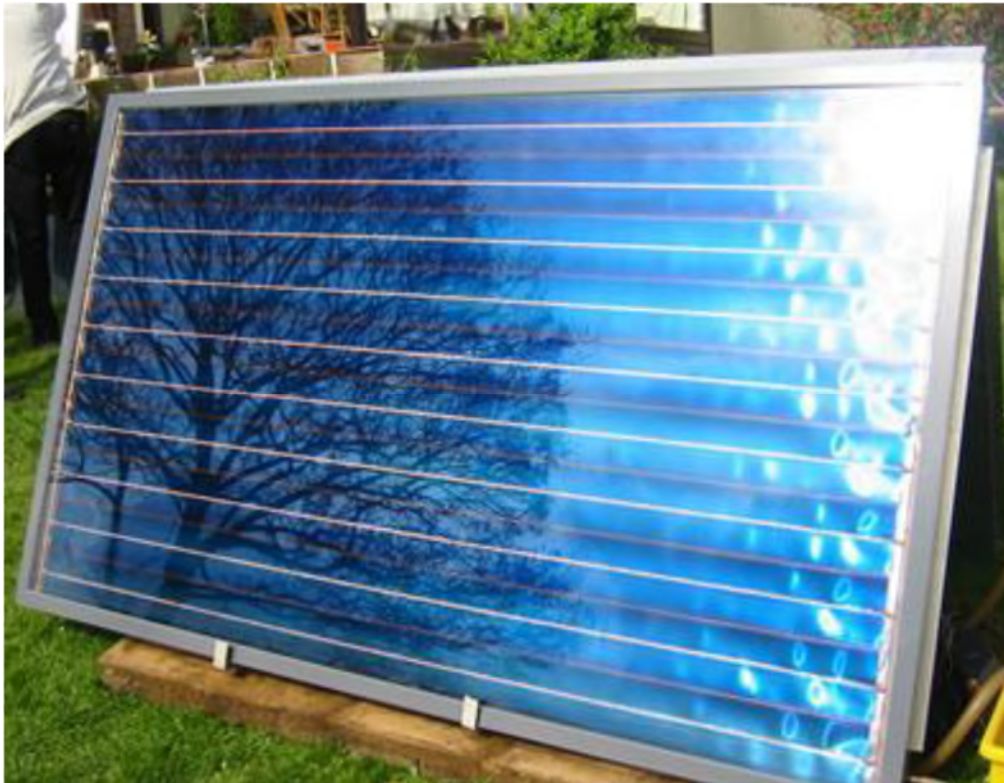


Fig. I. 5. *Capteur solaire thermique [11].*

I. 3. 4. 2. Le capteur solaire plan non vitré

Il s'agit de la technologie la plus simple. Ces capteurs sont constitués d'une surface réceptrice qui absorbe le rayonnement solaire direct et diffus (appelé absorbeur) pour le transmettre au fluide caloporteur qui circule dans un réseau de tubes et directement en contact avec la surface absorbante.

Les capteurs plans sans vitrage se présentent généralement sous forme d'une moquette de tubes noirs (Fig. I.6), en matière synthétique résistante aux ultraviolets et très facile à mettre en place. Ils sont utilisés pour chauffer les piscines à un niveau de température de l'ordre de 30°C pour un faible coût ou encore pour produire de l'eau chaude sanitaire dans les pays très chauds et ensoleillés. Les applications de ce type de capteurs sont aujourd'hui très limitées car les températures atteintes sont faibles du fait des pertes thermiques importantes qu'ils présentent [6].



Fig. I. 6. « Moquette solaire » [6].

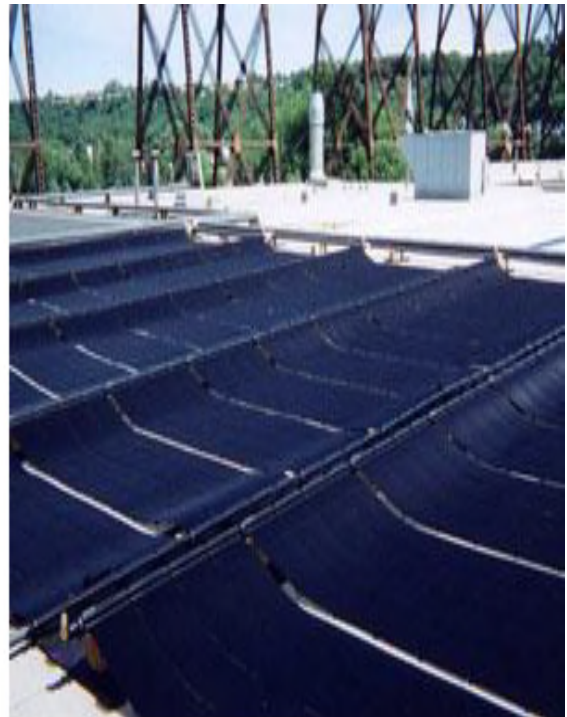


Fig. I. 7. Capteurs solaires sans vitrage [11].

I. 3. 4. 3. Distillateur solaire

Le principe de la distillation solaire repose sur l'effet de serre (Fig. I.8):

Un rayonnement solaire chauffe la membrane noire du fond du bac. Celle-ci émet des infrarouges. L'augmentation de la température due à l'effet de serre fait réchauffer l'eau qui s'évapore. Cette capacité d'évaporation grandit au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à ce que l'air atteigne sa saturation en vapeur d'eau. La vapeur d'eau que contient l'air chaud est refroidie par l'ambiance et se condense sur le vitrage. Il y a formation

de gouttes d'eau qui s'écoulent à la partie inférieure du vitrage dans une gouttière. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel [11].

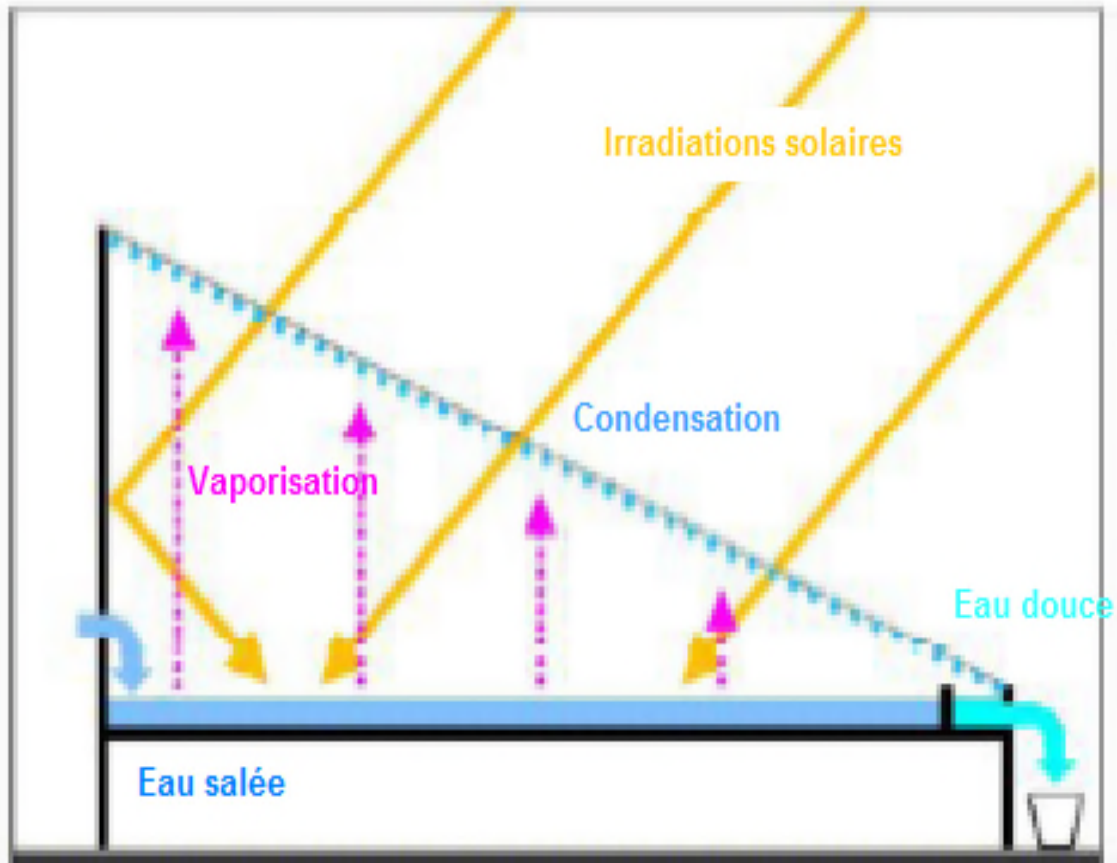


Fig. I. 8. Principe de la distillation solaire à effet de serre [11].

I. 3. 4. 4. Séchoir solaire

Le collecteur convertit le rayonnement solaire en chaleur. L'air pénètre dans le collecteur, il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection jusqu'à la chambre de séchage, cet air est ensuite utilisé pour sécher les produits. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques.

Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive [10].

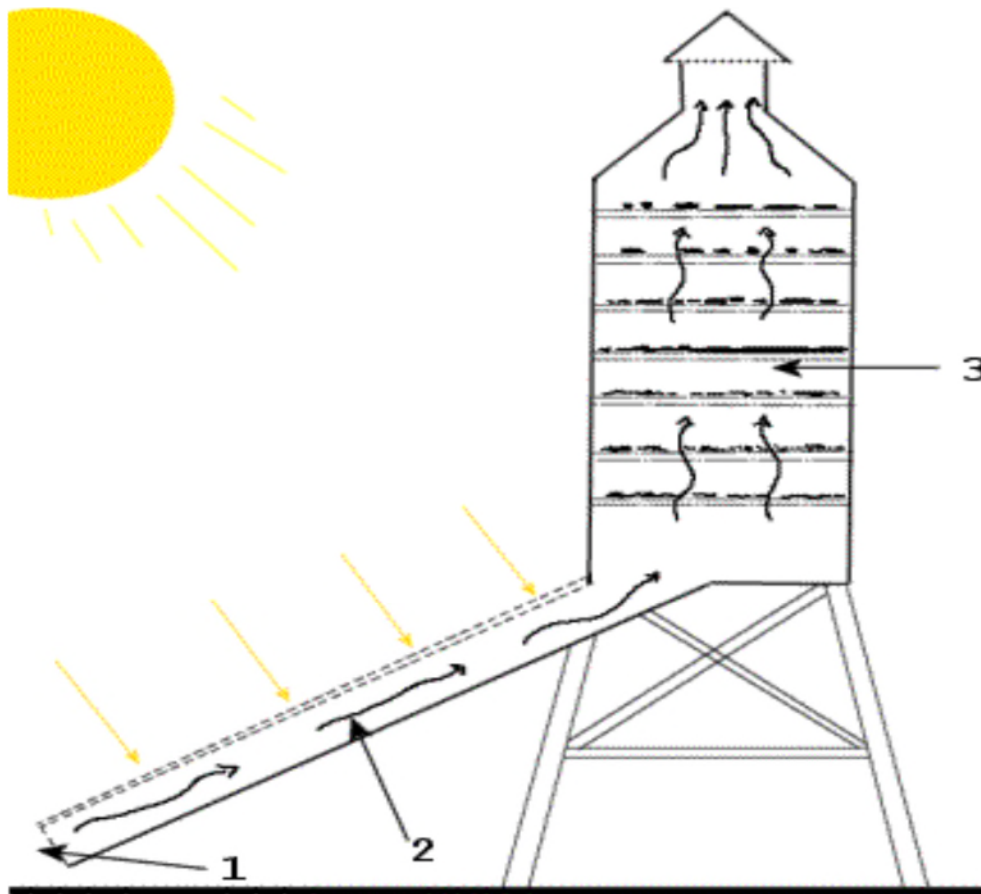


Fig. I. 9. Séchoir solaire [10].

1. Entrée d'air
2. L'air asséchant
3. Claie

I. 4. Solaire thermodynamique

I. 4. 1. Captation avec concentration

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit [2].

I. 4. 1. 1. Capteur à miroir de Fresnel

Le principe d'un collecteur de Fresnel est basé sur une technique de concentration par miroirs plans. Ainsi, on dispose au sol plusieurs longues lames réfléchissantes (miroirs primaires) orientées de telle façon que les rayons du soleil incidents soient directement reflétés vers le petit cylindre parabolique de même longueur (miroir secondaire), afin que se deuxième dispositif reflète enfin ces rayons sur le tube absorbeur. Le fluide caloporteur est chauffé en circulant dans le tube horizontal. Il peut atteindre des températures allant jusqu'à 500 °C. Les miroirs primaires peuvent être pivotés au fur et à mesure de la journée afin de suivre au mieux la course du soleil.

Les miroirs plans sont plus simples à fabriquer et meilleur marché que les paraboliques et cylindro-parabolique. De plus, ils présentent moins de prise au vent. Par contre, les performances optiques sont inférieures d'environ 30% par rapport aux autres concentrateurs. L'inconvénient majeur de cette option est qu'il va falloir concevoir un système qui oriente chacun des nombreux miroirs avec le meilleur angle [8].

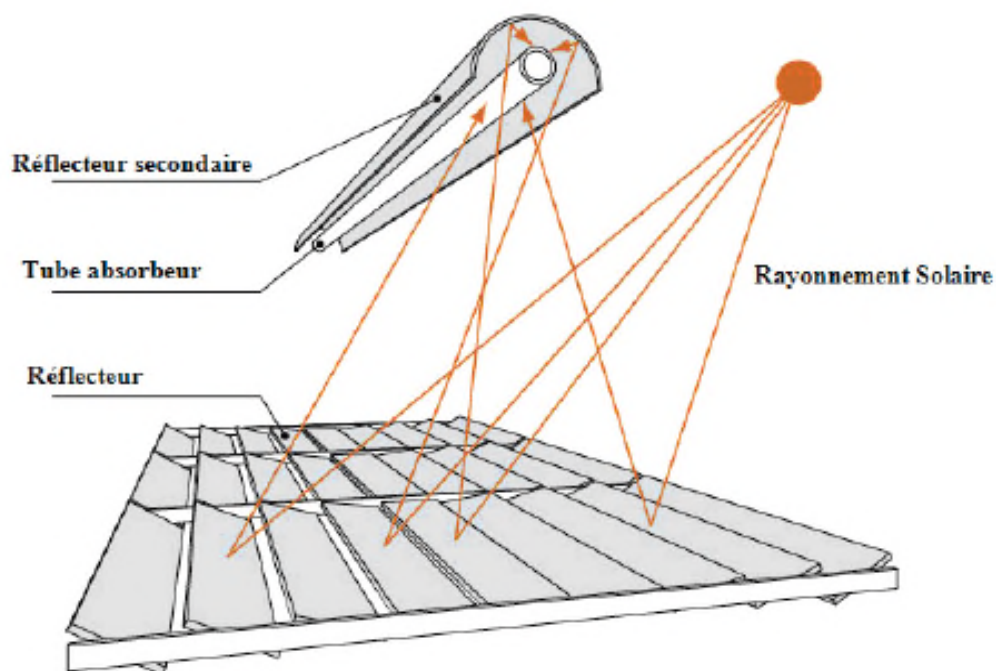


Fig. I. 10. Schéma de principe d'un capteur à concentration à lentille de Fresnel [6].

I. 4. 1. 2. Technologie à capteur cylindro-parabolique

Il s'agit de la technologie la plus utilisée dans les grandes centrales solaires thermodynamiques de production d'électricité. Le miroir concentrateur est un cylindre de section parabolique et ne comporte qu'une seule direction de courbure (Fig. I.11). La concentration a lieu sur la ligne où est placé le récepteur tubulaire dans lequel circule le fluide caloporteur [6].



Fig. I. 11. *Concentrateurs solaire à ébullition directe à Almeria [14]*

L'installation typique est constituée de trois éléments principaux : le champ solaire, le système de transfert de la chaleur (génération de vapeur) et le système de génération électrique :

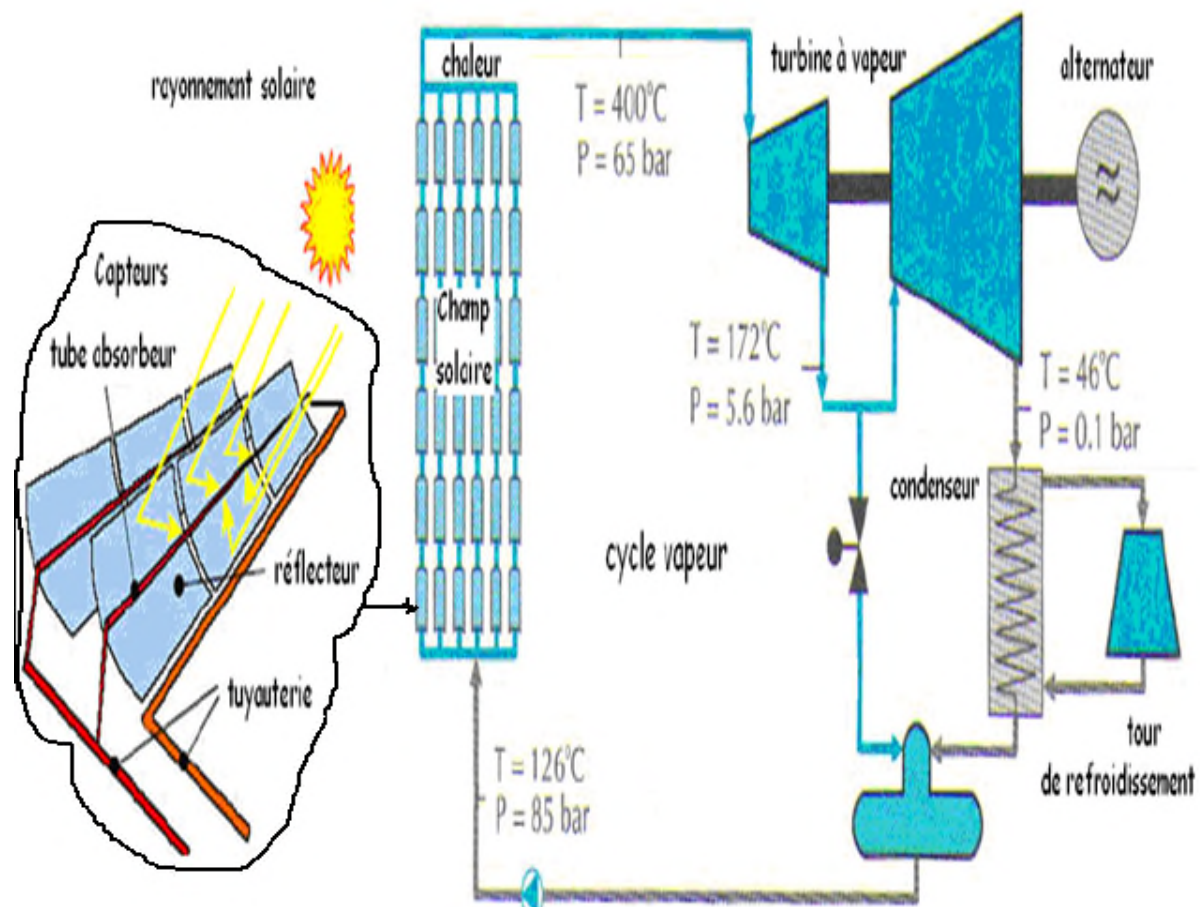


Fig. I. 12. Schéma d'une centrale cylindro-parabolique [16].

Le champ solaire est la partie réceptrice de l'installation: la radiation solaire y est transformée en énergie thermique. Le champ solaire est l'ensemble des capteurs solaires connectés en série pour former de longues files qui à leur tour sont connectées en parallèle. Le facteur de concentration pour un capteur cylindro-parabolique est de l'ordre de 80.

Les collecteurs (capteurs) cylindro-paraboliques sont de longs miroirs (composés de verre pauvre en fer recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure et d'un enduit spécial de protection) cylindriques qui concentrent les rayons sur une ligne (tube absorbant) et qui permet d'élever sa température jusqu'à 500°C .

La taille du champ solaire (ou champ de miroirs) dépend de la puissance désirée et de la température du fluide caloporteur en sortie. Les collecteurs sont alignés dans la direction

nord-sud, et disposent d'un système mono axial de suivi du soleil (tracker) dans la direction est-ouest.

Le rôle du mécanisme de poursuite est d'adapter l'inclinaison du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur.

L'énergie thermique reçue au collecteur est absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide. Le fluide (huile synthétique par exemple) 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 vapeur d'eau à haute température et pression. La vapeur produite est ensuite intégrée dans un cycle thermodynamique générant de l'énergie électrique au moyen d'un (ou de plusieurs) alternateur couplé à une (ou à plusieurs) turbine à vapeur [16].

I. 4. 1. 3. Technologie à concentrateurs paraboliques

Les capteurs paraboliques (Fig. I.13) sont basés sur la propriété optique bien connue du paraboloïde. En effet, tout rayon incident orthogonal au plan directeur se réfléchit sur le paraboloïde en direction du point focal, qui peut ainsi collecter tout le flux de chaleur récolté par le paraboloïde (à nouveau, au rendement de réflexion près). Le facteur de concentration est donc bien supérieur à celui d'un CCP (il peut atteindre 230). Ici, on place un moteur STIRLING au point focal, et non un absorbeur [8].

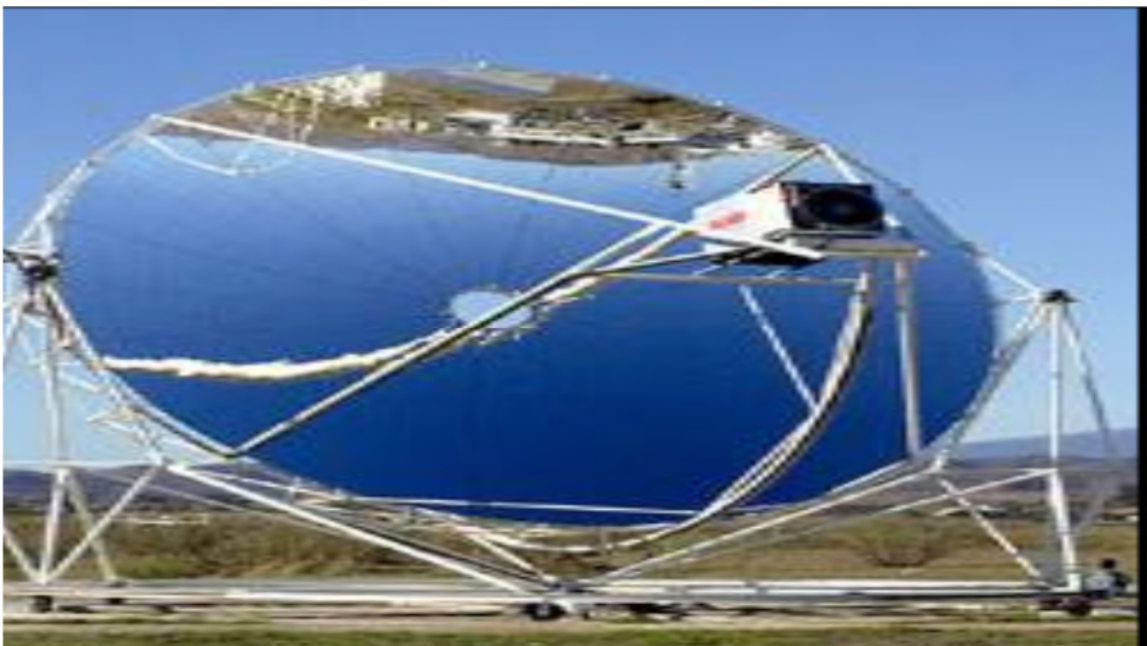


Fig. I. 13. Capteur parabolique [8].

I. 4. 1. 4. Technologie à tour (héliostat)

Ce type de centrales est constitué de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. L'avantage de la tour solaire par rapport aux capteurs cylindro-paraboliques est que les pertes à l'ambiance sont inférieures car la surface exposée est limitée.

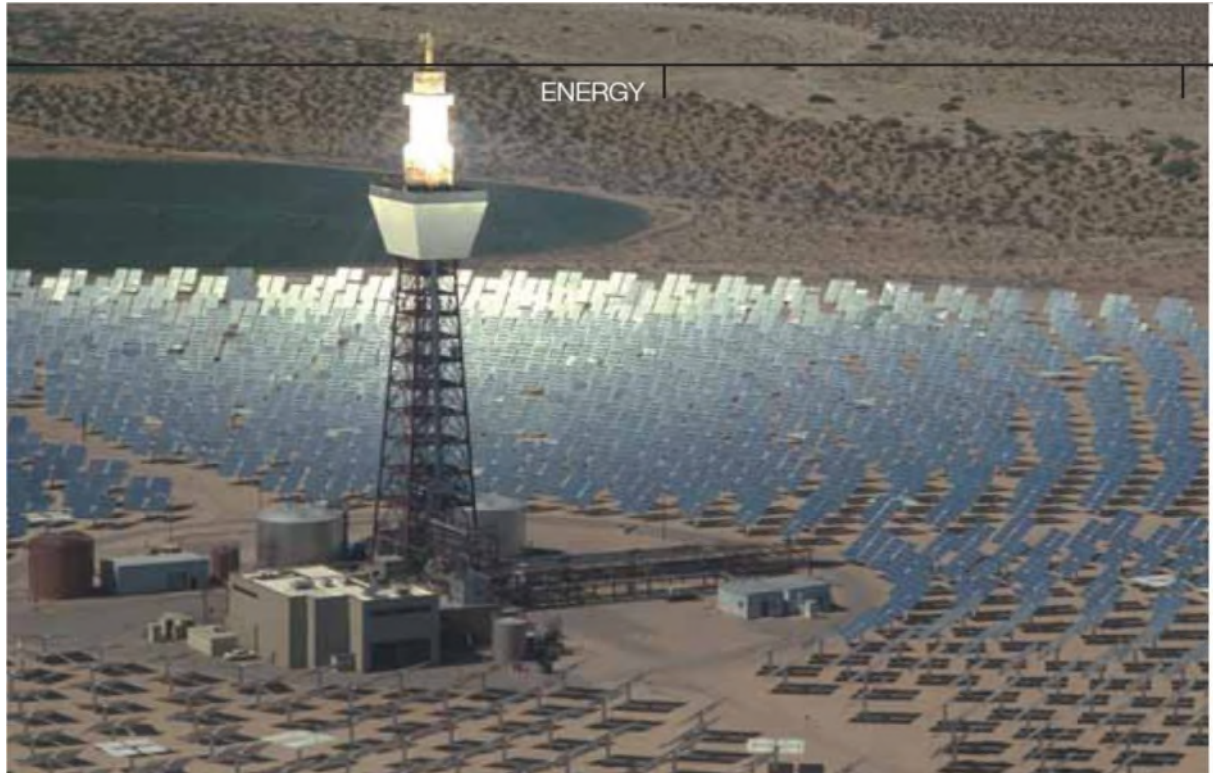


Fig. I. 14. *Solar II central receiver plant in Barstow, California [14].*

Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement et le réfléchit en direction d'un receveur au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 800 °C à 1000°C [14].

I. 4. 2. Quelques avantages de la concentration

- Réduction des surfaces réfléchissantes.
- Réduction des pertes thermiques.
- 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 [1].

I. 4. 3. Les cycles thermodynamiques

Les systèmes thermodynamiques de génération d'énergie mécanique sont divers tel que les turbines à gaz, cycle de Rankine, Moteur Stirling et Cycle de Rankine organique qui sont les options généralement choisies.

Ils utilisent tous un fluide caloporteur de transfert de chaleur auquel est imposé un cycle thermodynamique classique selon le schéma de principe [16] :

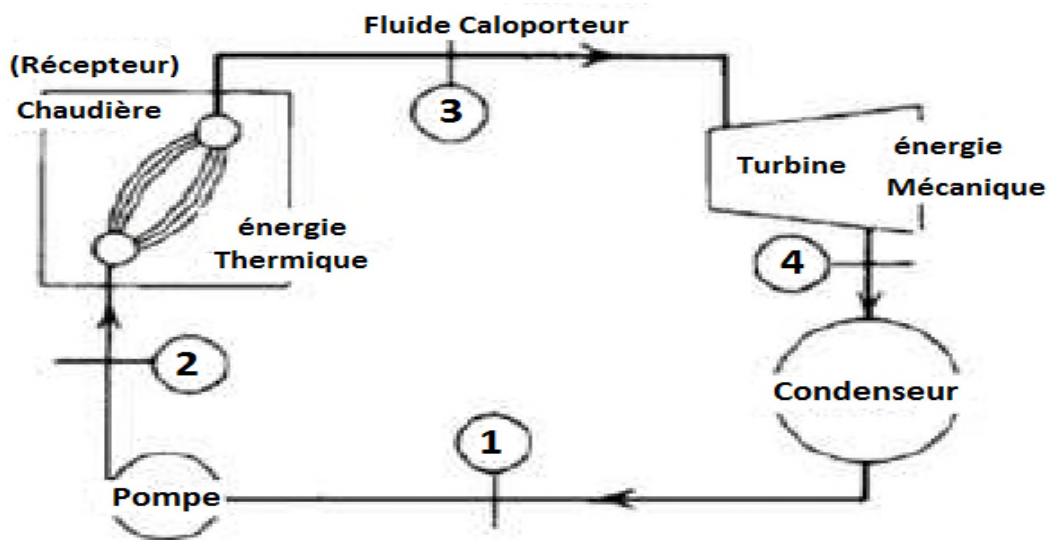


Fig. I. 15. Schéma d'une machine motrice [16].

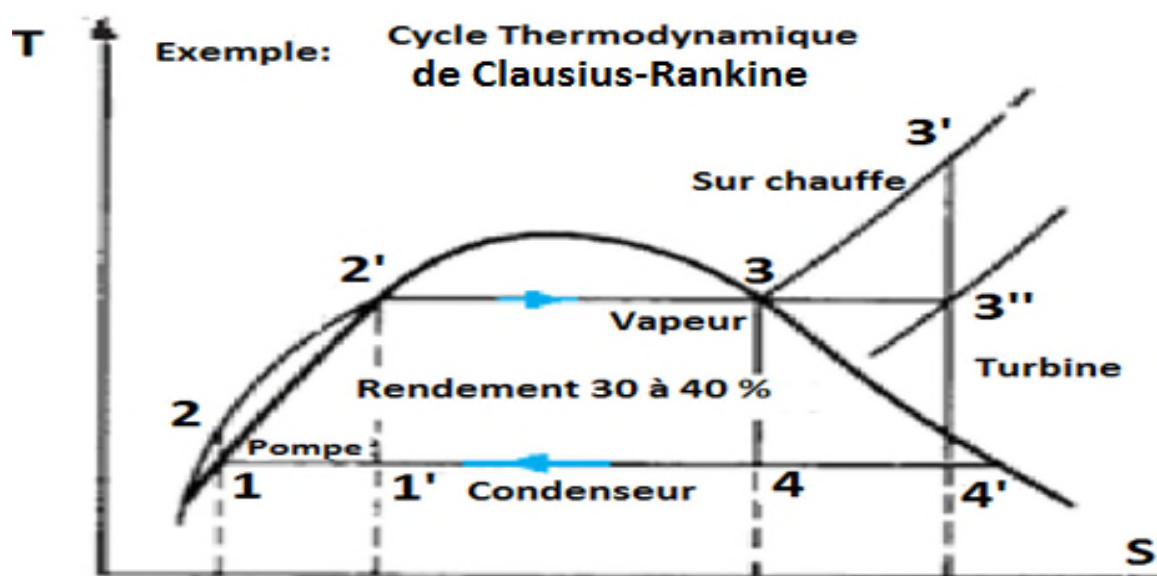


Fig. I. 16. Cycles de Clausius-Rankine à vapeur simple [16].

I. 4. 3. 1. Le cycle de Stirling

Le cycle de Stirling idéal est représenté sur la figure (I.14), Il comprend 4 transformations :

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

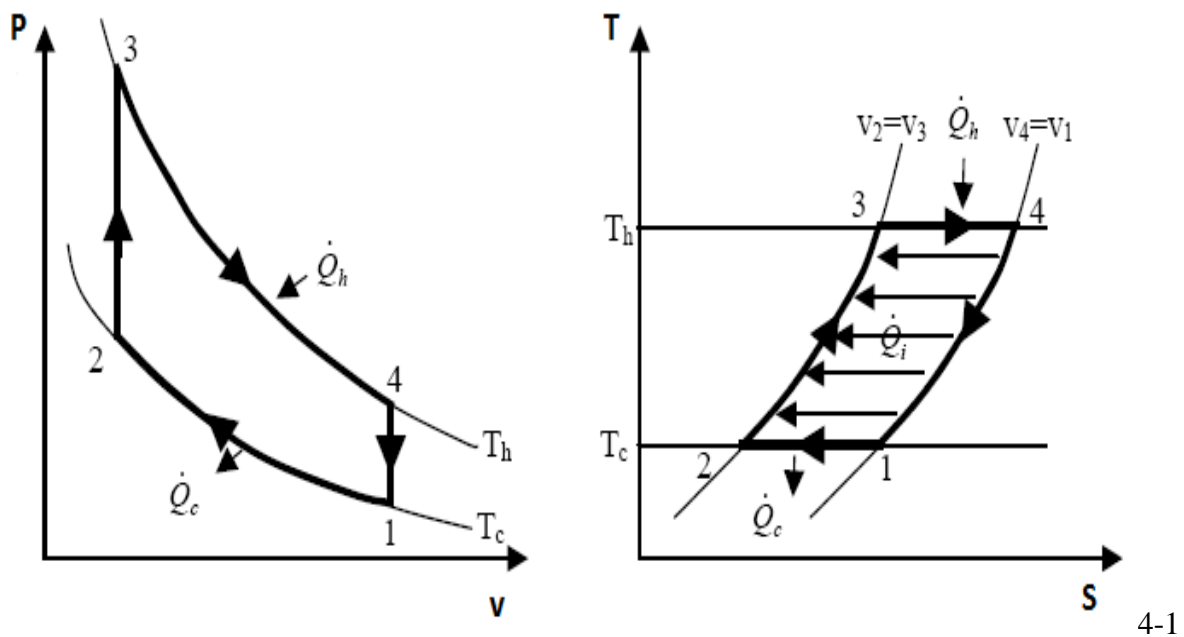


Fig. I. 17. Cycle de Stirling idéal [14].

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

Cependant, de nombreuses irréversibilités existent dans le cycle qui réduit ce rendement, particulièrement dans le régénérateur.

Dans le cas des capteurs paraboliques, la source chaude se situe 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 [14].

I. 4. 3. 2. 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 est représenté la figure suivante [14] :

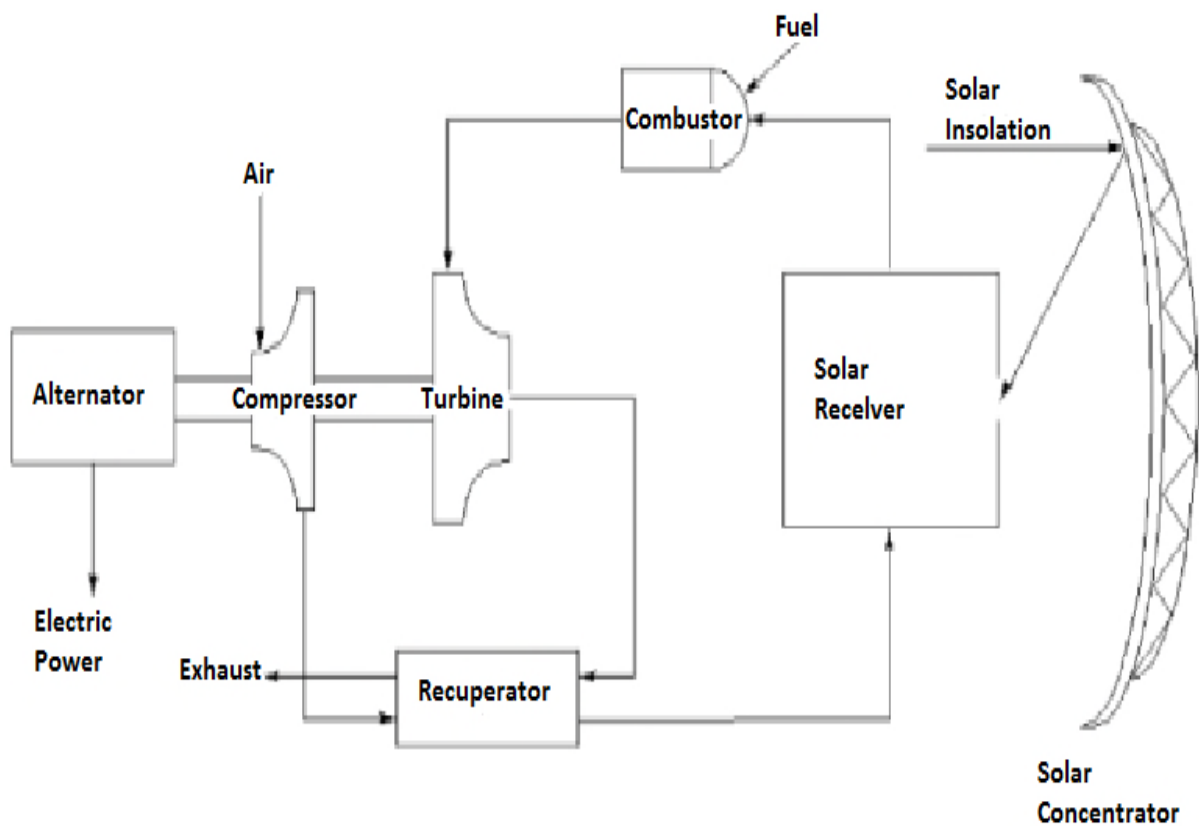


Fig. I. 18. Système de capteur parabolique avec un cycle de Brayton [14].

I. 5. Système de stockage

I. 5. 1. Stockage sans échangeur

Sans échangeur veut dire que l'on va utiliser un seul fluide, donc un seul réservoir, On cite comme avantage :

-échange de chaleur par mélange

-contrôle facile de la régulation

Le problème qui nous arrive est la possibilité d'alimenter le capteur avec une température relativement élevée ce qui provoque la diminution du rendement de captation [9].

I. 5. 2. Stockage a échangeur

Ce type de stockage consiste a l'utilisation d'un échangeur de chaleur d'où le choix libre des deux fluide, avec une température à l'utilisation maximale. Comme inconvénient on peut cités :

- alimentation possible du capteur à température relativement élevée
- régulation difficile [9].

I. 5. 3. Stockages à deux réservoirs chaud et froid

Les deux avantages majeur de ce types de stockage est que toute la chaleur captée est stockée et augmentation du rendement de captation du fait que le capteur est alimenter avec une température relativement basse. On cite comme inconvénient :

- soutirage à l'utilisation difficile
- régulation difficile [9].

I. 6. Principaux paramètres caractérisant un capteur

Le fonctionnement d'un capteur solaire est caractérisé par de nombreux paramètres dont les plus importants sont :

I. 6. 1. Le rendement

Le rendement d'un capteur est le rapport entre l'énergie extraite par le fluide caloporteur pendant un intervalle de temps donné et le produit de l'irradiation solaire pendant le même intervalle de temps, sur le capteur par sa superficie, dans les conditions de l'état stationnaire [11].

I. 6. 2. La superficie

La superficie d'entrée est l'aire maximale de la section droite du rayonnement pouvant atteindre le volume contenant l'absorbeur, directement ou par réflexion [11].

I. 6. 3. Orientation et inclinaison des capteurs solaires

Les capteurs solaires sont orientés et inclinés suivant l'utilité que l'on désire donner au système. En général, l'orientation des capteurs dans l'hémisphère nord doit être plein sud, car le soleil suit chaque jour une trajectoire apparente Est-sud-ouest, à l'encontre dans l'hémisphère sud où l'orientation doit être vers le nord [11].

I. 7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé certaines définitions concernant l'énergie solaire qui est l'origine de travail, ainsi que les différentes techniques d'utilisation de cette dernière. La première technique consiste à convertir l'énergie solaire en énergie électrique par des cellules dite photovoltaïque.

La seconde technique se subdivise en deux catégories distinctes pour la collection de l'énergie solaire, la différence est que l'une produit une énergie thermique directement utilisable par contre l'autre se base sur le principe de concentration où une quantité d'énergie considérable est fournie utilisable pour l'obtention de l'électricité.

Chapitre II Les différents modes de transfert de chaleur

Dans ce chapitre, nous présentons un certain nombre de définitions et théories relatives aux différents modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement).

II. 1. Conduction

C'est un mode de transfert de chaleur au sein d'un milieu solide, 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.
- une transmission par les électrons libres.

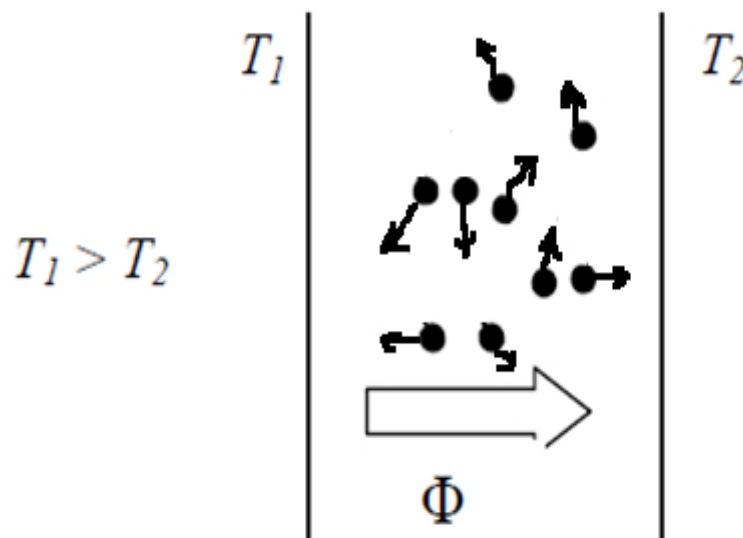


Fig. II. 1. Echange de chaleur par conduction [7].

II. 1. 1. Loi de Fourier

Dans un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique λ du milieu et au gradient de température

$$\Phi_c = -\lambda \cdot S \cdot \text{grad}(T)$$

Ou sous la forme algébrique :

$$\Phi_c = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Dans le cas directionnel})$$

Avec :

Φ_c : Flux de chaleur transmis par conduction [w].

λ : Conductivité thermique du milieu [$\frac{w}{m \cdot ^\circ K}$].

x : Variable d'espace dans la direction du flux [m].

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur [m^2].

II. 1. 2. Résistance thermique

Considérons un milieu cylindrique homogène, Les deux faces du cylindre sont maintenues respectivement à la température T_2 (source chaude) et T_1 (Source froide). On définit la résistance thermique par la relation :

$$T_2 - T_1 = R \cdot \Phi$$

On reconnaît dans cette équation par analogie électrique la forme générale de la loi d'Ohm :

$$E_2 - E_1 = R \cdot I$$

Dans laquelle les potentiels E sont remplacés par les températures et l'intensité I par le flux Φ [7].

I. 1. 3. Équation générale de la conduction

Considérons un milieu solide de volume V . Soit $(\rho \cdot C_p)$ sa chaleur volumique, λ sa conductivité, et P la puissance générée par unité de volume, due aux sources internes.

On applique le premier principe de la thermodynamique à un volume fini V , de surface S , contenu dans V . Avec les conventions habituelles, on compte positivement les énergies reçues par ce système.

En chaque point de V et pour un milieu homogène et isotrope, les caractéristiques thermiques λ et $\rho \cdot C_p$, constantes et pour lesquels P est indépendant de la température, on obtient l'équation linéaire classique de la chaleur:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T + \frac{P}{\lambda}$$

T: température fonction du temps et de la position dans l'espace [°C].

P: génération de puissance thermique $\left[\frac{W}{m^3}\right]$.

a : Diffusivité thermique du fluide $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

On en déduit aisément les cas particuliers suivants que l'on rencontre très fréquemment :

- milieu avec sources internes, en régime permanent :

$$\Delta T + \frac{P}{\lambda} = 0 \quad , \text{équation de POISSON}$$

- milieu sans sources internes, en régime permanent :

$$\Delta T = 0 \quad , \text{équation de LAPLACE}$$

- milieu sans sources internes, en régime variable :

$$\Delta T = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad , \text{équation de FOURIER}$$

On pourra donc, pour analyser un problème thermique, effectuer une transposition en construisant le schéma électrique correspondant (circuit en série, en parallèle) et adopter le même type de calcul.

I. 2. Convection

Ce mode de transfert est basé sur le fait qu'il y a déplacement de matière : il ne concerne donc que les fluides (liquides et gaz). Contrairement à la conduction où le transfert de chaleur se fait par contact, dans les liquides la possibilité de déformation sous l'effet de la température permet de mettre en œuvre des mouvements de ce fluide plus ou moins importants. Ces mouvements sont dus à des différences de pression et /ou des différences de température.

Dans le premier cas, l'écoulement est du à des forces extérieures (Pompe, ventilateur...). On est alors dans des conditions de convection forcée.

Dans le seconde cas, l'écoulement se fait naturellement : il est du à la différence de densité des différents zones du fluide. Ce phénomène est très courant et s'appelle convection naturelle [5].

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\Phi_{cv} = h \cdot S \cdot (T_s - T_\infty)$$

Avec :

Φ_{cv} : Flux de chaleur transmis par convection [w].

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection [$\frac{w}{m^2 \cdot ^\circ k}$].

T_s : Température de surface du solide [$^\circ k$].

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide [$^\circ k$].

S : Aire de la surface de contact solide/fluide [m^2].

Sachant que le coefficient de transfert convectif ne dépend pas en général de la nature de la paroi mais uniquement des propriétés du fluide (viscosité, coefficient de dilatation thermique, densité) et de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent) [12].

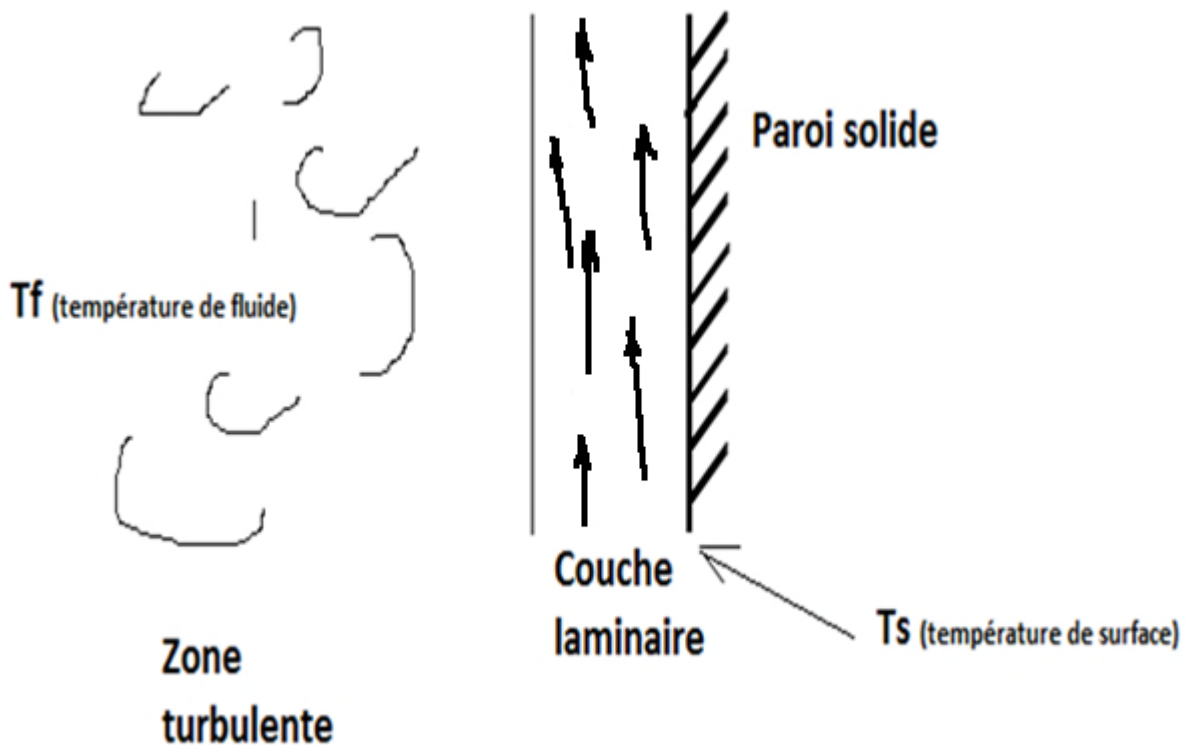


Fig. II. 2. Transfert de chaleur par convection [5].

II. 2. 1. Nombres sans dimension

Nous définirons ci-dessous les nombres sans dimension rencontrés en transfert thermique par convection, donnant dans chaque cas, une interprétation physique de ces nombres.

II. 2. 1. 1. Nombre de Nusselt

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda}$$

Avec :

h : Coefficient d'échange par convection $[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}]$.

L : dimension caractéristique de la surface d'échange [m].

λ : Conductivité thermique du milieu $[\frac{W}{m \cdot ^\circ K}]$.

La signification physique du nombre de Nusselt est le rapport de la quantité de la chaleur échangée par convection à la quantité de la chaleur échangée par conduction.

II. 2. 1. 2. Nombre de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda} = \frac{\nu}{a}$$

Avec :

μ : viscosité dynamique $[\frac{kg}{m \cdot s}]$.

Cp : Chaleur massique $[\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}]$.

λ : Conductivité thermique du milieu $[\frac{W}{m \cdot ^\circ K}]$.

Ce nombre représente le rapport de la diffusivité mécanique $\nu [\frac{m^2}{s}]$ à la diffusivité thermique $a [\frac{m^2}{s}]$.

Le nombre de Prandtl compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes thermodynamique dans le fluide.

II. 2. 1. 3. Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu}$$

Avec : u est La vitesse d'écoulement de fluide [$\frac{m}{s}$].

C'est une dimension pour la convection forcée, Ce nombre exprime le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité.

- Si $Re < 2400$ on est en régime laminaire.
- Pour des vitesses plus élevées, $Re \gg 2400$ le régime est turbulent [13].

II. 2. 1. 4. Nombre de Grashof

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\nu^2}$$

β : Coefficient de dilatation du fluide [K^{-1}].

g : Accélération de la pesanteur [$\frac{m}{s^2}$].

ΔT : L'écart de température [K].

ν : Diffusivité mécanique $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ [$\frac{m^2}{s}$].

ρ : masse volumique [$\frac{Kg}{m^3}$].

Le nombre Grashof est à la convection naturelle ce que le nombre de Reynolds est à la convection forcée.

- Si $Gr < 10^9$ on est en régime laminaire.
- Pour $Gr > 10^9$ La convection sera turbulente.

II. 2. 2. Expression de Nusselt en convection naturelle

Les relations sont de la forme $Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n$

Avec $n=1/4$ pour le régime laminaire

$n=1/3$ pour le régime turbulent

Le coefficient C dépend du régime d'écoulement et de la géométrie de la surface de contact.

Écoulement laminaire $0.2 < C < 0.6$

Écoulement turbulent $0.07 < C < 0.15$

II. 2. 3. Expression de Nusselt en convection forcée

En convection forcée Nu est fonction de Re et Pr : $Nu = f(Re, Pr)$

Exemple (à l'intérieur d'un tube)

Pour $\frac{L}{D} > 60$

$$10\,000 < Re < 120\,000$$

$$\text{Pour tous les fluides : } Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.33}$$

Avec L est la longueur du tube et D son diamètre [5].

II. 3. Transfert de chaleur par rayonnement

Tous les corps solides, liquides ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Si cette énergie rayonnée rencontre un corps absorbant pour ses longueurs d'onde, elle se transforme en chaleur.

Le rayonnement thermique, comme toutes les radiations électromagnétiques, n'exigeant pas de support matériel pour se propager, se produit même dans le vide.

II. 3. 1. Le corps noir

L'émetteur ou l'absorbeur idéal est un cas limite appelé corps noir. Il a la propriété d'absorber tout le rayonnement qui lui parvient quelque soit sa longueur d'onde ; son coefficient d'absorption α est égal à 1 et son coefficient de réflexion $\rho = 0$; maintenu à la température T, il émet le maximum de rayonnement thermique possible [10].

II. 3. 2. L'émittance (totale)

C'est le flux total émis par unité de surface de la source. On considère globalement la puissance $d\Phi$ émise par un élément de surface dS dans l'ensemble des directions où il peut rayonner, et on divise ce flux par l'aire de dS . L'émittance est notée par M.

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

II. 3. 3. Loi de Stefan Boltzmann

Cette loi fournit l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans l'espace en fonction de sa température absolue (sur tout le spectre de longueur d'onde). Elle s'écrit :

$$M^o = \sigma \cdot T_4 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Avec : σ est La constante de Stefan Boltzmann.

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right] \text{ [7].}$$

II. 3. 4. Rayonnement entre un corps et le milieu environnant

Tout corps émet un rayonnement thermique qui dépend de sa température et se traduit par son refroidissement.

$$\Phi_r = \sigma \cdot \varepsilon_p \cdot A \cdot (T_p^4 - T_\infty^4)$$

Avec : Φ_r est l'énergie de chaleur transmise par rayonnement

ε_p : Facteur d'émissivité du corps

A : Aire de la surface en $[m^2]$

T_p : Température du corps en Kelvin

T_∞ : Température du milieu environnant en Kelvin [13].

II. 3. 5. Répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide

Lorsqu'un rayon d'énergie incident Φ_i frappe un corps il se décompose en trois parties :

$\Phi_i \cdot \rho$: Énergie reflétée par la surface du corps

$\Phi_i \cdot \alpha$: Énergie absorbée par le corps

$\Phi_i \cdot \tau$: Énergie transmise à travers le corps

ρ , α et τ sont respectivement le pouvoir réfléchissant, absorbant et transmittant.

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

Qui sont en fonction de la nature du corps, de son épaisseur, de sa température T , de la longueur d'onde λ , du rayonnement incident et de l'angle d'incidence [12].

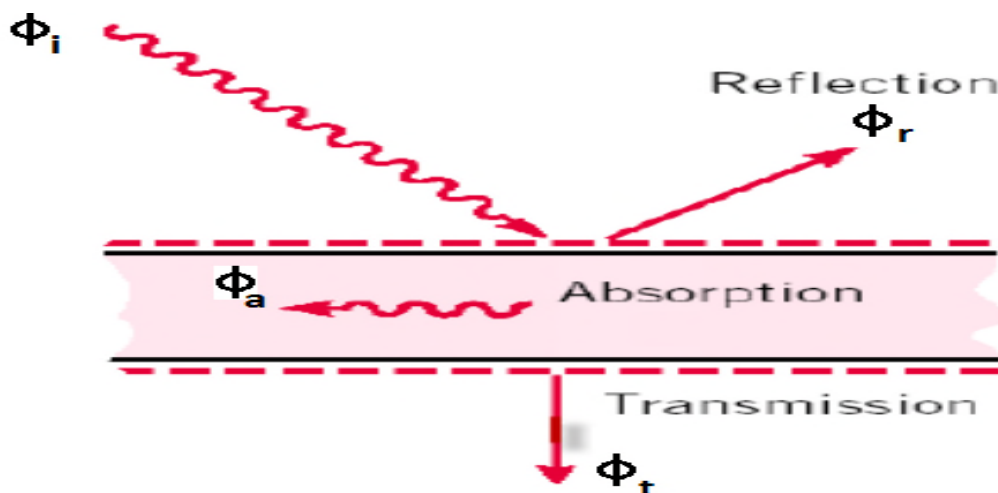


Fig. II. 3. Répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide [12].

Chapitre III Etudes thermique et expérimental

III. 1. Étude thermique

Le capteur utilisé pour notre étude est un concentrateur solaire de type cylindro-parabolique dont il est destinée à concentrer les rayons solaires vers sa ligne focale contenant l'absorbeur, qui est un tube circulaire avec une couche sélective adéquate, est entouré par une enveloppe transparente en verre.

Le paramètre le plus important dans cette étude est l'estimation exacte du rayonnement solaire incident, ce dernier est donné par un appareil de mesure nommé «pyrhéliomètre». L'étude thermique de l'absorbeur nous permet de suivre l'évolution de la température du fluide caloporteur, dans notre cas est de l'eau, ainsi que les différentes autres températures, telle que la température de la vitre T_v et celle de l'absorbeur T_a . Pour cela, un modèle mathématique est établi pour modéliser les différents échanges thermiques de tube absorbeur.

La simulation du processus s'effectue à l'aide des thermocouples à affichage numérique. De même on a réalisé un block Simulink sur Matlab pour la comparaison des résultats obtenue.

III. 1. 1. Généralité

III. 1. 1. 1. Tube absorbeur

Le tube collecteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

Bonne absorption du rayonnement : son coefficient d'absorption doit être aussi élevé que possible afin d'éviter toute réflexion du rayonnement incident.

Pertes thermiques limitées : La température du tube dépassant généralement 400°C, les pertes par échanges convectifs et radiatifs sont très importantes. Afin de les limiter, le tube est entouré d'une enveloppe de verre sous vide [14].

III. 1. 1. 2. Fluides caloporteurs

Chaque fluide caloporteur est choisi selon ses propriétés physiques et chimiques : viscosité, capacité thermique volumique, conductivité électrique, propriétés oxydantes, tenue à la température maximale, etc. Le coût a également une influence dans ce choix. Il faut donc trouver le fluide qui sera optimal.

Il vaut mieux éviter les fluides mauvais pour la couche d'ozone et provoquant un réchauffement climatique trop important. De même, on évite préférentiellement les fluides toxiques et inflammables [8].

On distingue comme fluides:

- Les huiles qui présentent un bon coefficient d'échange sont les fluides les plus utilisés dans les centrales cylindro-paraboliques.
- Les sels fondus, mélanges binaires ou ternaires à base de nitrates de sodium et de potassium qui possèdent une densité élevée sont de très bons fluides de stockage.
- Les fluides organiques (butane, propane, etc.) qui ont une température d'évaporation basse sont utilisés comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine.
- L'eau liquide fluide de transfert idéal, offre un excellent coefficient d'échange et possède une forte capacité thermique est utilisée directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine.
- Les gaz (hydrogène ou l'hélium) sont utilisés comme fluides thermodynamiques et entrainer les moteurs Stirling associés aux collecteurs paraboliques.
- L'air est utilisé classiquement comme fluide de travail dans une turbine à gaz. Il peut être aussi utilisé comme caloporteur seulement [16].

III. 1. 1. 3. Critère d'inertie thermique

Il existe un certain déphasage dans le temps entre l'énergie solaire captée et l'énergie emportée par le fluide caloporteur, C'est le critère d'inertie thermique. Il est fondamental dans l'analyse d'un capteur solaire. S'exprimant comme la somme des produits masse

capacité calorifique ($M \cdot C_p$) des différentes parties du capteur, ce critère fait que le capteur est susceptible de fonctionner bien après le coucher du Soleil s'il est bien isolé.

Nous retiendrons que cette inertie engendre la non-pertinence de l'hypothèse de fonctionnement en régime permanent qui est habituellement faite dans l'étude des capteurs [9].

III .1. 2. Étude thermique de tube absorbeur

Le but de l'étude, est de prévoir la température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur, pour cela on utilise le principe de conservation de l'énergie pour chaque élément de l'absorbeur qui peut donc être présenté par une équation de bilan d'énergie suivant :

La variation de l'énergie interne = l'énergie reçue - l'énergie perdue

Ou encore sous forme mathématique, considérons une section quelconque du système à l'instant t .

Le bilan de l'élément i s'écrit [13] :

$$m_i \cdot C_{p_i} \cdot \frac{dT_i}{dt} = \sum Q_r - \sum Q_p$$

m_i : Masse de l'élément i .

C_{p_i} : Chaleur spécifique de l'élément i .

dt : Pas de temps.

III. 1. 2. 1. Absorbeur en cuivre

Dans un premier essai nous allons utiliser un simple tube en cuivre dont les paramètres sont les suivants :

Diamètre extérieur du tube $D_{ext} = 2.8 \text{ Cm}$

Diamètre intérieur du tube $D_{int} = 2.6 \text{ Cm}$

Le tube en cuivre a les caractéristiques thermo physique suivantes [7] :

Conductivité thermique $\lambda_{cu} = 348 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right]$

Chaleur spécifique $C_{p_{cu}} = 398 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ K} \right]$

Masse volumique $\rho_{cu} = 8900 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

III. 1. 2. 1. 1. Transfert de chaleur entre le tube absorbeur et l'environnement

$$m_{cu} \cdot C_{p_{cu}} \cdot \frac{dT_{cu}}{dt} = Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4 \quad (1)$$

Avec :

Q_1 : Quantité d'énergie solaire absorbée par le tube.

Q_2 : Chaleur rayonnée vers le ciel.

Q_3 : Chaleur convective du tube vers l'Extérieur.

Q_4 : Chaleur convective de l'absorbeur vers le fluide caloporteur.

$$Q_1 = G_n \cdot (\pi \cdot D_{ext} \cdot L) \cdot \eta_{opt} \cdot \alpha_{cu} \cdot C$$

Avec :

G_n : Flux solaire concentré au tube $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.

L : Longueur de l'absorbeur.

η_{opt} : Rendement optique.

Le rendement optique tient compte de réflectivité du collecteur ainsi que les erreurs géométriques du capteur.

α_{cu} : L'absorptivité du tube ($\alpha_{cu} = 0.085$).

C : Taux de concentration

$$C = \frac{S_c}{S_a}$$

S_c : Surface du capteur

S_a : Surface du tube absorbeur

$$S_a = \pi \cdot D_{ext} \cdot L$$

Q_2 : Chaleur rayonnée vers le ciel

Les pertes thermiques par rayonnement sont exprimer par :

$$Q_2 = \sigma \cdot (\pi \cdot D_{ext} \cdot L) \cdot \epsilon_{cu} \cdot (T_{cu}^4 - T_c^4)$$

Avec :

σ : La constante de Stefan Boltzmann.

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$$

T_{cu} : Température de l'absorbeur.

T_c : Température du ciel

$$T_c = 0.0552 \times T_{am}^{3/2} \text{ [11].}$$

ϵ_{cu} : Émissivité du tube ($\epsilon_{cu} = 0.95$)

Q_3 : Chaleur convective du tube vers l'Extérieur

Nous avons exprimé les pertes thermiques par convection par l'équation de transfert de chaleur entre le tube en cuivre et le milieu ambiant :

$$Q_3 = h_{cu} \cdot (\pi \cdot D_{ext} \cdot L) \cdot (T_{cu} - T_{am})$$

T_{am} : Température ambiante.

h_{cu} Est le coefficient d'échange convectif entre le tube en cuivre et l'environnement $[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$.

Q_4 : Chaleur convective de l'absorbeur vers le fluide caloporteur.

$$Q_4 = h_f \cdot (\pi \cdot D_{int} \cdot L) \cdot (T_{cu} - T_f)$$

Avec :

h_f : Coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur $[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$.

T_f : Température du fluide caloporteur.

III. 1. 2. 1. 2. Transfert de chaleur entre le tube absorbeur et le fluide caloporteur

$$m_f \cdot C_{p_f} \cdot \frac{dT_f}{dt} = Q_4 - Q_5 \quad (2)$$

Avec

Q_5 : Chaleur emportée par le fluide caloporteur

$$Q_5 = M_f \cdot C_{p_f} \cdot \rho_f \cdot (T_{fS} - T_{fE})$$

M_f : Débit volumétrique $[\frac{m^3}{s}]$.

C_{p_f} : Chaleur spécifique du fluide caloporteur $[\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}]$

ρ_f : Masse volumique du fluide caloporteur $[\frac{kg}{m^3}]$

T_{fS} : Température du fluide caloporteur à la sortie de tube absorbeur.

T_{fE} : Température du fluide caloporteur à l'entrée de tube absorbeur.

III. 1. 2. 1. 3. Bilan global

La température moyenne T_f du fluide dans le capteur est un cas délicat. Certains auteurs (comme Menguy et Cie) l'estiment égale à la moyenne arithmétique des températures d'entrée et sortie :

$$T_f = \frac{T_{fS} + T_{fE}}{2}.$$

DESAUTEL [A] propose:

$$T_f = 0,75. T_{fS} + 0,25. T_{fE} + \Delta T \quad (3)$$

L'équation (3), où ΔT représente un gradient de transfert thermique entre la température moyenne de l'absorbeur T_{cu} et T_f , nous paraît plus proche de la réalité que la simple moyenne arithmétique car l'évolution du fluide dans le capteur a la forme donnée par la figure.

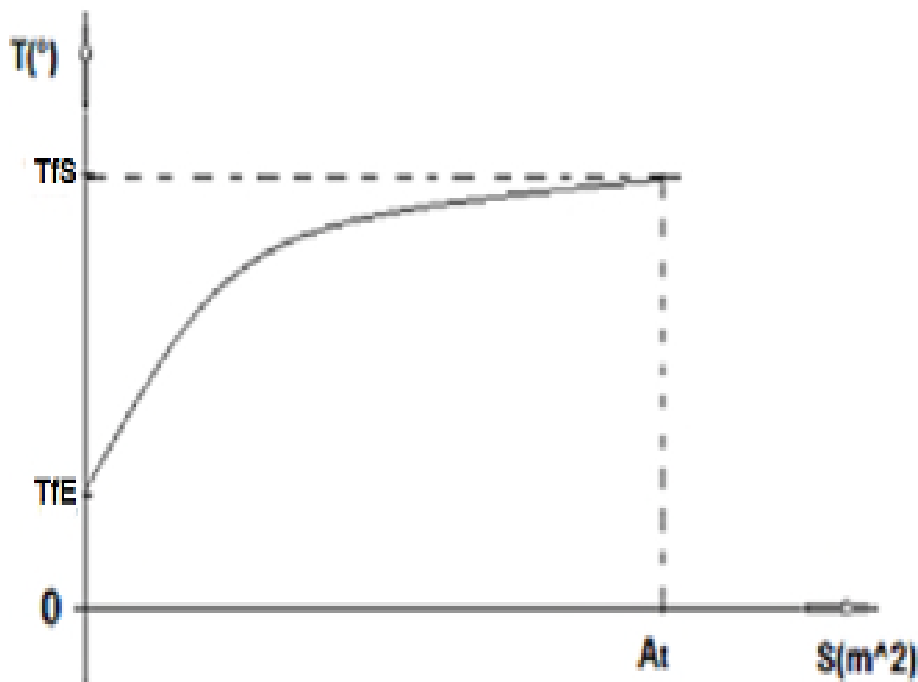


Fig. III. 1. Evolution de la température du fluide dans le capteur [9].

A_t , est l'aire totale de l'absorbeur concernée par l'échange avec le fluide caloporteur.

Dans notre cas, T_{cu} et T_f sont très peu différentes en moyenne, et nous prendrons $\Delta T = 0$.

Ainsi, obtient- on [9] :

$$T_f = 0,75. T_{fS} + 0,25. T_{fE}$$

Cette équation implique que:

$$T_f = \frac{3}{4} \cdot T_{fS} + \frac{1}{4} \cdot T_{fE}$$

$$T_{fS} = \frac{4}{3} \cdot T_f - \frac{1}{3} \cdot T_{fE} \quad (4)$$

Le modèle définitif de l'absorbeur devient :

$$(1) \quad m_{cu} \cdot C_{p_{cu}} \cdot \frac{dT_{cu}}{dt} = G_n \cdot (\pi \cdot D_{ext} \cdot L) \cdot \eta_{opt} \cdot \alpha_{cu} \cdot C \\ - \sigma \cdot (\pi \cdot D_{ext} \cdot L) \cdot \varepsilon_{cu} \cdot (T_{cu}^4 - T_c^4) \\ - h_{cu} \cdot (\pi \cdot D_{ext} \cdot L) \cdot (T_{cu} - T_{am})$$

$$(2) \quad m_f \cdot C_{p_f} \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_f \cdot (\pi \cdot D_{int} \cdot L) \cdot (T_{cu} - T_f) \\ - M_f \cdot C_{p_f} \cdot \rho_f \cdot (T_{fS} - T_{fE})$$

$$(4) \quad T_{fS} = \frac{4}{3} \cdot T_f - \frac{1}{3} \cdot T_{fE}$$

III. 1. 2. 1. 4. Evaluation des coefficients d'échange convectif

III. 1. 2. 1. 4. 1. Calcul du coefficient d'échange convectif entre le tube absorbeur et l'environnement $h_{cu} [\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$:

température	Conductivité thermique	Viscosité dynamique	Masse volumique	Chaleur spécifique
T	λ	μ	ρ	C_p
$^\circ C$	$[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}]$	$[\frac{Kg}{m \cdot s}]$	$[\frac{Kg}{m^3}]$	$[\frac{J}{Kg \cdot ^\circ C}]$
0	0.02313	17.19×10^{-6}	1.275	1000
50	0.02680	19.26×10^{-6}	1.077	1005

Tab III. 1. Propriétés de l'air [5].

Pour $T=25$ ($^{\circ}\text{C}$) on prend :

$$\lambda_{\text{air}} = 0.02497 \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right]; \quad \mu_{\text{air}} = 1.823 \times 10^{-5} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]; \quad \rho_{\text{air}} = 1.176 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right];$$

$$C_{p_{\text{air}}} = 1002.5 \left[\frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right]; \quad D_4 = 47 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$h_{\text{cu}} = \frac{\text{Nu}_{\text{air}} \cdot \lambda_{\text{air}}}{D_{\text{ext}}}$$

Convection naturelle (vitesse du vent inférieure à 1 m/s) [8].

$$\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr})$$

$$\text{Gr}_{\text{air}} = \frac{\beta_{\text{air}} \cdot g \cdot L^3 \cdot (T_{\text{cu}} - T_{\text{c}})}{v_{\text{air}}^2}$$

$$\beta_{\text{air}} = \frac{1}{(T_{\text{cu}} - T_{\text{c}})} \text{ pour les gaz parfaits [8].}$$

$$\text{Gr}_{\text{air}} = \frac{2 \cdot g \cdot L^3 \cdot \rho_{\text{air}}^2}{\mu_{\text{air}}^2}$$

Pour un vent perpendiculaire à la surface du tube, on adopte $L = D_{\text{ext}}$

$$\text{AN : } \text{Gr}_{\text{air}} = \frac{2 \times 9.81 \times (28 \times 10^{-3})^3 \times 1.176^2}{(1.823 \times 10^{-5})^2} = 17.92315 \times 10^5$$

$$\text{Gr}_{\text{air}} = 17.92315 \times 10^5 < 10^9 \quad \text{D'où l'écoulement est laminaire.}$$

$$\text{Nu}_{\text{air}} = 0.1 \text{ Ra}_{\text{air}}^{1/3} \text{ [8].}$$

$$\text{Le nombre de Rayleigh : } \text{Ra}_{\text{air}} = \text{Gr}_{\text{air}} \cdot \text{Pr}_{\text{air}}$$

Le nombre de Rayleigh caractérise l'écoulement en convection naturelle.

$$\text{Pr}_{\text{air}} = \frac{\mu_{\text{air}} \cdot C_{p_{\text{air}}}}{\lambda_{\text{air}}} = \frac{1.823 \times 10^{-5} \times 1002.5}{0.02479} = 0.737$$

$$\text{Nu}_{\text{air}} = 0.1 \times (0.737 \times 17.92315 \times 10^5)^{1/3}$$

$$\text{Nu}_{\text{air}} = 10.972$$

$$h_{\text{va}} = \frac{\text{Nu}_{\text{air}} \cdot \lambda_{\text{air}}}{D_{\text{ext}}} = \frac{10.972 \times 0.02479}{28 \times 10^{-3}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}} \right]$$

$$h_{\text{cu}} = 9.714 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}} \right]$$

III. 1. 2. 1. 4. 2. Calcul du coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur $h_f [\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$:

Le fluide utilisé étant de l'eau.

température	Conductivité thermique	Viscosité dynamique	Masse volumique	Chaleur spécifique
T	λ	μ	ρ	C_p
$^\circ C$	$[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}]$	$[\frac{Kg}{m \cdot s}]$	$[\frac{Kg}{m^3}]$	$[\frac{J}{Kg \cdot ^\circ C}]$
20	0.598	1.005×10^{-3}	998	4178
100 Liquide	0.682	0.282×10^{-3}	985.1	4216

Tab III. 2. Propriétés d'eau [5].

$$h_f = \frac{Nu_f \cdot \lambda_f}{D_{int}}$$

Considérant la convection forcée du fluide caloporteur dans le tube absorbeur :

$$Re_f = \frac{u_f \cdot D_{int} \cdot \rho_f}{\mu_f} = \frac{\left(\frac{M_f}{\pi \cdot (\frac{D_{int}}{2})^2} \right) \cdot D_{int} \cdot \rho_f}{\mu_f}$$

Avec M_f : Débit volumétrique $[\frac{m^3}{s}]$.

$$M_f = 0.0033 \left[\frac{l}{s} \right]$$

$$M_f = 3 \times 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$Re_f = \frac{4 \cdot M_f \cdot \rho_f}{\pi \cdot D_{int} \cdot \mu_f}$$

$$Re_f = \frac{4 \times 3.3 \times 10^{-6} \cdot 998}{\pi \times 26 \times 10^{-3} \times 1.005 \times 10^{-3}} = 160.47$$

$Re_f < 2400$ on est en régime laminaire.

$$\text{Nu}_f = 1.86 \times (\text{Re}_f \times \text{Pr}_f \times \frac{D_{\text{int}}}{L})^{1/3} \times \left(\frac{\mu_f}{\mu_p}\right)^{0.14} \quad [13].$$

Avec $\mu_p = \mu_f(T_a)$

$$\text{Pr}_f = \frac{\mu_f \cdot \text{Cp}_f}{\lambda_f}$$

$$\text{AN : } \text{Pr}_f = \frac{1.005 \times 10^{-3} \times 4178}{0.598} = 7.02$$

$$\text{Nu}_f = 1.86 \times (160.47 \times 7.02 \times \frac{26 \times 10^{-3}}{1.5})^{1/3} \times \left(\frac{1.005 \times 10^{-3}}{0.282 \times 10^{-3}}\right)^{0.14} = 5.984$$

$$h_f = \frac{5.984 \times 0.598}{26 \times 10^{-3}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}\right]$$

$$h_f = 137.63 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}\right]$$

III. 1. 2. 2. Absorbeur à tube sous vide

Le tube est en verre d'un diamètre extérieur $D_4 = 4.7 \text{ Cm}$, et d'un diamètre intérieur $D_1 = 3.2 \text{ Cm}$, sachant que Le tube est mis sous vide (entre les deux parois) ce qui empêche tout processus de convection.

Les épaisseurs des différentes couches du tube, permettant de déterminer les diamètres utiles à nos calculs :

Enveloppe en verre : 2mm.

Anneau sous vide : 3mm.

$D_2 = 3.7 \text{ Cm}$; $D_3 = 4.3 \text{ Cm}$

La longueur de l'absorbeur $L = 1.5 \text{ m}$

L'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour pouvoir absorber le maximum d'énergie tout en réémettant le minimum.

La figure suivante représente le tube absorbeur :



Fig. III. 2. Tube sous vide [11].

Notre absorbeur est un tube sous vide récupéré d'un chauffe-eau solaire, ce tube n'est ouvert que d'un seul côté et pour les besoins de l'expérience on a effectué quelques modifications sur le tube. On a réalisé un bouchon en téflon ou on a mis deux orifices l'une pour assurer l'entrée de l'eau l'autre pour la sortie comme le montre la figure suivante :

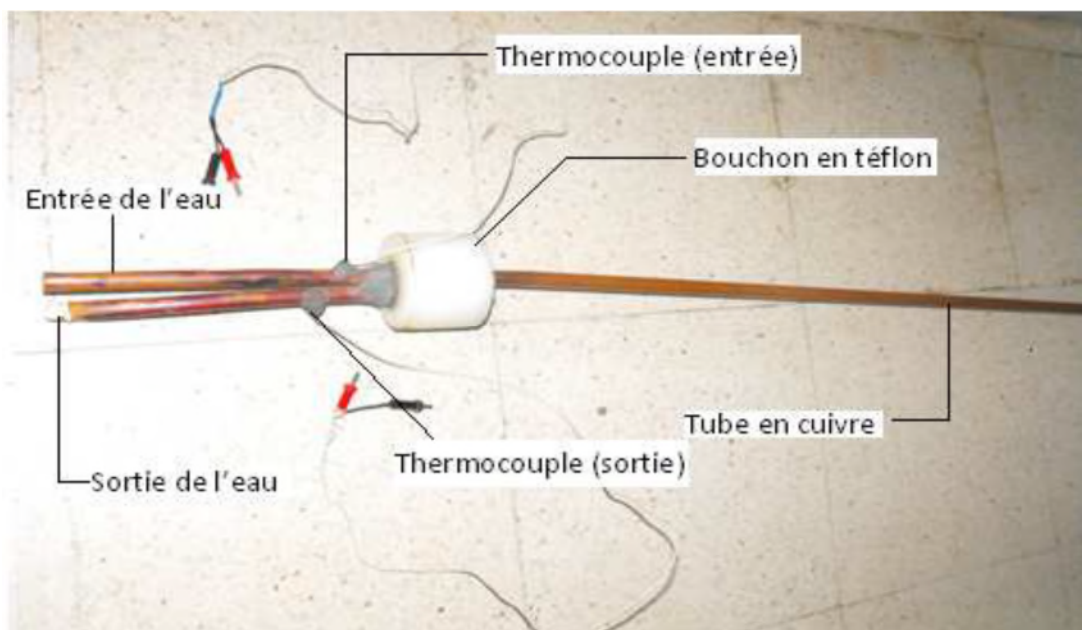


Fig. III. 3. Système de circulation de l'eau

Un tube devient inutile s'il n'est pas totalement hermétique et il faut le changer pour préserver la performance de l'ensemble du capteur.

La vitre reçoit l'énergie solaire, en absorbe ($m_v \cdot C_{p_v} \cdot \frac{dT_v}{dt}$) et en réfléchit $Q_{\text{réfléchit}}$, cependant qu'elle en transmet 92% à l'absorbeur. Celui-ci garde les 95% de cette énergie qui lui a été transmise par la vitre. Cette dernière voit sa température s'élever sous l'effet d'énergie qu'elle a absorbé. Elle rayonne alors vers le ciel et perd également de la chaleur par échange convectif avec le milieu ambiant supposé à la température T_{amb} (température sèche extérieure). L'absorbeur, quant à lui, transmet de la chaleur convective au fluide caloporteur et rayonne vers la vitre [9].

Pour simplifier, on fait l'hypothèse que la chaleur reçue par le tube n'est pas concentrée du côté du collecteur mais uniformément répartie sur toute la circonférence du tube. En effet, le côté orienté vers le cylindre parabolique collecteur reçoit plus de chaleur que l'autre côté, qui ne peut capter que le flux non concentré envoyé par le soleil. Cependant, si la conduction dans le tube est bonne, la chaleur reçue aura tendance à se répartir uniformément [8].

III. 1. 2. 2. 1. Transfert de chaleur entre l'enveloppe de verre et l'environnement

$$m_v \cdot C_{p_v} \cdot \frac{dT_v}{dt} = Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4 \quad (5)$$

Avec :

Q_1 : Quantité d'énergie solaire absorbée par la vitre.

Q_2 : Chaleur échangée par convection et par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre.

Q_3 : Chaleur rayonnée vers le ciel.

Q_4 : Chaleur convective de la vitre vers l'Extérieur.

$$Q_1 = G_n \cdot (\pi \cdot D_v \cdot L) \cdot \eta_{opt} \cdot \alpha_v \cdot C$$

Avec :

G_n : Flux solaire concentré au tube $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.

η_{opt} : Rendement optique.

α_v : L'absorptivité de l'enveloppe de la vitre ($\alpha_v = 0.032$).

C : Taux de concentration

$$C = \frac{S_c}{S_a}$$

S_c : Surface du capteur

S_a : Surface de la vitre extérieure de l'absorbeur.

$$S_a = \pi \cdot D_4 \cdot L$$

$$Q_2 = Q_{conv} + Q_{ray}$$

Remarque:

Le tube est mis sous vide (entre les deux parois).

$$Q_2 = Q_{ray}$$

$$Q_2 = \sigma \cdot (\pi \cdot D_2 \cdot L) \cdot \varepsilon_{ab} \cdot (T_a^4 - T_v^4)$$

D_2 : Diamètre extérieur de l'absorbeur.

L : Longueur de l'absorbeur.

ε_{ab} : Émissivité de l'absorbeur ($\varepsilon_{ab} = \varepsilon_v = 0.86$).

T_v : Température de l'enveloppe du verre.

T_a : Température de l'absorbeur.

Q_3 : Chaleur rayonnée vers le ciel

$$Q_3 = \sigma \cdot (\pi \cdot D_4 \cdot L) \cdot \varepsilon_v \cdot (T_v^4 - T_c^4)$$

Avec :

$$T_c = 0.0552 \times T_{am}^{3/2}$$

ε_v : Émissivité de l'enveloppe du verre ($\varepsilon_v = 0.86$).

Q_4 : Chaleur convective de la vitre vers l'Extérieur

$$Q_4 = h_{va} \cdot (\pi \cdot D_4 \cdot L) \cdot (T_v - T_{am})$$

T_{am} : Température ambiante.

h_{va} Est le coefficient d'échange convectif entre l'enveloppe de verre et l'environnement [$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$].

III. 1. 2. 2. 2. Transfert de chaleur entre l'absorbeur et l'enveloppe de verre

$$m_a \cdot Cp_a \cdot \frac{dT_a}{dt} = Q_5 - Q_2 - Q_6 \quad (6)$$

Avec :

Q_5 : Quantité d'énergie solaire transmise par la vitre à l'absorbeur.

Q_6 : Chaleur convective de l'absorbeur vers le fluide caloporteur.

$$Q_5 = G_n \cdot (\pi \cdot D_4 \cdot L) \cdot \eta_{opt} \cdot \varepsilon_v \cdot \alpha_{coating} \cdot C$$

Avec :

$\alpha_{coating}$: L'absorptivité de la couche absorbante dont est recouvert l'absorbeur

($\alpha_{coating} = 0.92$).

$$Q_6 = h_f \cdot (\pi \cdot D_1 \cdot L) \cdot (T_a - T_f)$$

Avec :

D_1 : Diamètre intérieure de l'absorbeur.

h_f : Coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$.

III. 1. 2. 2. 3. Transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur

$$m_f \cdot Cp_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = Q_6 - Q_7 \quad (7)$$

Avec :

Q_7 : Chaleur emportée par le fluide caloporteur

$$Q_7 = M_f \cdot Cp_f \cdot \rho_f \cdot (T_{fS} - T_{fE})$$

M_f : Débit volumétrique $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.

T_{fS} : Température du fluide caloporteur à la sortie de tube absorbeur.

T_{fE} : Température du fluide caloporteur à l'entrée de tube absorbeur.

III. 1. 2. 2. 4. Bilan global

$$(5) \quad m_v \cdot Cp_v \cdot \frac{dT_v}{dt} = G_n \cdot (\pi \cdot D_4 \cdot L) \cdot \eta_{opt} \cdot \alpha_v \cdot C \\ + \sigma \cdot (\pi \cdot D_2 \cdot L) \cdot \varepsilon_v \cdot (T_a^4 - T_v^4) \\ - \sigma \cdot (\pi \cdot D_4 \cdot L) \cdot \varepsilon_v \cdot (T_v^4 - T_c^4) \\ - h_{va} \cdot (\pi \cdot D_4 \cdot L) \cdot (T_v - T_{am})$$

$$(6) \quad m_a \cdot Cp_a \cdot \frac{dT_a}{dt} = G_n \cdot (\pi \cdot D_4 \cdot L) \cdot \eta_{opt} \cdot \varepsilon_v \cdot \alpha_{coating} \cdot C \\ - \sigma \cdot (\pi \cdot D_2 \cdot L) \cdot \varepsilon_v \cdot (T_a^4 - T_v^4) \\ - h_f \cdot (\pi \cdot D_1 \cdot L) \cdot (T_a - T_f)$$

$$(7) \quad m_f \cdot Cp_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_f \cdot (\pi \cdot D_1 \cdot L) \cdot (T_a - T_f) \\ - M_f \cdot Cp_f \cdot \rho_f \cdot (T_{fs} - T_{fE})$$

$$(4) \quad T_{fs} = \frac{4}{3} \cdot T_f - \frac{1}{3} \cdot T_{fE}$$

Ainsi, connaissant la température d'entrée du caloporteur au capteur et les caractéristiques de ceux-ci, ainsi que la valeur instantanée du rayonnement solaire global, pourra-t-on suivre l'évolution dans le temps des températures T_v , T_a , T_f et T_{fs} [9].

III. 1. 2. 2. 5. Evaluation des coefficients d'échange convectif

III. 1. 2. 2. 5. 1. Calcul du coefficient d'échange convectif entre l'enveloppe de verre et l'environnement $h_{va} [\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$:

D'après le tableau (III.1-) Pour $T=25$ ($^\circ C$) on prend :

$$\lambda_{air} = 0.02497 [\frac{W}{m \cdot ^\circ C}] ; \quad \mu_{air} = 1.823 \times 10^{-5} [\frac{Kg}{m \cdot s}] ; \quad \rho_{air} = 1.176 [\frac{Kg}{m^3}] ;$$

$$Cp_{air} = 1002.5 [\frac{J}{Kg \cdot ^\circ C}] ; \quad D_4 = 47 \times 10^{-3} m$$

$$h_{va} = \frac{Nu_{air} \cdot \lambda_{air}}{D_4}$$

Convection naturelle (vitesse du vent inférieure à 1 m/s) [10].

$$Nu_u = f(Gr, Pr)$$

$$Gr_{air} = \frac{\beta_{air} \cdot g \cdot L^3 \cdot (T_v - T_c)}{v_{air}^2}$$

$$\beta_{air} = \frac{1}{(T_v - T_c)} \text{ pour les gaz parfaits [8].}$$

$$Gr_{air} = \frac{2 \cdot g \cdot L^3 \cdot \rho_{air}^2}{\mu_{air}^2}$$

Pour un vent perpendiculaire à la surface du tube, on adopte $L = D_4$

$$AN : Gr_{air} = \frac{2 \times 9.81 \times (47 \times 10^{-3})^3 \times 1.176^2}{(1.823 \times 10^{-5})^2} = 8.4768 \times 10^6$$

$Gr_{air} = 8.4768 \times 10^6 < 10^9$ D'où l'écoulement est laminaire.

$$Nu_{air} = 0.1 Ra_{air}^{1/3} \text{ [8].}$$

Le nombre de Rayleigh : $Ra_{air} = Gr_{air} \cdot Pr_{air}$

Le nombre de Rayleigh caractérise l'écoulement en convection naturelle.

$$Pr_{air} = \frac{\mu_{air} \cdot Cp_{air}}{\lambda_{air}} = \frac{1.823 \times 10^{-5} \times 1002.5}{0.02479} = 0.737$$

$$Nu_{air} = 0.1 \times (0.737 \times 8.4768 \times 10^6)^{1/3}$$

$$Nu_{air} = 18.418$$

$$h_{va} = \frac{Nu_{air} \cdot \lambda_{air}}{D_4} = \frac{18.418 \times 0.02479}{47 \times 10^{-3}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

$$h_{va} = 9.71 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

III. 1. 2. 2. 5. 2. Calcul du coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur $h_f[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$:

$$h_f = \frac{Nu_f \cdot \lambda_f}{D_1}$$

Considérant la convection forcée du fluide caloporteur dans le tube absorbeur :

$$Re_f = \frac{u_f \cdot D_1 \cdot \rho_f}{\mu_f} = \frac{\left(\frac{M_f}{\pi \cdot \left(\frac{D_1}{2}\right)^2}\right) \cdot D_1 \cdot \rho_f}{\mu_f}$$

Avec M_f : Débit volumétrique $[\frac{m^3}{s}]$.

$$M_f = 0.0033 \left[\frac{l}{s}\right]$$

$$M_f = 3.3 \times 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

$$Re_f = \frac{4 \cdot M_f \cdot \rho_f}{\pi \cdot D_1 \cdot \mu_f}$$

$$Re_f = \frac{4 \times 3.3 \times 10^{-6} \cdot 998}{\pi \times 32 \times 10^{-3} \times 1.005 \times 10^{-3}} = 130.38$$

$Re_f < 2400$ on est en régime laminaire.

$$Nu_f = 1.86 \times \left(Re_f \times Pr_f \times \frac{D_1}{L}\right)^{1/3} \times \left(\frac{\mu_f}{\mu_p}\right)^{0.14} \quad [13].$$

Avec $\mu_p = \mu_f(T_a)$

$$Pr_f = \frac{\mu_f \cdot Cp_f}{\lambda_f}$$

$$AN : \quad Pr_f = \frac{1.005 \times 10^{-3} \times 4178}{0.598} = 7.02$$

$$Nu_f = 1.86 \times \left(130.38 \times 7.02 \times \frac{32 \times 10^{-3}}{1.5}\right)^{1/3} \times \left(\frac{1.005 \times 10^{-3}}{0.282 \times 10^{-3}}\right)^{0.14} = 5.984$$

$$h_{f1} = \frac{5.984 \times 0.598}{32 \times 10^{-3}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$$

$$h_{f1} = 111.825 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$$

III. 2. Etude expérimental

III. 2. 1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire une étude expérimentale sur notre concentrateur où nous entamerons trois essais, deux essais avec un capteur à tube sous vide et le dernier avec un simple tube en cuivre recouverte d'une peinture noire. Et cela durant les jours 10, 11 et 12 juin 2013.

Le réflecteur du capteur est dimensionné de façon à concentrer les rayons solaires vers sa ligne focale dont l'absorbeur est placé, le réflecteur étant en acier inoxydable.

Les erreurs de dimensionnement se traduisent par la diminution du rendement de ce dernier, de plus le matériau utilisé doit avoir un bon coefficient de réflectivité pour les rayonnements solaires.

Dans le premier essai nous gardons le réflecteur comme il est, par contre dans les deux autres essais qui suivent on le recouvre avec du papier en aluminium.

Les mesures des températures se feront à l'aide des thermocouples à affichage numérique. Le relevé de la température se fait toutes les 15 minutes.

Le placement du réservoir d'eau froide à une hauteur suffisante nous a permis d'utiliser la gravitation pour faire circuler le fluide caloporteur dans le tube absorbeur, Le problème rencontré est la variation du débit étudié, car la diminution du volume d'eau dans le réservoir entraîne la diminution du débit, qui se traduit par l'augmentation de la température du fluide.

Pour opter à garder le débit constant on ouvre le robinet légèrement pour permettre le rétablissement du débit, mais la meilleure solution est d'utiliser un régulateur de débit.

Pour la mesure du débit on fait remplir une bouteille d'eau de $5 \cdot 10^{-3} [m^3]$ et d'après le temps écoulé on déduit le débit utilisé.

III. 2. 2. Description de l'expérience

III. 2. 2. 1. Essai avec tube sous vide

Cet essai consiste à mesurer la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du tube absorbeur en gardant le débit volumique de l'eau constant au maximum, sachant que l'absorbeur est un tube sous vide.

Dans une première étape le réflecteur est exposé directement au soleil, par contre dans la seconde on le recouvre avec du papier en aluminium.

III. 2. 2. 2. Essai avec un simple tube en cuivre

Cet essai consiste à mesurer la température de l'eau comme précédemment mais avec l'utilisation d'un simple tube en cuivre comme absorbeur de chaleur, avec réflecteur recouvert d'un papier en aluminium. De même le tube absorbeur en cuivre est recouvert d'une couche mince de peinture noire, et cela pour augmenter l'absorptivité du tube.

III. 2. 3. Expérience

III. 2. 3. 1. Essai avec tube sous vide

III. 2. 3. 1. 1. Essai avec réflecteur non recouverte du papier aluminium

Cet essai a été réalisé le 10 juin 2013, avec un débit $M_f = 0.0033 \left[\frac{l}{s} \right]$ qui est équivalent à $0.2 \left[\frac{l}{mn} \right]$.

Les températures relevées sont représentées dans le tableau suivant :

Heure	T_e	T_s	T_{amb}
09h :35	27	38	27
09h :50	26.7	35	26.9
10h :05	27.6	37.9	27.1
10h :20	26.8	39	26
10h :35	30.2	38.2	27.4
10h :50	30.5	37.8	28.2
11h :05	30	34.4	29.2
11h :20	29.3	37	29.7
11h :35	29.4	32.8	29.7
11h :50	29.8	37.8	30.2
12h :05	30	36.4	31.6
12h :20	31	35.3	29.9
12h :35	31.9	37.6	29.6
12h :50	31.5	38.9	28.5
13h :05	31.9	39	29
13h :20	32.1	43	30
13h :35	32	42.3	30.3
13h :50	33	44.5	29.1
14h :05	33.7	45.5	30
14h :20	34.6	46.6	30.5
14h :35	33.8	42.9	31.2
14h :50	33.5	40.7	31.1
15h :05	33.6	40.7	31
15h :20	33.2	40	31
15h :35	33.5	40.5	30.5
15h :50	32.3	40.2	30.4
16h :05	33.3	41	30
16h :20	33.6	35.7	29.3

Tab. III. 3. Relevés de températures du 10/06/2013.

Au début de la journée jusqu'à 13h05 le climat est partiellement recouvert des nuages, La température du fluide a la sortie balance entre les deux valeurs de température 32.8 °C et 39°C. On suite le climat est devenu claire, d'où l'augmentation de la température a une valeur maximal 46.6°C, après cette dernière elle chute jusqu'à 35.7°C à la fin de l'essai. Ceci est dû à l'affaiblissement de l'ensoleillement.

Afin de faire une petite comparaison on a modélisé le système d'équations obtenu à l'aide des relations de transfert de chaleur, dont le bloc réalisé est le suivant :

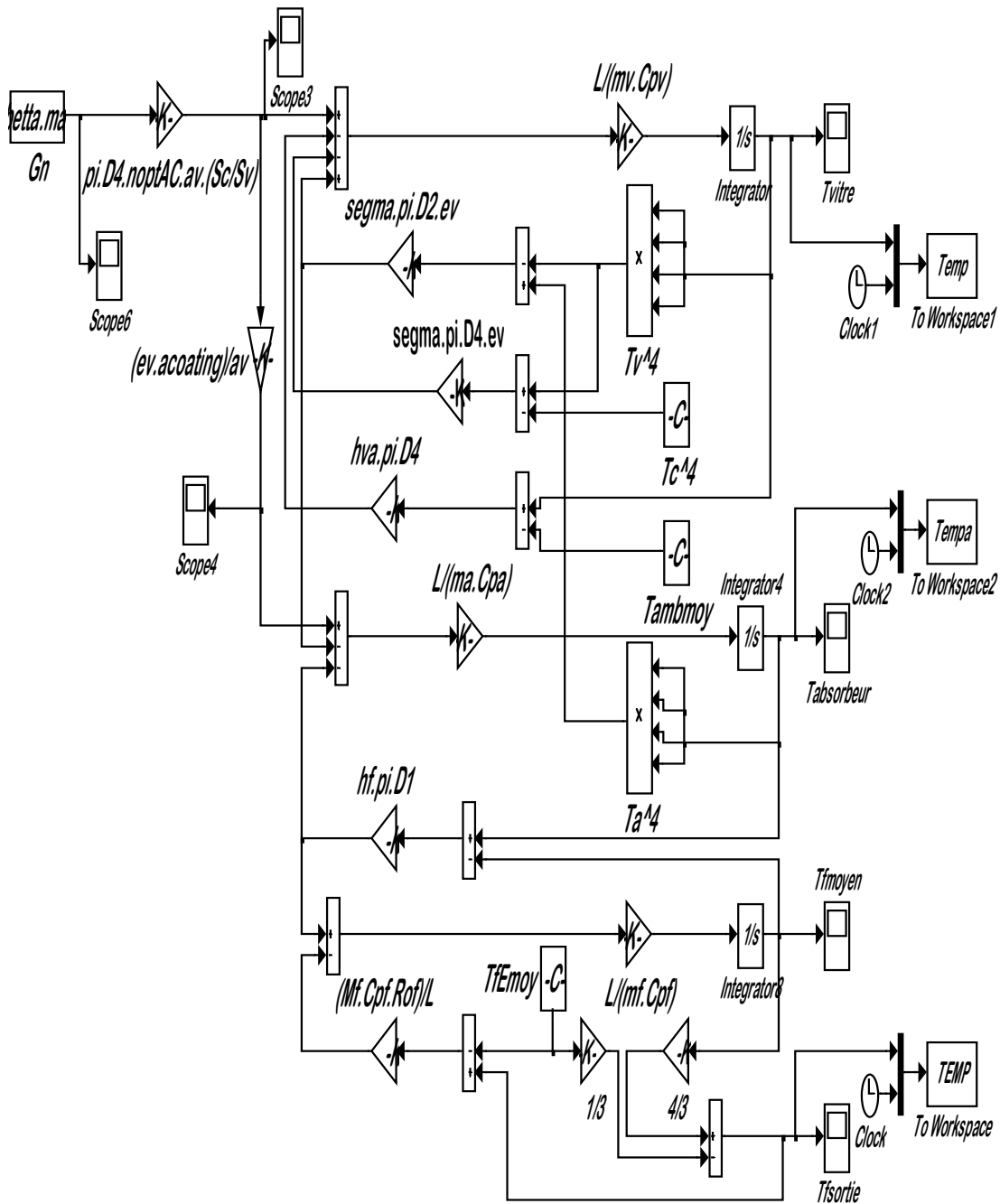


Fig. III. 4. Bloc de l'absorbeur à tube sous vide.

Comme données on a besoin du rayonnement journalière, qu'on a obtenu à l'aide d'un appareil de mesure «pyrhéliomètre», les autres paramètres sont introduits directement dans le bloc.

On a sauvegardé les valeurs de ses paramètres dans un fichier de données qu'on fait appel lors de l'exécution des données.

Dans ce premier essai on a fait un programme pour simuler tous les éléments du tube absorbeur

Les températures obtenues sont représentées par la figure ci-dessous :

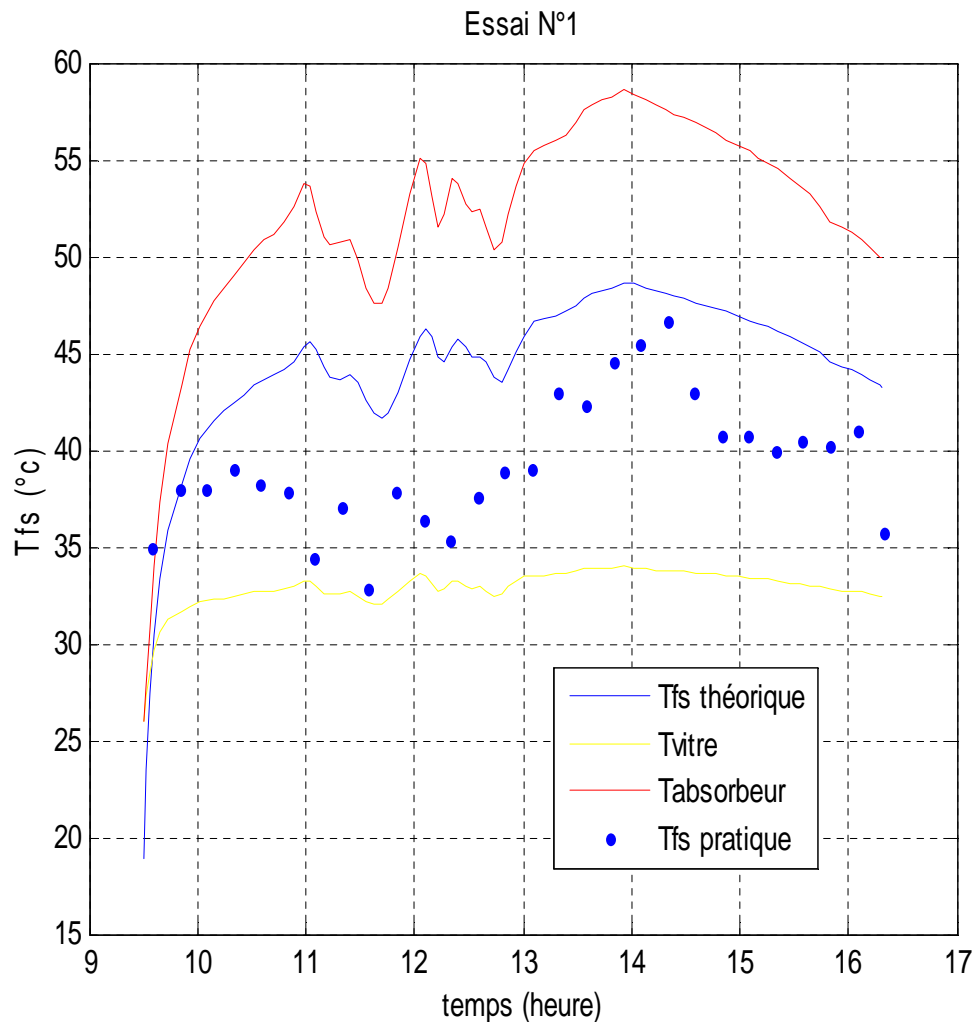


Fig. III. 5. Variation de température en fonction du temps.

Chaque point bleu dans cette figure correspond à une température réelle de fluide caloporteur à la sortie de tube absorbeur mesurée à l'aide d'un thermocouple à affichage numérique, la durée qui sépare deux points consécutifs est de quinze minutes.

Le graphique continu en bleu représente le résultat théorique de la température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur obtenu à l'aide du bloc réalisé, ce bloc représente les différents échanges thermiques que subissent le tube absorbeur, étant donné que l'absorbeur est un tube sous vide.

On voit bien que les deux résultats obtenus sont presque semblables ce qui est dû au fait que la modélisation du prototype a été bien réalisée.

D'après les mesures pratiques de la température à la sortie du tube absorbeur et par comparaison de ressemblance des deux graphes on peut estimer le rendement optique du concentrateur utilisé, dans ce cas avec réflecteur non couvert avec du papier aluminium la valeur la plus proche est de 14%.

Le rendement optique du concentrateur est très faible, ce qui est dû au matériau utilisé pour la construction de ce dernier, sachant que le matériau est de l'acier inoxydable. Donc il faut mieux utiliser par exemple le verre pauvre en fer qui a un coefficient de réflectivité très grand.

D'autre part les erreurs géométriques de fabrication vont contribuer à faire diminuer encore plus le rendement optique.

III. 2. 3. 1. 2. Essai avec réflecteur recouvert d'un papier en aluminium

Cet essai a été réalisé le 11 juin 2013, avec un débit volumique $M_f = 0.0033 \left[\frac{l}{s} \right]$ qui est équivalent à $0.2 \left[\frac{l}{mn} \right]$.

Dans la pratique il est très difficile de garder le débit constant sans l'utilisation d'un régulateur du débit, même on peut dire que c'est impossible de le garder constant sans l'utilisation d'une boucle de régulation.

La diminution du débit entraînera l'augmentation de la température du fluide caloporteur, donc pour rapprocher la comparaison des résultats (pratique / théorique) il faut prendre des débits égaux.

Les températures relevées sont représentées dans le tableau suivant :

Heure	T_e	T_s	T_{amb}
09h :50	26.5	32.2	23.6
10h :05	28.3	38	25.8
10h :20	28.1	39.3	26.5
10h :35	28.7	40.6	26.7
10h :50	29.2	43.8	27
11h :05	29.6	45.5	26.9
11h :20	30.1	47.2	27
11h :35	30.8	48.1	27
11h :50	30.5	49	26.9
12h :05	31.1	48.7	27.2
12h :20	31.6	49.5	27.4
12h :35	31.2	46.5	27.3
12h :50	31.9	46.1	27.4
13h :05	32	45.6	27.3
13h :20	29	43.4	27.4
13h :35	27.1	39.2	27.4
13h :50	27.6	40	27.4
14h :05	28	40.8	27.8
14h :20	29.2	41.2	27
14h :35	29	40.8	27.9
14h :50	29	37.1	28.4
15h :05	28.8	37.7	28.2
15h :20	29.8	37	28.3
15h :35	30.1	37.6	28
15h : 50	30.6	37	29
16h :05	31.1	36.7	28.8
16h :20	30.4	38.4	31.5

Tab. III. 4. Relevés de températures du 11/06/2013.

Pendant toute la journée le ciel a été bien claire, donc l'ensoleillement était aussi meilleure que possible. Mais malheureusement la vitesse du vent est remarquable ce qui a engendré plus de perte de chaleur entre l'absorbeur et le milieu ambiant.

La température de sortie de l'eau a passé de 32.2°C à 49°C et cela pendant deux heures, La valeur crête atteinte est 49.5 vers 12h :45 puis elle se décroît progressivement jusqu'à 36.7°C à 16h :05.

On voit bien qu'après cette dernière la température croît légèrement, et peut être cela est dû à la température ambiante.

D'après les résultats obtenus par ces deux essais, on voit que le réflecteur doit être réalisé avec un matériau qui possède un bon coefficient de réflexion du rayonnement solaire.

Pour cette essai le bloc est le même que le précédent, donc on a qu'à faire changer quelques données.

La simulation se fait à l'aide du fichier de données dont sont introduites les valeurs du rayonnement journalière (voire annexe).

Les températures d'entrée et de sortie en fonction du temps sont représentées par la figure ci-dessous

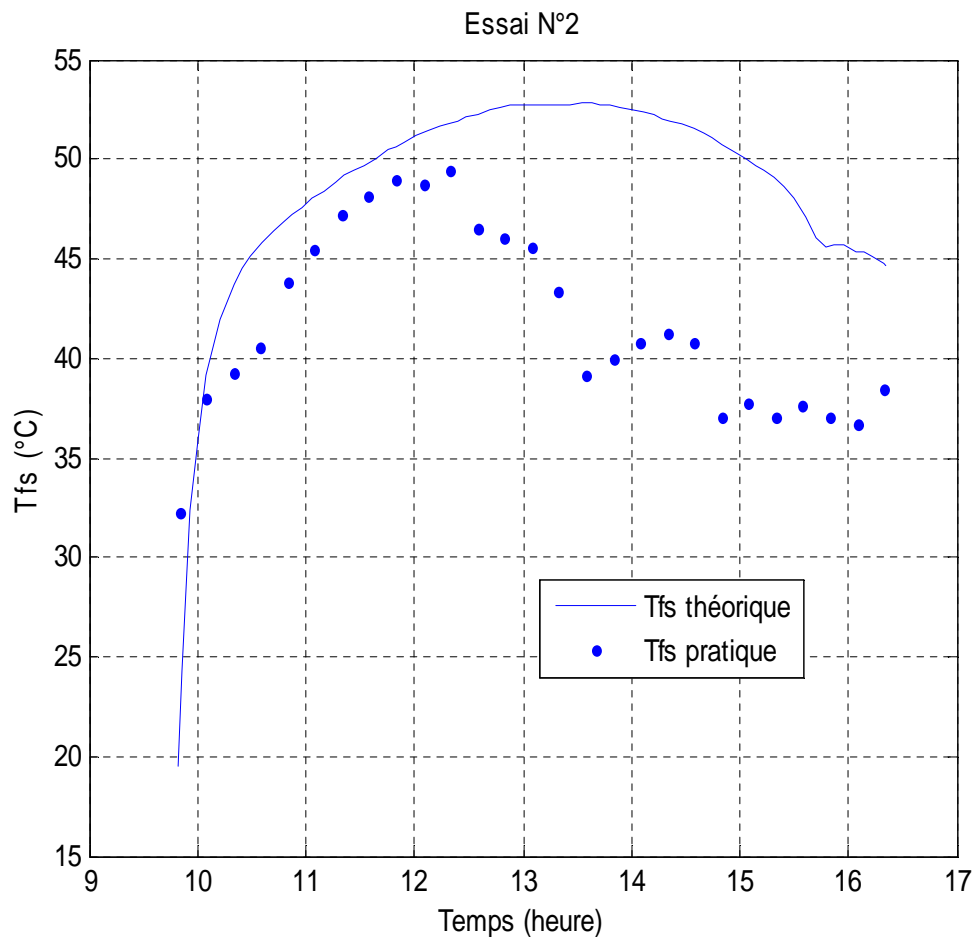


Fig. III. 6. Variation de température en fonction du temps.

Dans ce deuxième essai on garde le même tube absorbeur, et pour augmenter un peu le rendement optique du concentrateur on recouvre ce dernier avec du papier en aluminium.

D'après les mesures de température obtenu, et pour rapprocher au maximum les résultats (pratique/théorique) on a donné la valeur de 19% au rendement optique.

Donc l'utilisation du papier aluminium a contribué l'augmentation du rayonnement solaire concentré vers le tube absorbeur.

III. 2. 3. 2. Essai avec un simple tube en cuivre

Cet essai a été réalisé le 12 juin 2013, avec un réflecteur recouvert d'un papier en aluminium, dont le débit volumique $M_f = 0.0033[\frac{l}{s}]$ qui est équivalent à $0.2[\frac{l}{mn}]$.

Les températures relevées sont représentées dans le tableau suivant :

Heure	T_e	T_s	T_{amb}
09h :35	29	34.5	25
09h :50	29.6	37.9	27.3
10h :05	30.2	35.7	29.4
10h :20	29.1	36.9	29.2
10h :35	30.1	38	29
10h :50	32.2	40.1	28.9
11h :05	32	40.9	29.4
11h :20	31.6	39.2	28.8
11h :35	31.6	39.9	29
11h :50	32.2	40	29
12h :05	32	39	28
12h :20	31.6	38.4	29.3
12h :35	31.8	38.6	29.5
12h :50	32.4	39	29.8
13h :05	32.5	38.8	29.7
13h :20	31	39.1	30.1
13h :35	31.2	41	30.3
13h :50	32	40.2	30.7
14h :05	31.6	40.6	31.1
14h :20	31	38.2	31
14h :35	31.8	37.6	30.9
14h :50	30.5	36.7	31.5
15h :05	30.8	37	30.7
15h :20	30.8	37.5	30
15h :35	31.2	37	30.7
15h : 50	32.1	36.1	31.6
16h :05	31.1	35.6	28.8
16h :20	31.4	37.4	32.9

Tab. III. 5. Relevés de températures du 12/06/2013.

Cet essai a été effectué dans une journée caractérisée par un climat clair, l'absorbeur utilisé étant du cuivre recouvert d'une couche mince de peinture noire, ce type d'absorbeur a trop de pertes vers le milieu ambiant, l'utilisation d'un tube réalisant un effet de serre est nécessaire pour minimiser ces pertes.

Les valeurs obtenues pendant cet essai sont faible à cause des caractéristiques médiocres de l'absorbeur utilisé, en tenant compte aussi du rendement de capteur, la température maximale est de 41°C mesuré à 13h :35, donc il est claire que le double vitrage est mieux adapté pour les capteurs solaire.

Le bloc réalisé est le suivant :

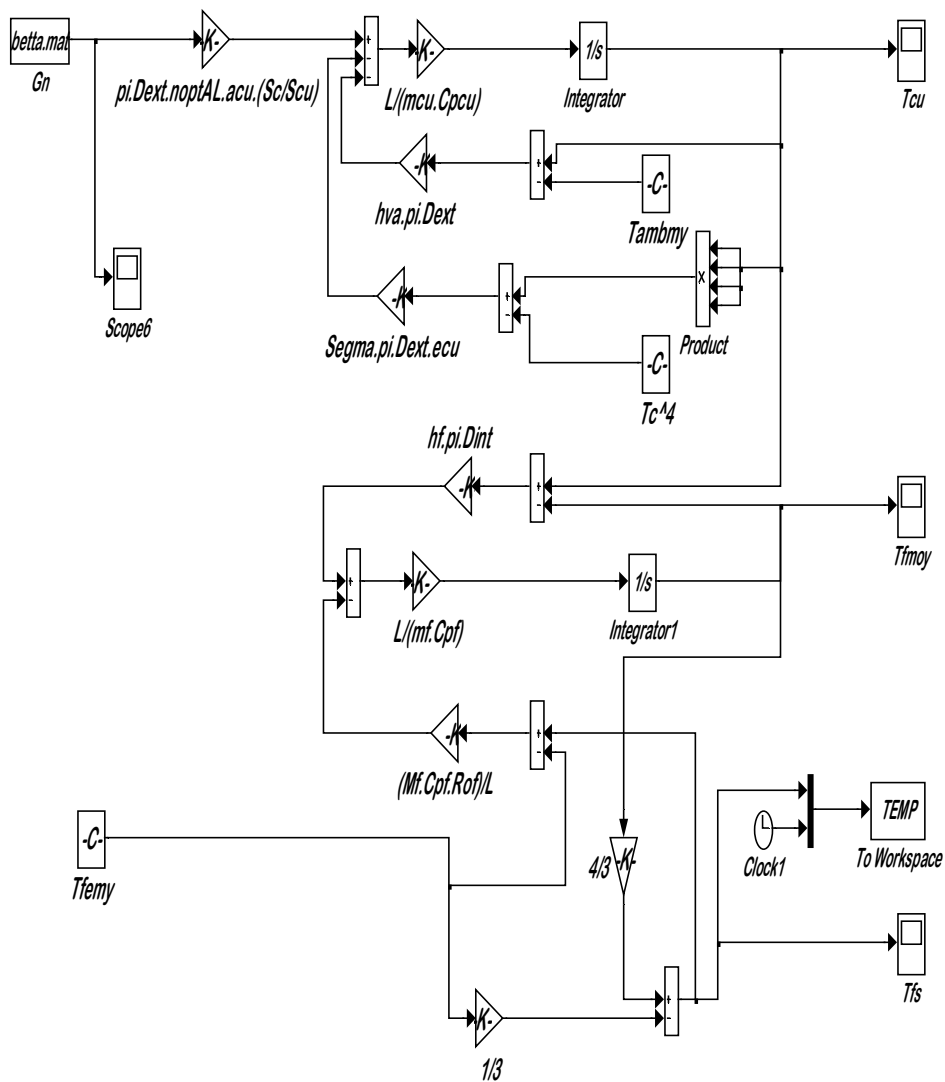


Fig. III. 7. Bloc du tube en cuivre.

Les températures d'entrée et de sortie en fonction du temps sont représentées par la figure ci-dessous

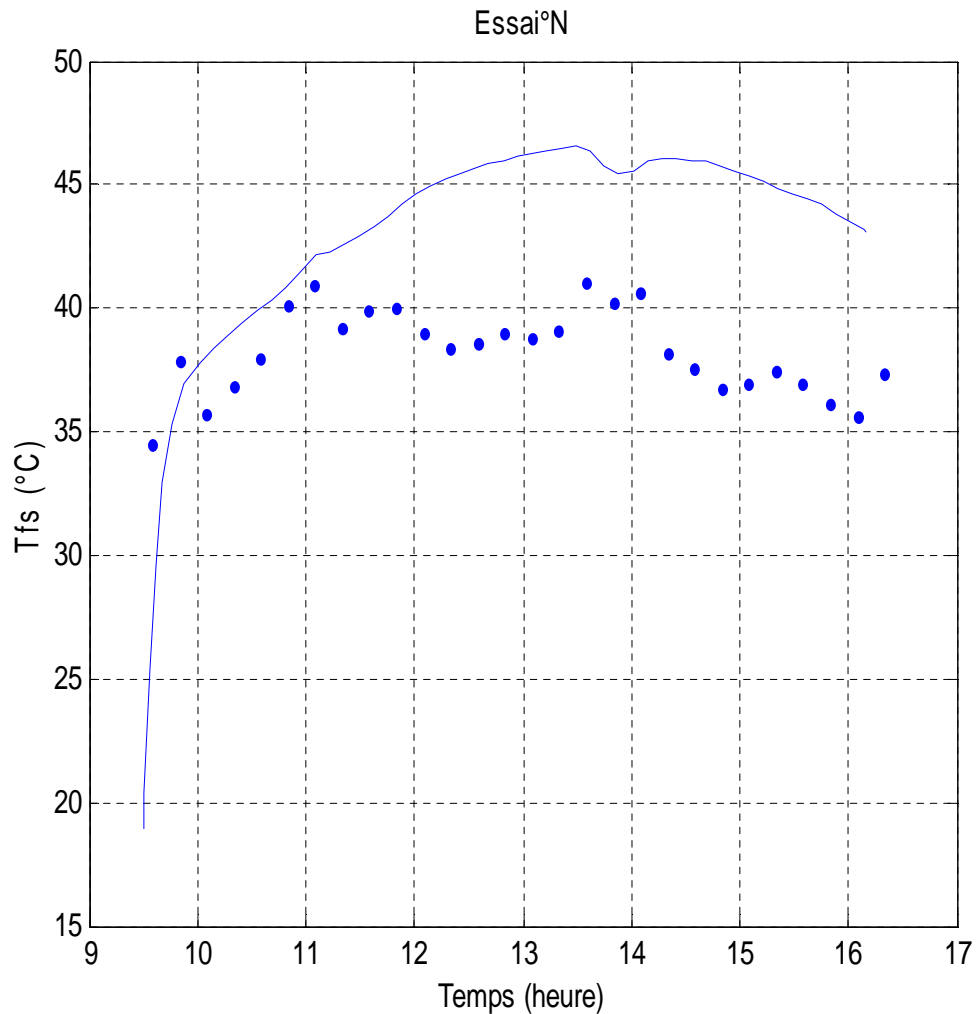


Fig. III. 8. *Variation de température en fonction du temps.*

Dans ce troisième et dernier essai on a gardé le réflecteur du concentrateur couvert par le papier aluminium et on a remplacé l'absorbeur à tube sous vide par un simple tube en cuivre couverte par une mince couche d'une peinture noire et cela pour augmenter l'absorptivité de ce dernier.

Les températures mesurées du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur sont très faible car les pertes thermiques avec le milieu environnant sont importantes, donc la réalisation d'un effet de serre joue un rôle pour réduire les pertes thermique.

D'autre part le deuxième bloc réalisé à bien traduit les échanges thermiques du tube absorbeur.

La connaissance des caractéristiques des matériaux permet de bien développer les performances d'un tel système de conversion d'énergie, donc le bon choix du matériau fait partie de l'amélioration des performances.

III. 3. Conclusion

La technologie du concentrateur cylindro-parabolique est la plus économique et la plus robuste même si les frais initiaux sont très élevés, le solaire s'avère moins cher à long terme que les autres centrale puisque le combustible d'une centrale solaire est gratuit et inépuisable.

Nous nous sommes proposé dans ce travail de faire l'étude thermique de l'absorbeur d'un concentrateur solaire thermodynamique, le concentrateur ayant une ouverture de $2.25m^2$.

Après une étude bibliographique sur le sujet et l'analyse de la documentation, des équipements à utiliser, nous avons effectué l'étude thermique des absorbeurs utilisées.

Après l'élaboration du bilan énergétique de l'absorbeur, nous avons procédé aux essais pratiques sur deux types d'absorbeur le premier à double vitrage, et le seconde est un simple tube en cuivre recouvert d'une couche mince du peinture noire. Et ceci pour un débit constant.

Les résultats de températures obtenues à la sortie de l'absorbeur sont un peut médiocre à cause du rendement du capteur utilisé qui à était réalisé avec réflecteur en acier inoxydable, sachant que le meilleur matériau pour un réflecteur étant du verre pauvre en fer.

L'orientation du concentrateur au rayonnement a était faite automatiquement avec un système de poursuite solaire.

Nous avons montré que la température de sortie de l'eau dépend de plusieurs facteurs dans les plus importants sont la variation de l'éclairement solaire, la géométrie et le matériau constituant le réflecteur, la nature et les dimensions de l'absorbeur et les qualités optiques de sa surface réfléchissante.

Les résultats obtenus dans cette étude peuvent être mieux développé, et cela avec l'utilisation d'un concentrateur bien dimensionné de sorte que les pertes du rayonnement vont être réduit au minimum.

Première essai

Le fichier de données est le suivant :

```
temps=[0 480 960 1440 1920 2400 2880 3360 3840 4320 4800 5280 5760 6240 6720 7200  
7680 8160 8640 9120 9600 10080 10560 11040 11520 12000 12480 12960 13440 13920  
14400 14880 15360 15840 16320 16800 17280 17760 18240 18720 19200 19680 20160  
20640 21120 21600 22080 22560 23040 23520 24000 24480]
```

```
Gn=[500 539 510 592 614 626 660 695 717 721 782 874 592 672 733 520 520 709 872 964  
524 964 658 775 556 850 918 876 884 893 969 955 959 981 940 927 915 906 894 876 864  
848 833 818 794 770 751 695 704 690 655 626]
```

```
c = [temps; Gn]
```

```
save betta c
```

```
sim('HamzaAC')
```

```
x = TEMP(:,2)
```

```
y = TEMP(:,1)
```

```
t=9.5+(x*(2/15))/480
```

```
plot(t,y)
```

```
grid
```

```
X = Temp(:,2)
```

```
Y = Temp(:,1)
```

```
te=9.5+(X*(2/15))/480
```

```
hold on
```

```
plot(te, Y, 'y')
```

```
grid
```

```
m = Tempa(:,2)
```

```
n = Tempa(:,1)
```

```
ta=9.5+(m*(2/15))/480
```

```
plot(ta, n, 'r')
```

```
hold on
```

```
grid
```



```
temper = [35 38 37.9 39 38.2 37.8 34.4 37 32.8 37.8 36.4 35.3 37.6 38.9 39 43 42.3 44.5  
45.5 46.6 42.9 40.7 40.7 40 40.5 40.2 41 35.7]  
tr = [9.58 9.83 10.08 10.33 10.58 10.83 11.08 11.33 11.58 11.83 12.08 12.33 12.58 12.83  
13.08 13.33 13.58 13.83 14.08 14.33 14.58 14.83 15.08 15.33 15.58 15.83 16.08 16.33]  
hold on  
plot(tr, temper, 'o')
```

Deuxième essai

Le fichier de données est le suivant :

```
temps=[0 480 960 1440 1920 2400 2880 3360 3840 4320 4800 5280 5760 6240 6720 7200  
7680 8160 8640 9120 9600 10080 10560 11040 11520 12000 12480 12960 13440 13920  
14400 14880 15360 15840 16320 16800 17280 17760 18240 18720 19200 19680 20160  
20640 21120 21600 22080 22560 23040 23520]  
Gn=[558 587 612 632 658 685 707 728 755 774 796 814 828 847 862 881 893 898 908 925  
930 935 947 937 940 944 938 944 945 937 930 923 915 903 896 882 864 847 823 804 789  
763 724 655 590 683 624 639 605 575]  
c = [temps; Gn]  
save betta c  
sim('HamzaAL')  
x = TEMP(:,2)  
y = TEMP(:,1)  
t=9.82+(x*(2/15))/480  
plot(t,y)  
grid  
tem = [32.2 38 39.3 40.6 43.8 45.5 47.2 48.1 49 48.7 49.5 46.5 46.1 45.6 43.4 39.2 40 40.8  
41.2 40.8 37.1 37.7 37 37.6 37 36.7 38.4]  
tr = [9.83 10.08 10.33 10.58 10.83 11.08 11.33 11.58 11.83 12.08 12.33 12.58 12.83 13.08  
13.33 13.58 13.83 14.08 14.33 14.58 14.83 15.08 15.33 15.58 15.83 16.08 16.33]  
hold on  
plot(tr, tem, 'o')
```

Troisième essai

Le fichier de données est le suivant :

```
temps=[0 480 960 1440 1920 2400 2880 3360 3840 4320 4800 5280 5760 6240 6720 7200  
7680 8160 8640 9120 9600 10080 10560 11040 11520 12000 12480 12960 13440 13920  
14400 14880 15360 15840 16320 16800 17280 17760 18240 18720 19200 19680 20160  
20640 21120 21600 22080 22560 23040 23520 24000]
```

```
Gn=[303 333 366 398 428 462 491 524 554 580 604 692 656 683 707 728 757 797 814 836  
852 865 877 887 898 908 916 923 928 935 938 864 850 864 899 911 903 896 891 882 865  
853 840 823 813 794 782 762 733 719 694]
```

```
c = [temps; Gn]
```

```
save betta c
```

```
sim('HamzaALC')
```

```
x = TEMP(:,2)
```

```
y = TEMP(:,1)
```

```
t=9.5+(x*(2/15))/480
```

```
plot(t,y)
```

```
grid
```

```
temper = [34.5 37.9 35.7 36.9 38 40.1 40.9 39.2 39.9 40 39 38.4 38.6 39 38.8 39.1 41 40.2  
40.6 38.2 37.6 36.7 37 37.5 37 36.1 35.6 37.4]
```

```
tr = [9.58 9.83 10.08 10.33 10.58 10.83 11.08 11.33 11.58 11.83 12.08 12.33 12.58 12.83  
13.08 13.33 13.58 13.83 14.08 14.33 14.58 14.83 15.08 15.33 15.58 15.83 16.08 16.33]
```

```
hold on
```

```
plot(tr, temper, '.')
```

Figure du concentrateur utilisé



Référence bibliographiques

- [1]. ZEGHIB Ilhem, «Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire parabolique», Mémoire, Université Mentouri –Constantine, 2005.
- [2]. José Miguel Navarro, «Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible», Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Le 23 octobre 2008.
- [3]. ABBASSEN Lyes, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque»,
Mémoire de Magister, Université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou , Le 05 Mai 2011.
- [4]. HELALI Kamelia, «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative», Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou , Le 25 juin 2012.
- [5]. J. Brau, «Convection», INSA de Lyon
- [6]. Guillaume ANIES, «Modélisation, simulation dynamique, validation expérimentale et optimisation énergétique d'une unité de rafraîchissement solaire par absorption», Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Le 28 Novembre 2011.
- [7]. Abdelkarim BOURAS, «Etude et conception d'un convertisseur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire», Mémoire de Magistère en Physique, Université Mentouri de Constantine 2007.
- [8]. DUMONT Olivier et MÉLOTTE Nicolas, «Etude de concentrateur solaire pour le projet de microcentrale», Projet «PEYRESQ», Université de Liège 2010/2011.
- [9]. Demba NDIAYE, «Modélisation d'un système solaire avec capteur a tube sous vide», Projet de fin d'étude, École polytechnique de Thies, Sénégal, Juillet 1996.
- [10]. Nadia Nadir, «Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire»,
, Mémoire de Magistère, Université Kasdi Merbah Ouargla.

- [11]. Salima KARROUTE, «Etude théorique et numérique des couples : Distillateur Plan-Capteur et Distillateur Hot Box-Capteur», Diplôme de Magister en Physique, Université Mentouri de Constantine 2009.
- [12]. BERCHIDE Abdeslam, «Etude et expérimentation d'un chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur», Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 6 juillet 2011.
- [13]. KHELIFA Abdelkrim, «Etude numérique et modélisation d'un capteur solaire hybride PV /V», Magister en physique, Université El – haj Lakhdar - Batna, 2011.
- [14]. Quoilin Sylvain, «Les Centrales Solaires à Concentration», Université de Liège Faculté des sciences appliquées, Mai 2007.
- [15]. GAMMA Omar, «Etude et Réalisation d'un banc d'essai Hybride photovoltaïque thermodynamique», Mémoire de magister, Ecole nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi , El-Harrach, 2008.
- [16]. KADRAOUI Hicham, «Etude comparative et rendement énergétique des différents degrés de concentration des convertisseurs thermodynamique de l'énergie solaire», Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2011.

Résumé

Le travail effectué porte sur une étude thermique et expérimentale de conversion d'énergie solaire en énergie thermique en utilisant un concentrateur cylindro-parabolique. L'orientation du concentrateur au rayonnement a été faite automatiquement avec un système de poursuite solaire. Le prototype utilisé pour effectuer les tests comporte essentiellement :

Un réflecteur solaire qui est une tôle inoxydable sous forme d'une parabole cylindrique qui est l'élément essentiel du concentrateur cylindro-parabolique, et deux tubes absorbeurs pour effectuer les essais le premier est un tube sous vide de longueur de 1,5 m et le deuxième est un simple tube en cuivre qui constituera le foyer au niveau duquel se concentreront les rayons du soleil. Après l'élaboration du bilan énergétique de l'absorbeur, nous avons procédé à la réalisation d'un bloc (SIMULINK) qui traduit le système d'équation obtenue afin de visualiser les différentes températures du tube absorbeur. Ensuite nous avons effectué des tests et ceci pour faire une comparaison avec les résultats théoriques pour des débits constants.