

N° Ordre...../ F.H.C / U.M.B.B / 2014

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDÈS



FACULTÉ DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE
DÉPARTEMENT TRANSPORT ET ÉQUIPEMENTS DES HYDROCARBURES
LABORATOIRE GÉNIE PHYSIQUE DES HYDROCARBURES

Mémoire de Magister

Présenté par

M. MESSOUAF Samir

FILIÈRE : TRANSPORT ET ÉQUIPEMENTS DES HYDROCARBURES
OPTION : MÉCANIQUE DES FLUIDES ET TRANSFERT DE CHALEUR

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE LA PRODUCTION D'EAU CHAUDE DOMESTIQUE PAR L'ÉNERGIE SOLAIRE À L'AIDE DE RÉFLECTEUR CYLINDROPARABOLIQUE

Devant le jury :

M. KESSAL	Mohand	Professeur U.M.B Boumerdès	Président
M. MAKHLOUF	Saïd	Professeur U.M.M Tizi-Ouzou	xamineur
M. HEDIBEL	Mohamed	MC / A U.M.B Boumerdès	Examineur
M. AISSANI	Slimane	Professeur U.M.B Boumerdès	Rapporteur

Année universitaire : 2013/2014

REMERCIEMENTS

On laisse toujours le plus difficile pour la fin, remercier tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire sans oublier personne n'est pas facile...

Je remercie vivement Monsieur AISSANI Slimane, mon promoteur de mémoire, son initiateur et propulseur de m'avoir accueilli dans son équipe pour réaliser ce mémoire. Pendant ces trois années j'ai beaucoup appris à ces côtes, consolider les connaissances acquises.

Je remercie également mon professeur Mr HEDIBAL Mohamed, pour sa contribution pendant la réalisation de ce mémoire. J'ai beaucoup apprécié travailler avec lui. Je tiens aussi à le remercier par sa disponibilité et son soutien.

Je souhaite aussi remercier Monsieur KESSAL Mohand, professeur à l'université M'hamed Bougara de Boumerdès pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

Je remercie Monsieur HEDIBEL Mohamed, maître de conférences à l'université M'hamed Bougara de Boumerdès en acceptant de faire parti de ce jury.

Merci à Monsieur MAKHLOUF Saïd, maître de conférences à l'université Mammeri mouloud Tizi-Ouzou d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Comme je remercie ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de cette formation, aussi Pr KESSAL Mohand, Pr AISSANI Slimane, Pr ZERAIBI Noureddine, Pr BENNACER Rachid, Dr MERZOUG Mouloud, ...

Je remercie mes chers parents, mon frère, mes sœurs, et toute ma famille qui ont toujours été présents et m'ont toujours soutenu.

De tout mon cœur : merci !

Samir MESSOUAF

DÉDICACE

Au nom de l'amour qui j'éprouve à chacune des personnes qui m'entourent et qui m'ont toujours solidement soutenu le long de ce long parcours.

À ma Mère,

À mon Père,

À mon frère, mes sœurs surtout ma petite sœur HANA,

À mon grand père,

À toute ma famille,

À tous mes collègues et mes amis partout,

À tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité,

À tous ceux qui m'ont aimé, m'aiment et m'aimeront pour moi même,

Je dédie ce modeste travail.

Samir MESSOUAF

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I. LES DIFFERENTS MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR

I. 1

Conduction.....	5
I.1.1 Loi de Fourier	5
I.1.2 Résistance thermique	6
I.1.3 Equation générale de la chaleur	6
I.2 Convection	7
I.2.1 Nombres sans dimension	7
I.2.1.1 Nombre de Prandtl	7
I.2.1.2 Nombre de Nusselt	8
I.2.1.3 Nombre de Grashof	8
I.2.1.4 Nombre de Rayleigh	8
I.2.1.5 Nombre de Reynolds	9
I.2.2 Flux de chaleur en convection forcée	9
I.2.3 Le flux de chaleur en convection naturelle	10
I.3 Transfert de chaleur par rayonnement	10
I.3.1 L'émission (L'émittance) totale	10
I.3.2 Le corps noir	11
I.3.3 Loi du rayonnement thermique	11
I.3.3.1 Loi de Planck : émittance monochromatique du corps noir	11
I.3.3.2 Loi de Stefan Boltzmann	11

I.3.4 Transfert par rayonnement entre surface	12
I.3.5 Réception du rayonnement par un solide	12

CHAPITRE II. GISEMENT SOLAIRE

II.1 Introduction	15
II.2 Le rayonnement solaire	15
II.2.1 Généralités sur le soleil	15
II.2.2. Constante solaire	17
II.2.3 Translation et rotation de la terre	18
II.2.4 Le spectre solaire	19
II.2.5 Rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère	20
II.3 La position du soleil	21
II.3.1 Les coordonnées géographiques terrestres	21
II.3.2 Déclinaison δ	22
II.3.3 L'équation du temps <i>ET</i>	23
II.3.4 Le temps solaire vrai et l'angle horaire du soleil	24
II.3.5 Durée du jour	26
II.3.6 Hauteur angulaire du soleil <i>h</i>	26
II.3.7 Azimut du soleil <i>a</i>	26
II.3.8 Décalage horaires	28
II.3.9 Fuseau horaire	28
II.4 Eclairage d'un récepteur plan	29
II.4.1 Eclairage global	30
II.4.2 Rayonnement diffus	30
II.4.3 Instrument de mesure d'éclairage	31
II.4.3.1 Mesures effectuées par un Pyranomètre	31
II.4.3.2 Pyrhéliomètre et rayonnement Direct	33
II.4.4 L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire	35
II.4.5 Energie reçue par une surface horizontale située à l'extérieur de l'atmosphère	35
II.5 Estimation de l'éclairage solaire	36
II.5.1 Définition	36

II.5.2 La variation de l'éclairement solaire direct normal selon les conditions climatiques	36
II.5.3 Masse d'air	37
II.5.4 Trouble atmosphérique	37
II.6 Estimation solaire instantanée	38
II.6.1 Calcul le rayonnement solaire Direct normal	38
II.6.2 Calcul le rayonnement solaire diffus	39
II.6.3 Calcul lu rayonnement solaire global	40
II.7 Conclusion	42

CHAPITRE III. CAPTEURS SOLAIRES

III.1 Capteurs solaires	44
III.1.1 Principe	44
III.1.2 Différents types de capteurs solaires	44
III.1.2.1 Capteurs plans à liquide sans vitrage	44
III.1.2.2 Capteurs plans à liquide avec vitrage	45
III.1.2.3 - Capteurs solaires à tubes sous vide	45
III.1.2.4 Capteur solaire à concentration	45
III.1.3 Le schéma de principe d'un capteur solaire plan simple vitrage	47

CHAPITRE IV. LES CONCENTRATEURS SOLAIRES

IV.1 Introduction	49
IV.2 Principes	49
IV.2.1 Lois de Descartes relatives à la réflexion	49
IV.2.2 Stigmatisme	50
IV.2.3 Définition de la concentration	50
IV.2.3.1 Concentration idéale (Gauss)	50
IV.2.3.2. Concentration géométrique	51
IV.2.3.3. Concentration optique	51
IV.3 Description le principe d'un concentrateur	51
IV.4 Formules de calcul des différentes concentrations	52
IV.5 L'importance de la concentration solaire	53
IV.6 Etudes générales de quelques différents concentrateurs	55
IV. 6.1 Paraboloïde	55

IV.6.1.1 Propriétés	55
IV.6.1.2 Concentration idéale	55
IV.6.1.3 Concentration géométrique	56
IV.6.1.4 Concentration optique	58
IV.6.2 Cylindroparabolique	58
IV.6.2.1 Propriétés	58
IV.6.2.2 Concentration idéale	58
IV.6.2.3 Concentration géométrique	59
IV.6.2.4 Concentration optique	59
IV.6.2.5 Montage	60
V.6.3 Centrale à tour	60
IV.6.3.1 Description de système	60
IV.6.3.2 Le rendement thermique	61
IV.7 Conclusion	63

CHAPITRE V. ETUDE THEORIQUE DU CONCENTRATEUR CYLINDRO PARABOLIQUE

V.1 Introduction	65
V.2 Les collecteurs thermiques	65
V.2.1 Captation sans concentration : capteurs plans	65
V.2.2 Captation avec concentration : capteurs à concentrations	65
V.2.2.1 Concentrateurs cylindroparaboliques	66
V.2.2.2 Concentrateur parabolique	66
V.2.2.3 Système de centrale à tour (héliostat)	67
V.2.3 Quelques avantages de la concentration	67
V.3 Etude théorique du concentrateur cylindroparabolique	67
V.3.1 La géométrie parabolique	67
V.3.1.1 Définition	67
V.3.1.2 Angle d'ouverture d'une parabole	68
V.3.1.3 Taille d'une parabole	69
V.3.1.4 Surface d'une parabole	69
V.3.1.5 Longueur d'une parabole	69
V.3.2 Système optique d'une surface parabolique	70

V.3.3 Les composants d'un concentrateur solaire cylindroparabolique	70
V.3.3.1 Réflecteur cylindroparabolique	70
V.3.3.2 - Récepteur (absorbeur)	72
V.3.4 Dimensions du réflecteur	73
V.3.5 Dimensions de tube récepteur	73
V.4- La concentration	76
V.4.1 Concentration géométrique	76
V.4.2 Concentration optique	76

CHAPITRE VI BILAN ENERGETIQUE

VI.1 Introduction	78
VI.2 Absorbeur/Récepteur	78
VI.3 Surface sélective	79
VI.4 L'équation d'équilibre thermique	79
VI.5 Les pertes du concentrateur cylindroparabolique	80
VI.5.1 Les pertes optiques	80
VI.5.1.1 Le facteur de réflectivité ρ	80
VI.5.1.2 Le facteur d'interception γ	80
VI.5.1.3 Le facteur de transmission τ	81
VI.5.1.4 Absorptivité α	81
VI.5.2 Les pertes géométriques	81
VI.5.3 Les pertes thermiques.....	83
VI.5.3.1 Les pertes par conduction	83
VI.5.3.2 Pertes par convection	83
VI.5.3.3 Pertes par rayonnement	84
VI.6 Expression de la température de l'absorbeur	85
VI.7 Expression de l'évolution de la température du fluide dans le tube	86
VI.8 Efficacité de concentrateur cylindroparabolique	87
VI.8.1 Efficacité globale	87
VI.8.2 Efficacité optique	87
VI.8.3 Efficacité thermique	88
VI.9 Résolution du système d'équation	89
IV.10 Température de stagnation	89

CHAPITRE VII. REALISATION DU CONCENTRATEUR ET EXPERIENCES

VII.1 Introduction	92
VII.2 Description générale du montage réalisé	92
VII.2.1 Conception du concentrateur	92
VII.2.2 Liste des matériels utilisés	94
VII.2.3 Description des différentes parties du prototype	95
VII.2.3 1. Le réflecteur	95
VII.2.3 2. L'absorbeur	95
VII.3 Les expériences	97
VII.3.1 Installation du concentrateur	97
VII.3.2 Réglage du concentrateur	97
VII.3.3 Les emplacements de thermocouples	97
VII.3.4 Les éléments du concentrateur et leurs propriétés	99
VII.3.5 Les mesures	100
VII.4 Les problèmes rencontrés	101

CHAPITRE VIII. RESULTATS ET DISCUSSION

VIII.1 Evolution des flux et les puissances	103
VIII.1.1 Comparaison entre l'éclairement théorique et mesuré	103
VIII.1.2 Evolution des différents éclaircissements théorique le long de la durée de l'expérience	104
VIII.1.3 Évolution des puissances journalières	105
VIII.1.4 Variations de flux mesuré et de flux utile absorbé par le récepteur	106
VIII.2 Evolution des températures	106
VIII.2.1 Variations des différentes températures au cours de l'expérience	106
VIII.2.2 Variation des différentes températures de sortie T_s et d'entrée T_e de l'eau	108
VIII.2.3 Variation des températures de sortie expérimentale et théorique	109
VIII.2.4 Variation des températures de sortie T_s et de l'absorbeur T_{Abs}	110
VIII.2.5 Évolution de la température de Sortie T_s en fonction de la température d'absorbeur T_{Abs}	
VIII.2.6 Évolution théorique de température de sortie T_s en fonction de la longueur de l'absorbeur	
VIII.2.7 Variation de la différence de température T_s-T_e en fonction du flux reçu	113
VIII.3 Évolution des pertes	114
VIII.3.1 Évolution de la perte globale, perte optique et thermiques	114

VIII.3.2 Évolution des pertes thermiques	115
VIII.4 Evolution du rendement	116
VIII.4.1 Efficacité thermique et optique du concentrateur	116
VIII.4.2 Efficacité thermique et optique du concentrateur	117
VIII.5 Evolution de coefficient d'échange en fonction de la longueur de l'absorbeur	118
VIII.6 Conclusion	118
ETUDE TECHNO-ECONOMIQUE	120
CONCLUSION GENERALE	124
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	
ANNEXES	
RESUMES	

NOMENCLATURE

LETTRES LATINES

A	surface	[m ²]
A _{ref}	Surface du réflecteur sphérique	[m ²]
A _{abs}	Surface d'absorbeur	[m ²]
A _f	Facteur géométrique	
a	Azimut	[degré]
C _f	Chaleur massique de l'eau	[J/(kg.°K)]
C _{abs}	Chaleur massique de l'absorbeur	[J/(kg.°K)]
C _p	Capacité calorifique à pression constante	[J/(kg.°K)]
C _g	Concentration géométrique	
C _o	Concentration optique (énergétique)	
C _G	Concentration idéale (Gauss)	
d _{Terre}	Diamètre de la terre	[m]
d _{Soleil}	Diamètre de soleil	[m]
D	Diamètre du récepteur	[m]
E _λ	Emission ou Emittance monochromatique	[W/m ² /μm-1]
E	Emittance	[W/m ²]
ET	Equation du temps	[minute]
ER	Epaisseur optique de Rayleigh	
f	La distance focale de concentrateur	[m]
f _m	La distance focale,	[m]
g	accélération de la pesanteur	[m/s ²]
H	Hauteur angulaire solaire	[degré]
h	Coefficient d'échange de chaleur	[W/(m.°K)]
h _{cond}	Coefficient d'échange de chaleur par conduction	[W/(m.°K)]
h _{conv}	Coefficient d'échange de chaleur par convection	[W/(m.°K)]
h _{ray}	Coefficient d'échange de chaleur par rayonnement	[W/(m.°K)]

I_{sc}	Constante solaire	[W/m ²]
I_{DN}	Eclairement solaire direct	[W/m ²]
I_o	Energie solaire reçue par une surface horizontale	[J/m ²]
I	Rayonnement solaire extraterrestre	[W/m ²]
$K(\varphi)$	L'angle incidence modifié,	[rad]
L	Longueur du collecteur,	[m]
l_a	la largeur de la parabole,	[m]
\dot{m}	Débit massique	[kg/s]
n	Numéro du jour	
P	Source de chaleur	[W/m ²]
P_{vs}	Pression de la vapeur saturante	[Pa]
P_v	Pression partielle de vapeur d'eau	[Pa]
P_{atm}	Pression atmosphérique à l'altitude z	[Pa]
\dot{Q}_{util}	L'énergie utile transmise au récepteur	[W/m ²]
\dot{Q}_{abs}	L'énergie optique reçue par l'absorbeur	[W/m ²]
\dot{Q}_{ref}	L'énergie solaire reçue par le réflecteur	[W/m ²]
T_{abs}	Température d'absorbeur	[°C]
T_{amb}	Température ambiante	[°C]
T_{ciel}	Température du ciel	[°C]
T_e	Température d'entrée	[°C]
T_s	Température de sortie	[°C]
T_p	Température de surface solide	[°C]
T_{∞}	Température du fluide loin de la surface solide	[°C]
TSV	Temps solaire vrai	[heure]
TSM	Temps solaire moyen	[heure]
TU	Temps universel	[heure]
U_{glob}	Coefficient global des pertes de chaleur	[W/(m.°K)]
V	Vitesse du vent	[m/s]
T_L	Facteur de trouble de Linke	

NOMBRES ADIMENSIONNELS

Re	Nombre de Reynolds
Nu	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandtl

LETTRES GRECQUES

Φ	Flux de chaleur	[W]
a	Diffusivité thermique	[m ² /s]
μ	viscosité dynamique du fluide	[kg/(m.s)]
ν	viscosité cinématique	[m ² /s]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
λ	Latitudes	[degré]

\emptyset	Longitude	[degré]
δ	Déclinaison	[degré]
ω	Angle horaire	[degré]
ω_l	Angle horaire du levé du soleil	[degré]
ω_c	Angle horaire du couché du soleil	[degré]
α_{abs}	Facteur d'absorption de l'absorbeur	
ν_{air}	Viscosité cinématique de l'air	[m ² /s]
ε_{abs}	Facteur émissivité de l'absorbeur.	
τ_{abs}	Facteur de transmission de l'absorbeur.	
ρ_{ref}	Facteur Réflexion de surface de réflecteur (miroir)	
λ_{air}	Conductivité thermique de l'air	[W/(m ² .°K)]
λ_f	Conductivité thermique de l'eau	[W/(m ² .°K)]
β	Coefficient de dilatation du fluide	[k ⁻¹]
σ	Constante Stefan-Boltzmann.	
ρ	Facteur de réflectivité du miroir.	
γ	Facteur de l'interception.	
θ	Angle d'incidence du rayonnement solaire.	
ρ_f	Masse volumique de l'eau	
φ	Angle d'ouverture du miroir	[degré]
Γ	Rapport de captation	
η_{ch}	Rendement de la chaudière	[%]
η_c	Rendement de Carnot	[%]
η_{opt}	Rendement optique	[%]
η_{glob}	Rendement global,	
$\eta_{\text{opt},0^\circ}$	Rendement optique max à angle d'incidence 0°	
η_{th}	Rendement thermique	[%]
ε	Diamètre apparent du soleil (32')	[rad]

INDICES & EXPOSANT

G	Gauss (idéal)
g	Géométrie
o	Optique (énergétique)
abs	Absorbeur
pert	Pertes
util	Utile
DN	Direct normal
Ref	Réflecteur
opt	Optique
cond	Conduction
conv	Convection
ray	Rayonnement
amb	Ambiante

glob Global
f Fluide (eau)

LISTE DES FIGURES

FIGURE I.1:	Echange de chaleur par conduction.....	5
FIGURE I.2:	Résistance thermique	6
FIGURE I.3 :	Transfert de chaleur par convection	7
FIGURE I.4 :	Transfert de chaleur par rayonnement	12
FIGURE I.5 :	Réception du rayonnement	13
FIGURE II.1:	La structure du soleil.....	16
FIGURE II.2:	La divergence de l'énergie du soleil vers la terre	17
FIGURE II.3 :	Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil	19
FIGURE II.4:	Spectre du soleil à la limite de l'atmosphère terrestre.....	19
FIGURE II.5 :	Variation annuelle du rayonnement solaire extraterrestre dans un plan perpendiculaire aux rayons.....	20
FIGURE II.6:	Variations annuelles de l'irradiation quotidienne d'une surface réceptrice horizontale située hors atmosphère avec différentes latitudes	21
FIGURE II.7:	Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné	22
FIGURE II.8:	Variation annuelle de la déclinaison solaire	23
FIGURE II.9:	Variations annuelles de l'équation du temps	24
FIGURE II.10:	L'angle horaire et la déclinaison	24
FIGURE II.11:	Variation journalière de l'angle horaire	25
FIGURE II.12:	Angles solaires.....	26
FIGURE II.13:	Représentation de la déclinaison et de l'azimut et la déclinaison	27
FIGURE II.14:	Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich	28
FIGURE II.15:	Inclinaison et orientation d'une surface réceptrice	29
FIGURE II.16:	Représentation dans le plan azimutale des coordonnées (a , h) du soleil dans	

	le cas d'un capteur situé dans l'hémisphère nord	30
FIGURE II.17:	Diagramme solaire	31
FIGURE II.18 :	Mesure du rayonnement global G	32
FIGURE II.19:	Mesure du rayonnement diffus D	33
FIGURE II.20 :	Une incidence normale de Pyrhéliomètre (NIP) utilisé pour mesurer la composante du rayonnement solaire direct	34
FIGURE II.21:	Variation de l'énergie extraterrestre reçue par une surface horizontale	35
FIGURE II.22:	Valeurs du rayonnement direct I_{DN} en fonction de la hauteur du soleil pour conditions moyennes et extrêmes de trouble.....	37
FIGURE II.23 :	La variation de l'éclairement direct au cours de la journée du 22/12/04 à Latitude de 36°78 longitude de 3,03 sur un plan horizontal.....	40
FIGURE II.24:	La variation de l'éclairement direct perpendiculaire à la surface au cours de la journée du 22/12/04 à latitude de 36,78, longitude de 3,03	41
FIGURE II.25:	La variation de l'éclairement direct au cours de la journée du 22/06/04 à Latitude de 36,78, longitude de 3,03 sur un plan horizontal	41
FIGURE II.26:	La variation de l'éclairement direct perpendiculaire a la surface au cours de la journée du 22/06/04 à latitude de 36,78, longitude de 3,03	42
FIGURE III.1:	Capteurs solaires à tubes sous vide	45
FIGURE III.2:	Capteur solaire à concentration	46
FIGURE III.3:	Le schéma de principe d'un capteur solaire plan	47
FIGURE IV.1:	Réflexion d'un rayon lumineux	50
FIGURE IV.2:	Stigmatisme	50
FIGURE IV.3:	Schéma d'un capteur solaire à concentration	51
FIGURE IV.4 :	Coupe d'un paraboloïde de révolution	55
FIGURE IV.5 :	Le diamètre apparent du soleil est $\varepsilon = 32'$	56
FIGURE IV.6 :	Coupe d'un paraboloïde de révolution montrant les projections dans le plan focal de l'image du soleil	57
FIGURE IV.7:	Image de Gauss d'un miroir Paraboloïde	57
FIGURE IV.8 :	Capteur Cyllindroparabolique	58
FIGURE IV.9:	Coupe méridienne d'un demi Concentrateur Cyllindroparabolique	59
FIGURE IV.10:	Montage d'un capteur cyllindroparabolique,-(à gauche)-suivant le monde, -(à droite)-suivant la direction Est-Ouest	60
FIGURE IV.11:	Schéma de principe d'une centrale à tour	61
FIGURE IV.12 :	Température de l'absorbeur (chaudière)	62
FIGURE V.1:	Capteur plan	65
FIGURE V.2 :	Concentrateur cyllindroparabolique	66
FIGURE V.3:	Concentrateur parabolique	66
FIGURE V.4 :	système de centrale à tour	67
FIGURE V.5 :	Propriétés géométriques de la parabole	67
FIGURE V.6:	Section d'une parabole possédant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture d	68

FIGURE V.7:	Distance focale en fonction de l'angle d'ouverture d'une parabole $d = 1\text{m}$	
FIGURE V.8:	Système optique d'une surface parabolique	70
FIGURE V.9:	Définition du plan de courbure	71
FIGURE V.10:	Les caractéristiques du miroir cylindroparabolique	71
FIGURE V.11:	Catégories des récepteurs	72
FIGURE V.12:	Concentrateur solaire cylindroparabolique	73
FIGURE V.13:	Les différents paramètres de récepteur cylindroparabolique	74
FIGURE V.14:	Coupe méridienne d'un demi-Concentrateur Cylindroparabolique	75
FIGURE V.15:	La largeur de l'image focale en fonction d'angle d'ouverture de la parabole 1m	75
FIGURE VI.1:	Les différents types d'absorbeur	79
FIGURE VI.2:	Les paramètres optiques du concentrateur cylindroparabolique	81
FIGURE VI.3:	Les pertes géométriques d'un concentrateur cylindroparabolique	82
FIGURE VI.4:	Les échanges thermiques sur l'absorbeur	85
FIGURE VI.5:	Évaluation des pertes d'un capteur concentrateur en fonction de la température	88
FIGURE VII.1:	Le support en acier	93
FIGURE VII.2:	La structure porteuse miroir, la partie relative	93
FIGURE VII.3:	La tôle miroir concentrateur	93
FIGURE VII.4:	L'absorbeur	96
FIGURE VII.5:	Le concentrateur parabolique	96
FIGURE VII.6:	La tache solaire sur l'absorbeur	97
FIGURE VII.7:	Les endroits des thermocouples sur le montage	98
FIGURE VII.8:	Les emplacements des thermocouples	98
FIGURE VII.9:	Vue générale du prototype du concentrateur parabolique avant le début de l'expérience	99
FIGURE VII.10:	Les plus grandes températures atteintes dans l'expérience	101
FIGURE VIII.1 :	L'éclairement solaire direct Lieu de mesure: Boumerdès, Latitude:36,73...	103
FIGURE VIII.2 :	Variation des différents flux durant la journée de l'expérience	104
FIGURE VIII.3 :	Variations des différentes puissances en fonction des heures de la journée	105
FIGURE VIII.4 :	Variations de flux mesuré et de flux utile absorbé par le récepteur	106
FIGURE VIII.5 :	Variations de différentes températures au cours de l'expérience	107
FIGURE VIII.6 :	Variations des différentes températures de sortie et d'entrée	108
FIGURE VIII.7 :	Variations des températures de sortie expérimentale et théorique.	109
FIGURE VIII.8 :	Variations de température d'absorbeur durant l'expérience	110
FIGURE VIII.9 :	Variations de la température sortie T_s en fonction de la température T_{Abs}	111
FIGURE VIII.10:	Évolution de la température T_s en fonction de la longueur de l'absorbeur	112
FIGURE VIII.11:	Variation de la différence de température $T_s - T_e$ en fonction du flux reçu	113
FIGURE VIII.12:	Variation de la différence de la température $T_s - T_e$ pour différents débits	114
FIGURE VIII.13:	Variations des pertes thermiques	115

FIGURE VIII.14:	Évolution d'efficacité thermique et optique du concentrateur	116
FIGURE VIII.15:	Évolution d'efficacité thermique et optique en fonction de l'angle d'incidence	
FIGURE VIII.16:	Évolution de coefficient d'échange en fonction de la longueur de l'absorbeur	

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU VI.1: Les transferts de chaleur au niveau de l'absorbeur	90
TABLEAU VII.1: Les matériels utilisés	94
TABLEAU VII.2: Spécifications du réflecteur	95
TABLEAU VII.3: Spécifications de l'absorbeur	95
TABLEAU VII.4 : Les éléments du concentrateur et leurs propriétés	99
TABLEAU VII.5: Boumerdès:21/06/2012,Orientation du concentrateur:Est-Ouest Débit = 0,01 kg/s	

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A

- A.1 Tableau des résultats de calcul des flux théoriques:
- A.2 Tableau des résultats de calcul des puissances:
- A.3 Tableau des résultats de calcul des rendements:

ANNEXE B

- FIGURE B.1 : L'énergie solaire annuelle en kWh/m²/an
- FIGURE B.2 Répartition du cumul annuel du rayonnement global reçu au sol.
- B.1 Les propriétés physiques de l'eau et de l'air :
- B.2 Corrélations entre 0 et 100 °C

ANNEXE C

- C.1 Nombre de Nusselt
- C.2 Nombre de Prandtl
- C.3 Nombre de Reynolds :

ANNEXE D

D.1 Quelques photographies requises de la manipulation

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Selon des études faites par certains instituts de recherche, la consommation en énergie des pays en voie de développement va connaître une augmentation très importante, surtout après la mondialisation du commerce et des échanges entre les états.

D'une part l'augmentation brutale du prix du pétrole et la demande croissante de l'énergie et les catastrophes des centrales nucléaires de Tchernobyl, et du Japon ont beaucoup stimulé la recherche et le développement de nouvelles sources d'énergies renouvelables et particulièrement solaires. D'autre part, le réchauffement climatique causé par l'émission des gaz à effet de serre a conduit beaucoup de pays à s'intéresser aux énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables constituent une source d'énergie gratuite et inépuisable pour l'homme. Elles sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

L'énergie solaire est l'énergie que dispense le soleil par son rayonnement, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère. Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et du vent. Le règne végétal, dont dépend le règne animal, l'utilise également en la transformant en énergie chimique via la photosynthèse. A l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice, l'énergie solaire est à l'origine de toutes les énergies sur Terre.

L'Algérie s'intéresse à l'énergie solaire grâce à ses deux atouts naturels: l'espace avec 2.381.741 km² de surface et les heures d'ensoleillements qui dépasse les 2000 heures/an, pouvant atteindre les 3900 heures/an sur les hauts-plateaux et le sahara ; ce que ne possèdent pas beaucoup les pays qui se sont lancés dans l'exploitation des énergies renouvelables. Pour autant, notre pays n'a pas tiré profit de ces avantages, la part de l'énergie solaire dans le bilan énergétique est très faible. Dans la production d'électricité, elle est quasiment nulle, contrairement à d'autres pays de la région.

La conversion photothermique de l'énergie solaire au niveau de l'absorbeur/récepteur peut constituer un apport d'énergie non négligeable pour un grand nombre d'applications thermiques, thermomécaniques et thermochimiques à condition que des rendements de conversion élevés puissent être atteints dans une gamme de températures relativement étendue.

Il existe quatre catégories d'applications classées en fonction du degré de températures sollicitées [1] :

- 1- Applications aux basses températures ($T < 60^{\circ}\text{C}$) : chauffage de l'eau sanitaire.
- 2- Applications aux moyennes températures ($60^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$) : chauffage des habitations, climatisation, dessalement de l'eau de mer, production d'énergie mécanique.
- 3- Applications aux hautes températures ($150^{\circ}\text{C} < T < 800^{\circ}\text{C}$) : production d'énergie mécanique, production de vapeur, dissociation de l'eau.
- 4- Applications aux très hautes températures ($T > 800^{\circ}\text{C}$) : dissociation thermique de l'eau, magnétohydrodynamique, thermo électricité).

2

Les miroirs cylindroparaboliques présentent un certain nombre d'avantages dans la réalisation de concentrateurs du rayonnement solaire, et notamment dans un large domaine de la conversion photothermique. Ils présentent un des moyens pour résoudre les problèmes posés par la faible densité énergétique du rayonnement solaire incident.

Dans cette étude, on s'intéresse particulièrement à un nouveau type de système, le chauffe eau solaire cylindroparabolique, dans le but d'améliorer son rendement thermique, d'élargir son domaine d'utilisation et de satisfaire les critères de réduction de son coût afin de donner au chauffe-eau solaire, un prix abordable pour le foyer algérien tout en garantissant un niveau de performance acceptable.

On a étudié l'influence des différents paramètres intervenant dans cette réalisation : les dimensions de miroir réflecteur, le positionnement sur la structure, effets de l'orientation et la position. Des calculs théoriques ont été faits et les résultats trouvés sont présentés, analysés et commentés, pour les températures moyennes après conversion du rayonnement solaire en chaleur.

Notre travail porte essentiellement sur une étude et réalisation expérimentale pour la production de l'eau chaude domestique par l'énergie solaire à l'aide de concentrateur cylindroparabolique.

Cette étude comporte les chapitres suivants :

Le premier chapitre : est consacré aux différents modes de transfert de chaleur.

Le deuxième chapitre: porte sur le gisement solaire.

Le troisième chapitre : porte sur une étude des capteurs solaires thermiques.

Le quatrième chapitre: porte sur une étude bibliographique des concentrateurs solaires, leurs diversités, leurs caractéristiques optiques et énergétiques.

Le cinquième chapitre: traite l'étude théorique du concentrateur cylindroparabolique.

Le sixième chapitre: consiste à étudier le bilan énergétique au niveau du récepteur/absorbeur ainsi que la résolution des équations correspondantes.

Le septième chapitre : est consacré à la réalisation concrète du concentrateur, à l'expérimentation et aux mesures.

Le huitième chapitre : Interprétation des résultats.

La partie annexe comprend notamment, les tableaux des résultats de calculs, les propriétés thermophysiques de l'eau et de l'air, les nombres adimensionnels, les photographies des différentes étapes de réalisation du dispositif.

CHAPITRE I

LES DIFFERENTS MODES DE TRANSFERT

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

I. 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.

$$T1 > T2$$

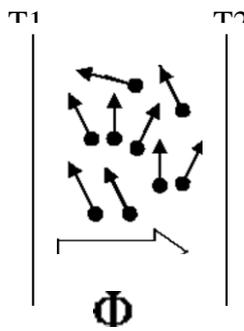


FIGURE I.1: Echange de chaleur par conduction

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier [1]

I.1.1 Loi de Fourier

Il existe une relation linéaire entre la densité de flux thermique et le gradient de température. En tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique λ du milieu .et au gradient de température [1].

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

Ou sous la forme suivante :

$$\phi = -\lambda \cdot A \frac{\delta T}{\delta x}$$

5

Avec : Φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ : Conductivité thermique du milieu (W.(m.°C))

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

A: Aire de la section de passage du flux de chaleur (m²)

Pour un milieu isotrope, la conductivité thermique λ est une grandeur scalaire positive, caractéristique du milieu, fonction en général de T . pour un milieu isotrope et homogène λ ne dépend pas de T . dans de nombreux cas pratiques, lorsque les écarts de température ne sont pas trop élevés, on peut considérer, avec une précision suffisante, λ comme une constante pour un milieu donné.

I.1.2 Résistance thermique

Considérant l'intersection d'un tube de courant par deux surfaces isothermes de températures T_1 et T_2 , on définit la résistance thermique par la relation [1] :

$$T_1 - T_2 = R \Phi$$

On reconnaît dans cette équation la forme générale de la loi d'Ohm [1]:

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

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

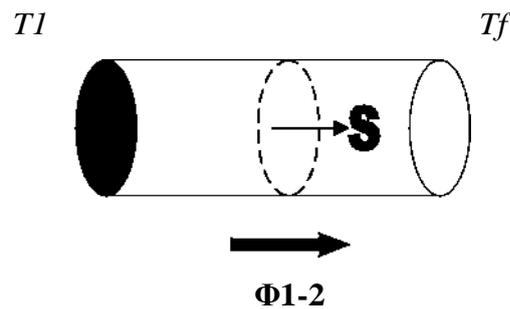


FIGURE I.2: Résistance thermique

I.1.3 Equation générale de la chaleur

Cette équation qui exprime la conservation d'énergie d'un élément infinitésimal de matière s'écrit :

$$\overrightarrow{div}(\lambda \cdot grad T) + P = \rho \cdot C_p \cdot (\partial T / \partial t)$$

- Où
- P : représente la production de chaleur en W/m^3
 - C_p : chaleur massique en $(J/kg \cdot ^\circ K)$,
 - ρ : masse volumique en (kg/m^3) .

6

I.2 Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide [3]. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton

$$\Phi = h A (T_p - T_\infty)$$

Avec :

- Φ : Flux de chaleur transmis par convection (W) ;
- h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W m^{-2} ^\circ C^{-1}$) ;
- T_p : Température de surface du solide ($^\circ C$) ;
- T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ C$) ;
- A : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2) ;

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

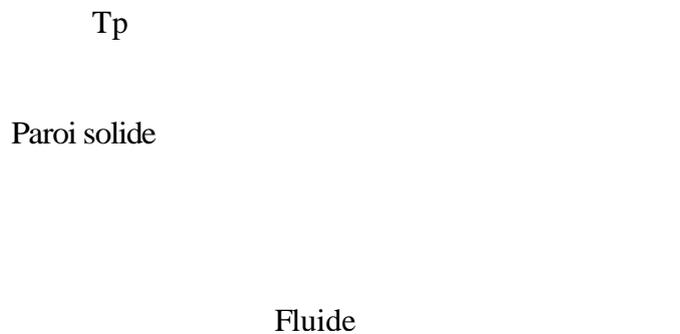


FIGURE I.3 : Transfert de chaleur par convection

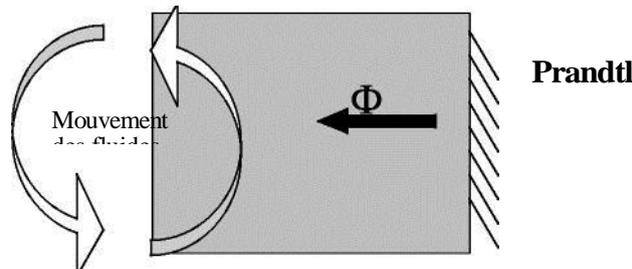
I.2.1 Nombres sans dimension

Nous définirons ci-dessous les nombres sans dimension rencontrés en transfert thermique par convection [2-3] :

I.2.1.1 Nombre de

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

7



Avec :

λ : Conductivité thermique du milieu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) ;

μ : viscosité dynamique en (PI) ;

C_p : chaleur massique en ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}$).

Ce nombre représente le rapport de la diffusivité mécanique ν à la diffusivité thermique a .

Un fluide peu visqueux mais bon conducteur thermique, aura un Pr très faible et vice-versa [3].

I.2.1.2- Nombre de Nusselt

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

Avec L : dimension caractéristique (m)

Ce nombre exprime le rapport entre le flux de chaleur par convection dans le fluide et le flux par conduction, λ_f ici la conductivité du fluide. Contrairement au Pr, Nu dépend non seulement de la nature du fluide à travers λ_f , mais aussi de la géométrie de l'écoulement à travers la dimension caractéristique L et de champ de la vitesse dans la couche limite à travers sa dépendance sur h . Tout comme pour h , on définit un nombre de Nusselt moyen Nu et un nombre de Nusselt local [4].

$$Nu_l = \frac{h_t \cdot L}{\lambda_l}$$

I.2.1.3 Nombre de Grashof

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot L^3 (T - T_f)}{\mu^2}$$

Ce nombre exprime le rapport entre les forces de gravité multipliées par les forces d'inertie et le carré des forces de viscosité.

I.2.1.4 Nombre de Rayleigh

Il s'écrit sous la forme suivante :

$$Ra = Pr \cdot Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 (T - T_f)}{a \nu}$$

Où il caractérise l'écoulement en convection naturelle.

Avec : β : coefficient de dilatation du fluide (K^{-1})

8

L : dimension caractéristique de la surface d'échange (m)

g : accélération de la pesanteur (m/s^2)

μ : viscosité dynamique du fluide ($kg/m.s$)

ν : viscosité cinématique (m^2/s)

ρ : masse volumique en (kg/m^3)

a : Diffusivité thermique en (m^2/s)

I.2.1.5 Nombre de Reynolds

Il est de la forme de :

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

Ce nombre exprime le rapport des forces d'inertie sur les forces de viscosité [1-2-3].

I.2.2 Flux de chaleur en convection forcée

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :

$$Nu = f(Re, Pr)$$

Avec Nu : nombre de Nusselt,

Re : nombre de Reynolds

Pr : nombre de Prandtl

Le calcul d'un flux de chaleur transmis par convection forcée s'effectue donc de la manière suivante :

1. Calcul des nombres adimensionnels de Reynolds et de Prandtl ;
2. Suivant la valeur de Re et la configuration \rightarrow choix de la corrélation ;
3. Calcul de Nu par application de cette corrélation ;
4. Calcul de h (Coefficient de transfert de chaleur)
 $h = \lambda Nu/D$ et de $\Phi = h S (T_P - T)$

I.2.3 Le flux de chaleur en convection naturelle

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :

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

Avec Nu : nombre de Nusselt,

Pr : nombre de Prandtl et

Gr : nombre de Grashof.

Le flux de chaleur transmise par convection naturelle s'effectue donc de la manière suivante:

1. Calcul des nombres adimensionnels de Grashof et de Prandtl ;
2. Suivant la valeur de Gr et la configuration → choix de la corrélation ;
3. Calcul de Nu par application de cette corrélation ;
4. Calcul de h (Coefficient de transfert de chaleur par convection)

$$h = \lambda Nu/D \text{ et de } \Phi = h A (T_p - T)$$

I.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Contrairement aux deux autres modes d'échange qui sont la conduction et la convection, le rayonnement ne nécessite pas l'existence d'un support matériel. Il se propage dans l'espace, si ce milieu est homogène, il se propage en ligne droite. Le rayonnement c'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux parois en face.

I.3.1 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 dA dans l'ensemble des directions où il peut rayonner (hémisphère limitée par le plan tangent à dA en son centre), et on divise ce flux par l'aire de dA . L'émittance est notée par E.

Son unité est le W/m^2 :

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

10

I.3.2 Le corps noir

C'est un corps idéal vis-à-vis du rayonnement qui, par définition, absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit quelque soit la fréquence et la direction. A l'équilibre thermique, il émet autant de rayonnement qu'il en absorbe de sorte qu'un corps noir rayonne le maximum d'énergie de façon uniforme dans toutes les directions.

I.3.3 Loi du rayonnement thermique

I.3.3.1 Loi de Planck : émittance monochromatique du corps noir

L'émittance monochromatique d'un corps noir $E^\circ_{\lambda,T}$ à la longueur d'onde λ et la température T , est donnée par la loi de Planck [5]:

$$E^\circ_{\lambda,T} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

Où $M^\circ_{\lambda,T}$ est le flux énergétique émis par la surface dans tout l'hémisphère et ramène à l'unité de longueur d'onde λ , la surface étant à la température T . $E^\circ_{\lambda,T}$ est exprimé en W/m^3 ou, dans le cas où λ est exprimé en microns (μm), $M^\circ_{\lambda,T}$ sera en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$.

Les constantes c_1 , c_2 sont égales à :

$$c_1 = 3,74 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$c_2 = 1,44 \cdot 10^4 \mu\text{m}^\circ\text{K}$$

I.3.3.2 - Loi de Stefan Boltzmann

Cette loi fournit l'émission 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 :

$$E^\circ = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2)$$

Avec σ : est la constante de Stefan Boltzmann

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)) [4].$$

11

I.3.4 Transfert par rayonnement entre surface

1) petit objet convexe placé dans une enceinte large ($S_1 \ll S_2$)

$$\phi = \sigma \varepsilon_p A (T_p^4 - T_\infty^4) \quad \text{Exprimé en (W)}$$

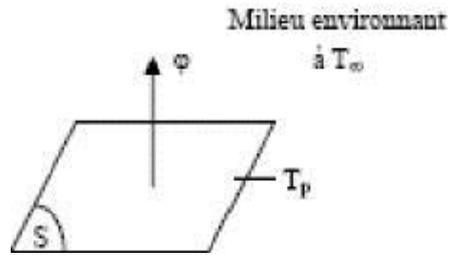


FIGURE I.4 : Transfert de chaleur par rayonnement

2) deux plans parallèles infinis :

$$\Phi = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement exprimé en W

σ : Constante de Stephan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

ε_p : Facteur d'émission de la surface

T_p : Température de la surface en °K

T_∞ : Température du milieu environnant la surface en °K

A : Aire de la surface en m^2

I.3.5 Réception du rayonnement par un solide

Quand un rayon d'énergie incident ϕ_i frappe un corps à la température T , une partie $\Phi_r \rho$ de l'énergie incidente est reflétée par la surface S , une autre partie $\phi_a \alpha$ est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste $\phi_t \tau$ transmis et continue son chemin [6] :

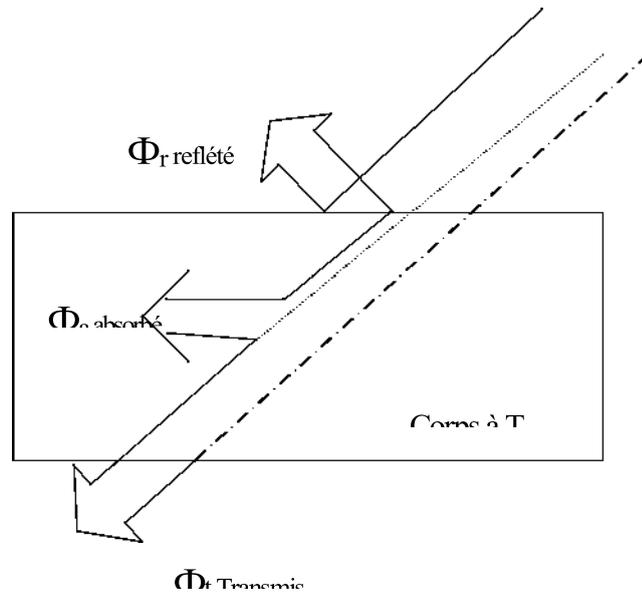


FIGURE I.5 : Réception du rayonnement

On a évidemment : $\phi_i = \phi_r \rho + \phi_a \alpha + \phi_r \tau$ d'où : $\rho + \alpha + \tau = 1$.

CHAPITRE II

GISEMENT SOLAIRE

II.1 Introduction

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique.

Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire.

Bien qu'il existe un réseau de stations d'évaluation du gisement solaire, le nombre de ces stations est très limité. En Algérie, seules sept stations assurent depuis 1970 la mesure de la composante globale et diffuse du rayonnement solaire. Le nombre de ces stations étant insuffisant et c'est pour cela que divers modèles ont été proposés pour estimer le gisement solaire à une échelle locale ou régionale. Ces modèles s'étendent des codes de calcul les plus complexes et les plus sophistiqués aux simples relations empiriques. Le choix du modèle est dicté par la nature des données et par la précision recherchée.

L'utilisation d'un modèle de l'atmosphère basé fondamentalement sur la connaissance du trouble atmosphérique pour la détermination des différentes composantes du rayonnement solaire d'un site donné notamment l'éclairement solaire direct est très indispensable dans la concentration solaire.

II.2 Le rayonnement solaire

II.2.1 Généralités sur le Soleil

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse avec un diamètre de $1,39.10^9$ m et est à distance moyenne de $1,49.10^{11}$ m de la terre. Comme vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant il ne tourne pas comme un corps solide; une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 aux régions polaires [7]. Le soleil est considéré comme un corps noir avec une température effective de 5777K. La température des régions intérieures centrales est de l'ordre de 8.10^6 à 40.10^6 K et la densité est estimée à 100 fois celle de l'eau. Le soleil est en effet, un réacteur de fusion continu avec ses constituants sous forme gazeuse retenue par des forces gravitationnelles, plusieurs réactions de fusion est déclenché pour intensifier l'énergie rayonnée par le soleil. Le processus le plus important est la transformation de l'hydrogène en hélium par une réaction thermonucléaire. Cependant, comme la masse du noyau de l'hélium est moins lourde que celle de quatre protons d'hydrogène, la masse perdue dans la réaction thermonucléaire est convertie en énergie [7].

L'énergie produite à l'intérieur de la sphère solaire à une température de l'ordre de plusieurs millions de degrés est transférée à la surface extérieure puis transférée par rayonnement dans l'espace. Les processus radiatif et convectif sont le résultat des états successifs d'émission, d'absorption et de radiation; la gamme de spectre de rayonnement dans le noyau du soleil est comprise entre la longueur d'onde des rayons X et celle des rayons *gamma*, avec une longueur d'onde de radiation qui augmente suivant la diminution de la température à de grandes distances.

Dans la structure schématique du soleil illustré dans la figure II.1, il est estimé que 90% de l'énergie est générée dans la région du disque solaire située entre 0 et 0,23R, ou R le rayon du soleil, qui représente 40% de la masse du soleil. A distance de 0,7R du centre, la température diminue d'environ 130 000 K et la masse volumique de 70 kg/m³ ; Là, le processus convectif du soleil devient important et la zone comprise entre 0,7 et 1,0R est appelée : zone convective. Dans cette zone, la température diminue d'environ 5000 K et la masse volumique d'environ 10⁻⁵ kg/m³ [7].

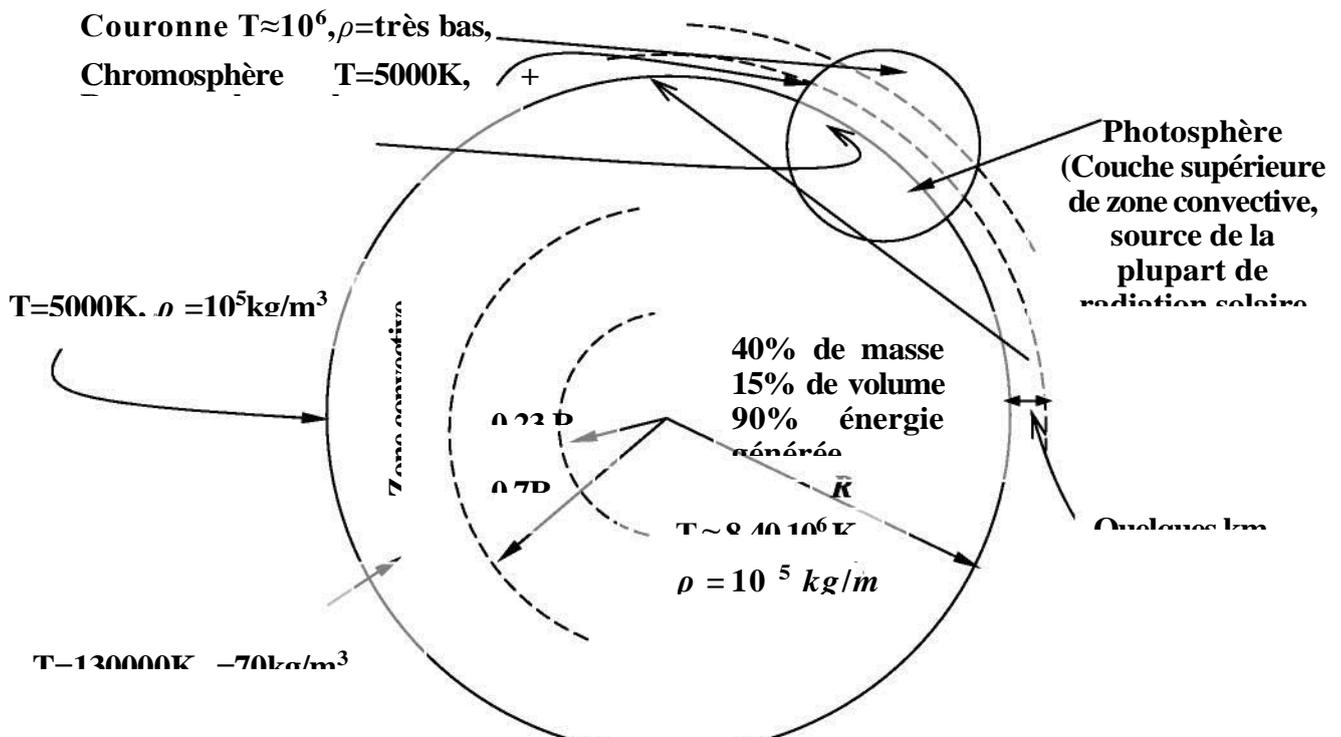


FIGURE II.1: La structure du soleil.

La surface apparente du soleil est constituée de granules (cellules convectives irrégulières), avec des dimensions de l'ordre de 1000 à 3000 km et leur durée de vie est estimée à quelques minutes. Les autres formes à la surface du soleil sont de petites aires opaques qui s'appellent pores.

A des dimensions équivalentes à celles des cellules convectives, il existe d'autres aires opaques avec des dimensions variables qui s'appellent taches solaires. La couche extérieure de la zone convective s'appelle photosphère, sa densité est très faible (environ 10^{-4} celle de l'air au niveau de la mer). Cette couche est composée de gaz à forte ionisation qui peut absorber et émettre des radiations de spectre continue. La photosphère est la source de la plupart des radiations solaires.

Il est généralement admis que le rayonnement solaire est produit par un phénomène thermonucléaire contrôlé de transformation de l'hydrogène en hélium (de hélios = soleil) : les noyaux des atomes de deutérium et de tritium (isotopes de l'hydrogène) fusionnent en libérant de l'énergie. La réaction est schématiquement la suivante :



II.2.2. Constante Solaire

Le flux du rayonnement à la surface du soleil est d'environ $6,33 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$. Une surface plane, d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire, située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée en fonction de la distance Soleil-Terre ($149\,597\,870 \cdot 10^3 \text{ m}$ ou 1UA représente la distance moyenne Soleil-Terre). Cette distance a une faible variation au cours de l'année, compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre qui est d'environ 1,7% [7]. La constante solaire est une valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sa valeur est estimée à 1367 W/m^2 (Fröhlich et Brusa, 1981, et Iqbal, 1983) [8]. La représentation schématique du système Soleil-Terre est indiquée dans la figure II.2 [9].

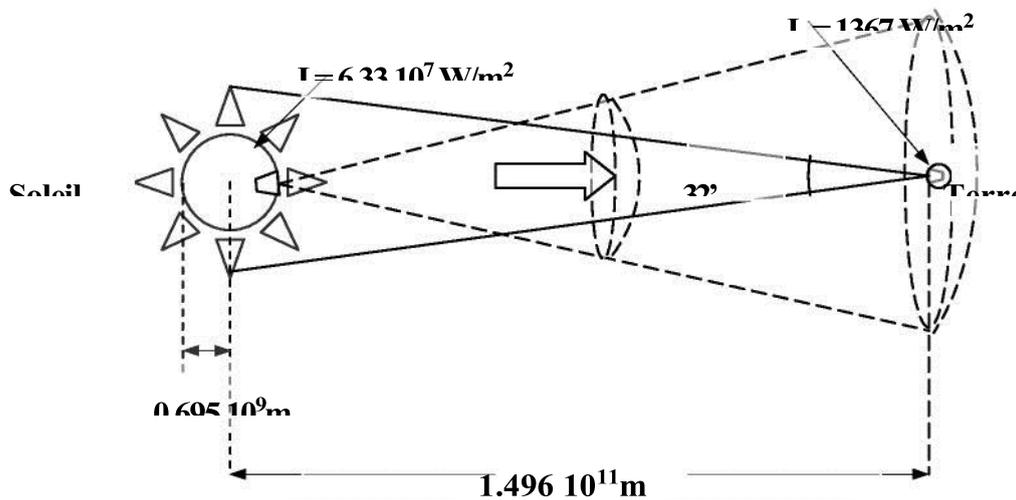


FIGURE II.2 : La divergence de l'énergie du soleil vers la terre.

La taille angulaire apparente du disque solaire peut être calculée à partir du diamètre de la photosphère et la distance Soleil-Terre. A 1UA, il s'agit de 0,0093 rad (0,553 degrés ou 32'). Comme la distance Soleil-Terre varie au cours de l'année, la taille apparente du soleil varie de $\pm 1,7\%$ [7].

II.2.3 Translation et rotation de la terre

On peut décomposer les mouvements de la terre en considérant séparément le mouvement par rapport au centre de masse (rotation) et le mouvement de ce centre de masse par rapport à lui-même (translation) [10].

- **Rotation de la terre**

En vingt quatre heures, la terre effectue une rotation complète d'Ouest en Est autour de son axe ; c'est la base de notre système horaire. De cette rotation découle la succession des jours et des nuits [10].

- **Révolution de la terre**

La terre effectue en tour complet autour du soleil en 365,25 jours suivant une orbite elliptique, tandis que la vitesse moyenne de ce mouvement est d'environ 30 km/s. La distance entre les centres de ces deux astres varie d'une valeur minimale au Périhélie ($1,47 \cdot 10^{11}m$), aux environs du 2 janvier, à une valeur maximale, à l'Aphélie ($1,52 \cdot 10^{11}m$), aux environs du 3 juillet, la valeur moyenne étant appelée unité astronomique (UA) [10]. Les mouvements de la terre autour de son axe et autour du soleil sont illustrés dans la figure II.3, alors que le tableau (II.1) montre la durée des saisons conséquentes à ce mouvement [9]:

Tableau. II.1 : Durée des saisons

Saisons (Hémisphère N.)	Durée moyenne	Du	au
Printemps	92 jours 20 heures	21/3	21/6
Eté	93 jours 15 heures	21/6	23/9
Automne	89 jours 19 heures	23/9	22/12
Hiver	89 jours	22/12	21/3

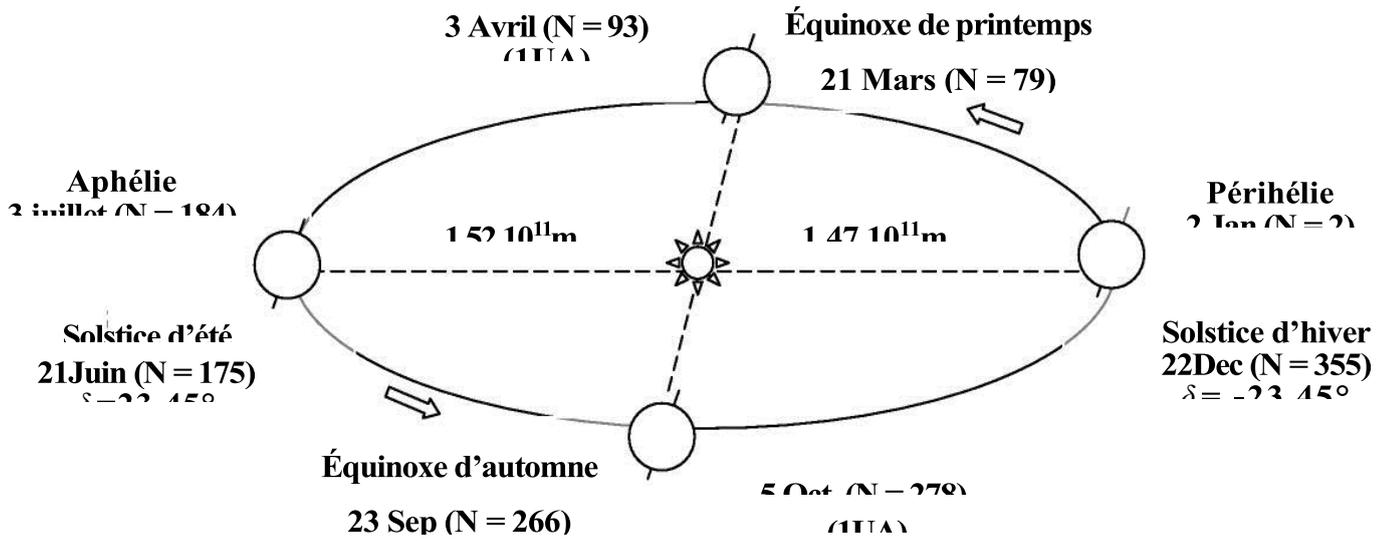


FIGURE II.3 : Schématisation du mouvement de la terre autour du Soleil

II.2.4 Le spectre solaire

On appelle émission (ou émittance) énergétique E (en un point d'une surface) le quotient du flux énergétique émis par un élément de surface par l'aire de cet élément [11] :

$$E = \frac{d\Phi}{ds} \tag{II-1}$$

L'émittance énergétique E_λ monochromatique est l'émittance énergétique de radiation comprise entre λ et $\lambda + d\lambda$ ou $d\lambda$ est un infiniment petit positif, tel que :

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda \tag{II-2}$$

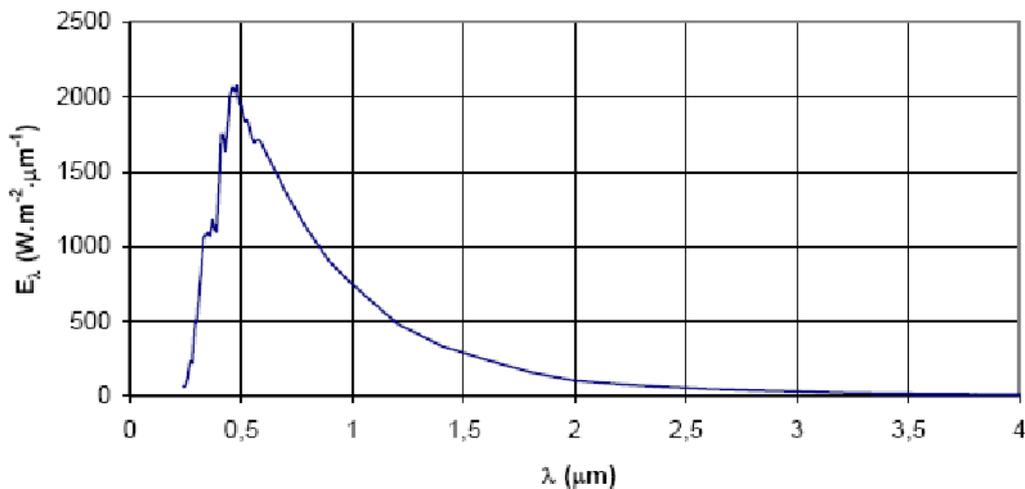
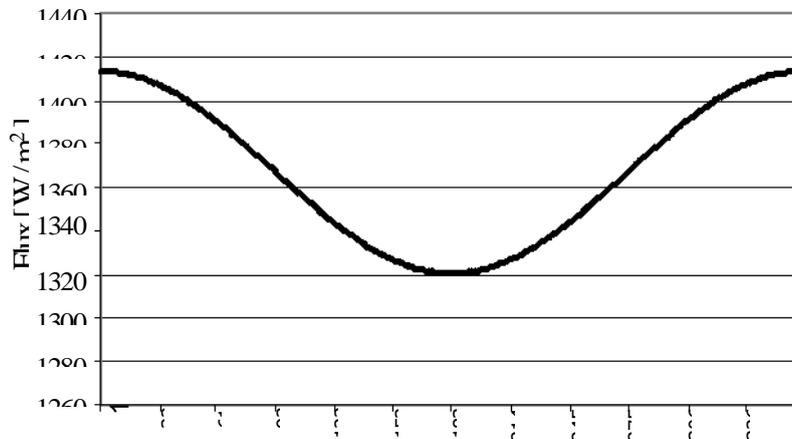


FIGURE II.4 : Spectre du soleil à la limite de l'atmosphère terrestre.

On observe dans la figure II.4 que 98% du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'ondes inférieures à 4µm. En première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5777 K [10].

II.2.5 Rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère

L'émission de rayonnement électromagnétique du soleil se manifeste par une puissance moyenne de 1367 W/m² [8] dans un plan perpendiculaire au rayonnement, qui varie de ± 3,4% [5] environ au cours de l'année.



Jours

FIGURE II.5 : Variation annuelle du rayonnement solaire extraterrestre dans un plan perpendiculaire aux rayons.

Le calcul du rayonnement extraterrestre peut être effectué par la formule approximative (Duffie and Beckmann, 1991) [7] suivante :

$$I = I_{SC} \left[1 + 0,034 \cos \left(\frac{360}{365,25} n \right) \right] \quad (\text{II-3})$$

De même qu'il peut être effectué par la formule ci-après, qui est plus précise, issue d'un développement en séries de Fourier (Spencer, 1971) [7]

$$I = I_{CS} \left(\frac{1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B}{+0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B} \right) \quad (\text{II-4})$$

avec : $B = 360^\circ \cdot \frac{N-1}{365}$

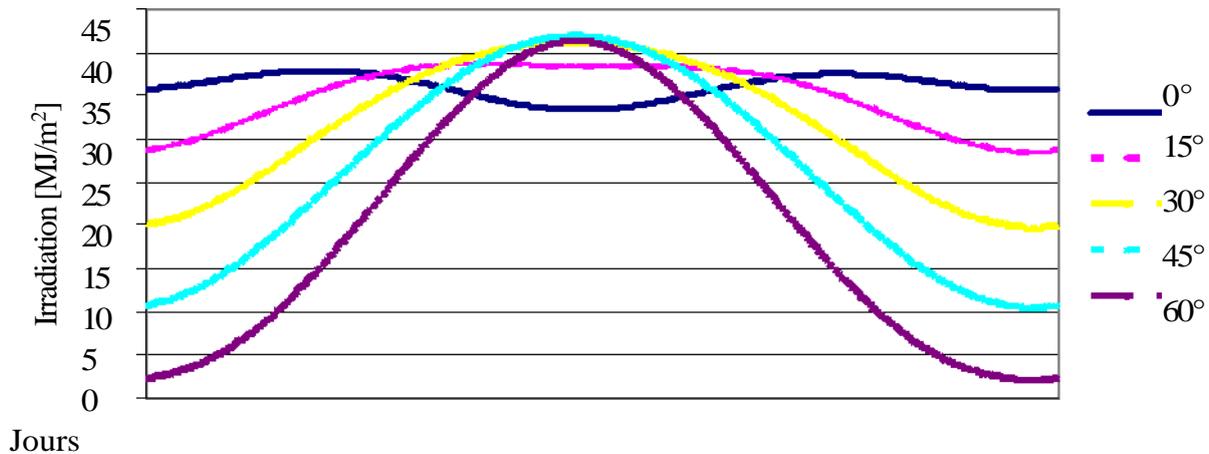


FIGURE II.6: Variations annuelles de l'irradiation quotidienne d'une surface réceptrice horizontale située hors atmosphère avec différentes latitudes.

II.3 La position du soleil

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Pour récupérer le maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est primordiale.

II.3.1 Les coordonnées géographiques terrestres

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre.

- **Latitude ϕ**

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Sa valeur est positive dans l'hémisphère nord, et est négative dans l'hémisphère sud [12].

- **Longitude λ**

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'ouest et est négative à l'est de méridien origine [12].

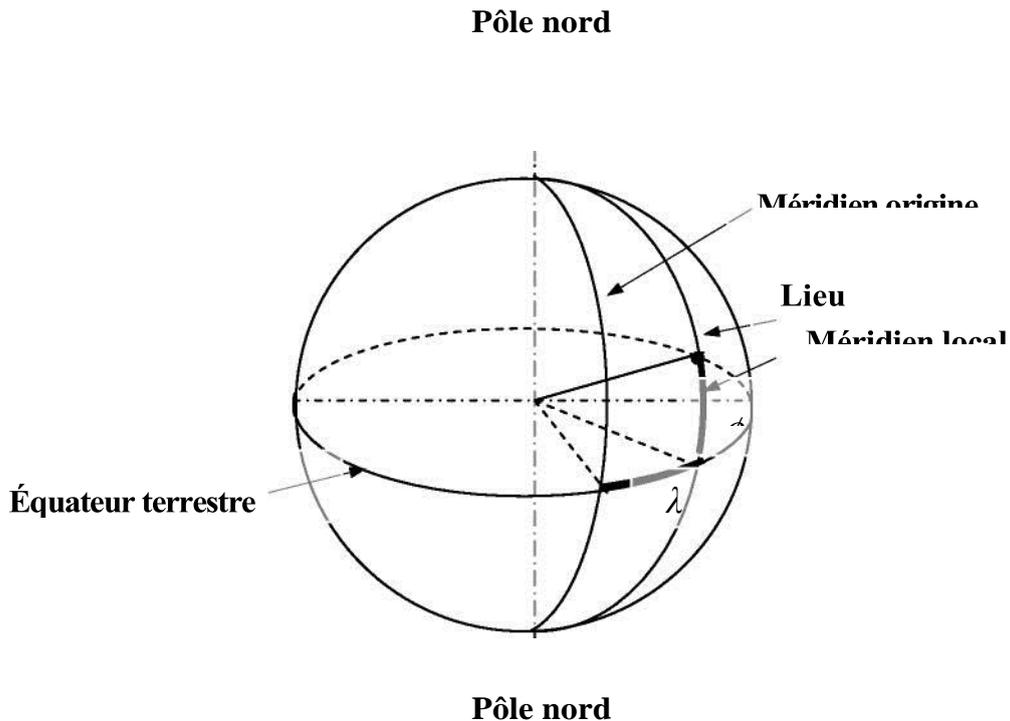


FIGURE II.7 : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné.

- **Méridien**

Grand cercle de la terre passant par les pôles. Tous les points d'un même méridien ont évidemment la même longitude ; le méridien pris pour origine (0°) des longitudes est celui de Greenwich. Le plan méridien en un lieu est déterminé par ce lieu et par l'axe des pôles; sa trace au sol est parfois dénommée : méridienne. Le temps solaire vrai est identique, à un instant donné, pour tous les points d'un même méridien [12].

II.3.2 Déclinaison δ

C'est l'angle formé par le vecteur Soleil-Terre avec le plan équatorial. Elle est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan écliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre), et maximale aux solstices d'été (22 juin) et d'hiver (22 décembre) [14].

La variation journalière de la déclinaison est d'environ de $0,5^\circ$. Elle est calculée par une équation simple approximative [7]:

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360}{365}(284 + n)\right) \quad (\text{II} - 5)$$

Ou par une série de Fourier [2] :

$$\delta = \left(\begin{array}{l} 0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B - 0,006758 \cos 2B \\ + 0,000907 \sin 2B - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B \end{array} \right) \frac{180^\circ}{\pi} \quad (\text{II} - 6)$$

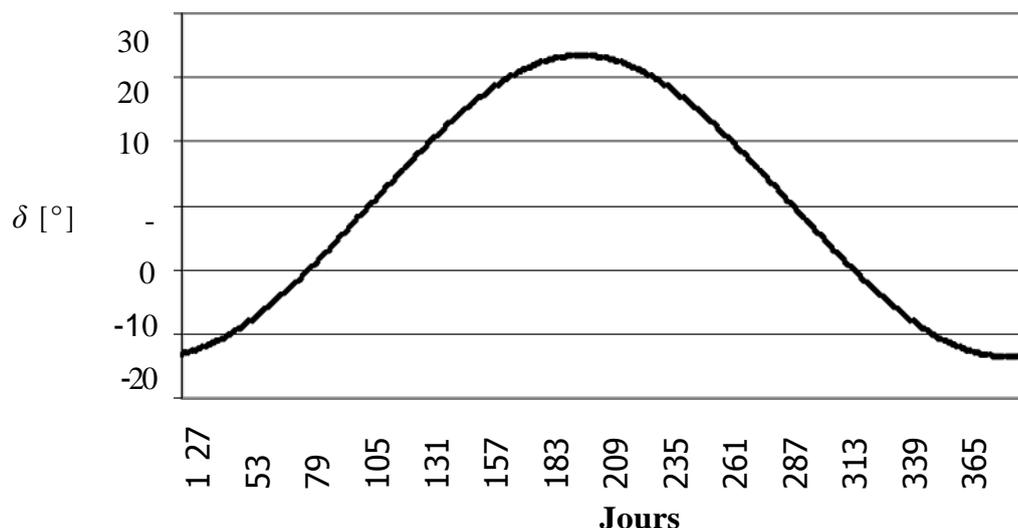


FIGURE II.8 : Variation annuelle de la déclinaison solaire.

II.3.3 L'équation du temps *ET*

C'est l'écart entre le temps solaire moyen *TSM* et le temps solaire vrai *TSV* selon le jour de l'année considéré [11]

$$ET = TSV - TSM \quad (\text{II} - 7)$$

La figure **II.9** montre la variation de *ET* durant l'année donnée par la formule suivante [7]:

$$ET = 0.258 \cos x - 7.416 \sin x - 3.648 \cos 2x - 9.228 \sin 2x \quad (\text{II} - 8)$$

avec : $x = \frac{360(n-1)}{365,25}$

Où l'angle *x* est défini en fonction du numéro du jour *n*. Le décompte commence à partir du 1^{er} janvier où *n*=1.

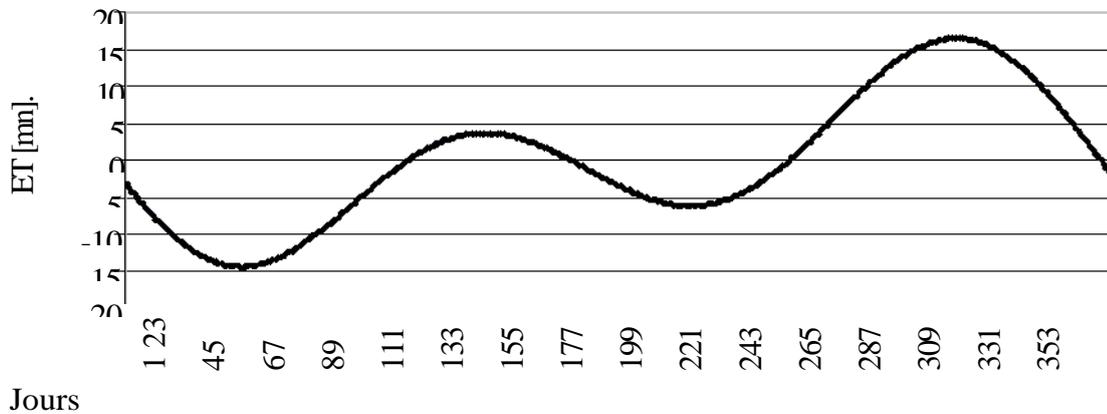


FIGURE II.9 : Variations annuelles de l'équation du temps.

II.3.4 Le temps solaire vrai et l'angle horaire du soleil

La notion du temps solaire vrai *TSV* a une liaison avec l'angle solide, qui représente l'arc compris entre le rayonnement solaire incident et le plan méridien du lieu. Cet angle augmente de quinze degrés (15°) par heure. La valeur zéro degré (0°) est atteinte au passage du soleil à la verticale (zénith) du plan méridien (midi solaire vrai = 12 h *TSV*) [11].

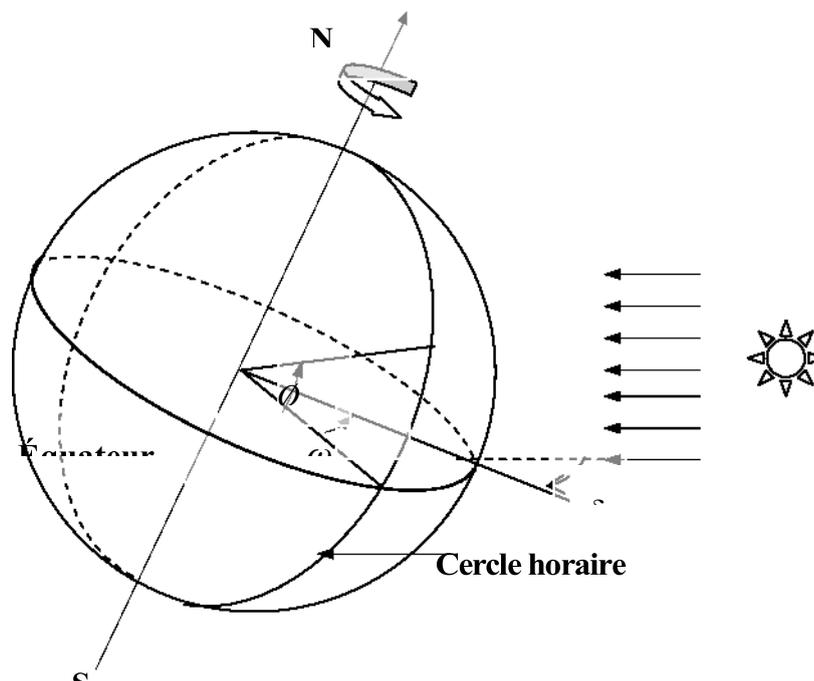


FIGURE II.10: L'angle horaire et la déclinaison.

L'angle horaire est compté négativement avant midi TSV, et positivement après midi.

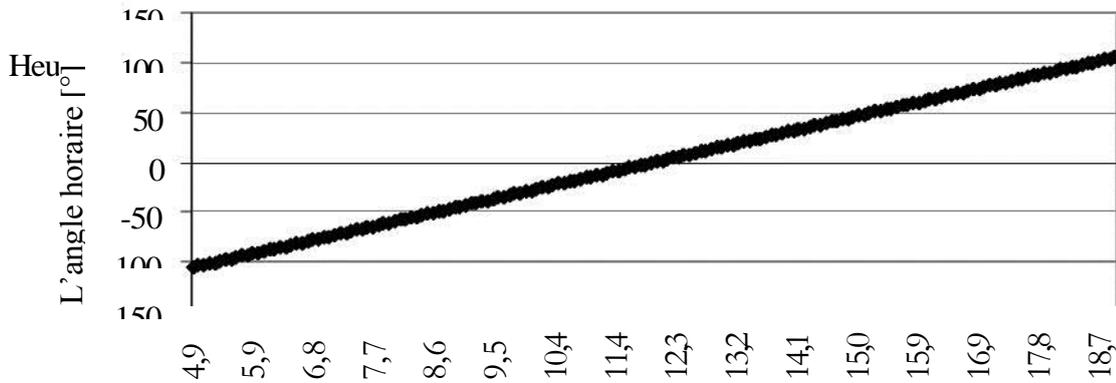


FIGURE II.11 : Variation journalière de l'angle horaire.

La relation directe entre TSV et l'angle horaire ω du soleil est donnée par :

$$\omega = 15^\circ(TS - 12) \quad (\text{II} - 9)$$

Où ω est mesuré en degrés et TSV en heures.

- Le temps solaire moyen TSM

Temps défini par les coordonnées angulaires d'un soleil fictif qui serait animé d'une vitesse constante sur l'Ecliptique.

- Le temps solaire vrai TSV

Temps défini par les différentes coordonnées angulaires du soleil. Il est lié au temps solaire moyen TSM par l'équation du temps ET avec un maximum de 16 minutes.

- Le temps universel TU

Temps solaire moyen du méridien de Greenwich (GMT).

$$TSV = TSM + ET \quad (\text{II} - 10)$$

$$TMS = TU + \frac{\lambda}{15} \quad (\text{II} - 11)$$

On en déduit :

$$\omega = 15 \left(TU + \frac{\lambda}{15} + ET - 12 \right) \quad (\text{II} - 12)$$

Où ω et λ sont exprimés en degrés (λ positif pour les longitudes Est) TU et ET sont exprimés en heures et dixièmes.

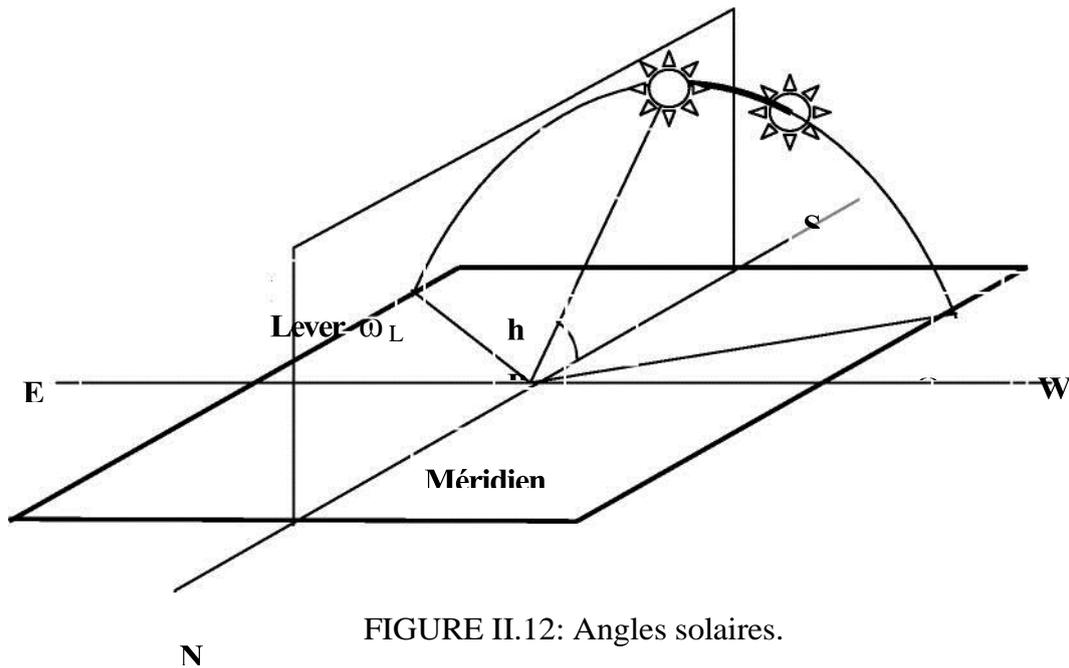


FIGURE II.12: Angles solaires.

II.3.6 Hauteur angulaire du soleil h

C'est l'angle formé par le plan horizontal du lieu d'observation avec la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de 0° (soleil à l'horizon) à 90° (soleil au zénith).

La hauteur angulaire du soleil h est alors donnée par la formule :

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (\text{II} - 13)$$

Où ϕ : Latitude du lieu

δ : La déclinaison du soleil

ω : L'angle horaire du soleil

II.3.7 Azimut du soleil a

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut est importante pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale, l'azimut nul correspond à la direction Sud dans l'hémisphère nord et la direction nord dans l'hémisphère sud. L'orientation Est correspond à l'azimut $a = -90^\circ$, et l'orientation Ouest à $a = +90^\circ$.

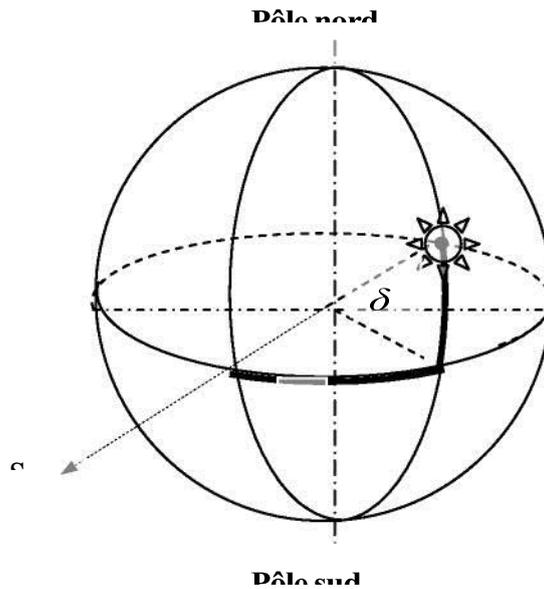


FIGURE II.13: Représentation de la déclinaison et de l'azimut et la déclinaison.

L'azimut a est défini par les relations suivantes :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (\text{II} - 14)$$

Où

$$\cos a = \frac{\sin \varphi \sin h - \sin \delta}{\cos \varphi \cos h} \quad (\text{II} - 15)$$

Ou bien :

$$\cos a = \frac{\sin \varphi \sin \delta \cos \omega - \cos \varphi \sin \delta}{\cos h} \quad (\text{II} - 16)$$

II.3.5 Durée du jour

On peut déduire les heures de lever et de coucher du soleil à partir de la hauteur angulaire du soleil en posant $\sin h = 0$ (soleil à l'horizon) dans l'équation II-15. Ce qui donne :

$$\cos \omega_L = -\tan \varphi \tan \delta \quad (\text{II} - 17)$$

Où ω_L est l'angle horaire du soleil à son lever (et, au signe près, à son coucher).

La durée du jour est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$dj = \omega_C - \omega_L \quad (\text{II} - 18)$$

En intégrant (II - 12) dans (II - 13), on obtient :

$$dj = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (\text{II} - 19)$$

II.3.8 Décalage horaires

Les relations se rapportant au mouvement du Soleil utilisent le temps solaire TS qui diffère généralement du temps légal TL (heure des montres) du lieu considéré. Cette différence est liée à :

- La différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF correspondant au fuseau horaire adopté par le pays [11] :

$$C = TL - TCF \quad (\text{II} - 20)$$

L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire méridien De Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire fixé.

II.3.9 Fuseau horaire

Secteur de la surface terrestre compris entre deux méridiens distants de 15° de longitude et pour lequel, par convention, l'heure indiquée par le fuseau diffère d'un nombre entier d'heures de celle indiquée par le temps universel.

A ce concept est lié celui de la ligne de changement de date. L'heure légale d'un pays est généralement rattachée à l'heure du fuseau recouvrant la majorité de ce pays [9].

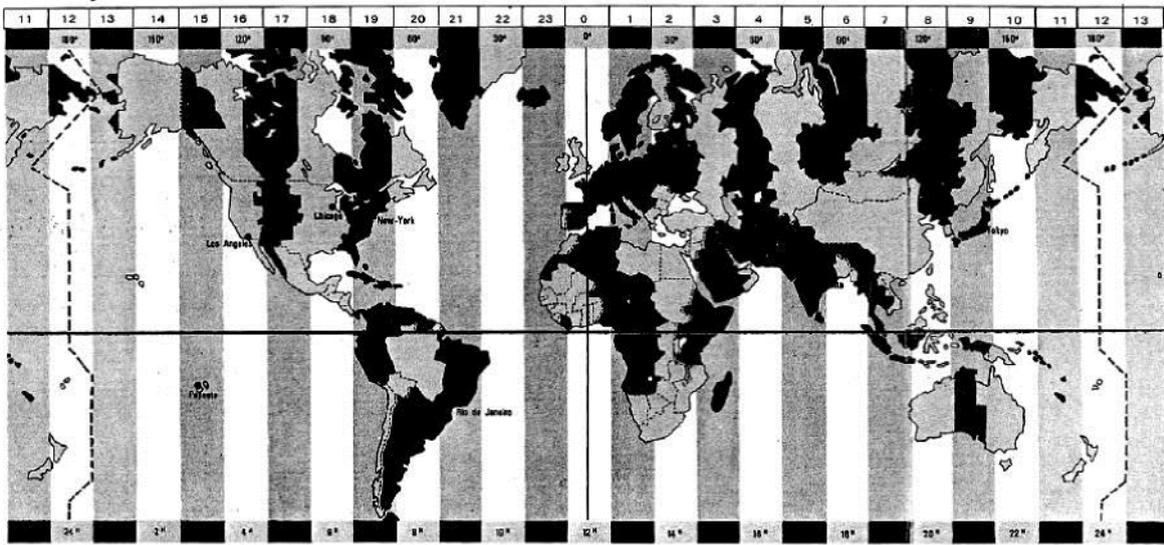


FIGURE II.14: Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich

I.4 Eclairage d'un récepteur plan

Le coefficient d'incidence $\cos \gamma$ est l'angle formé par le rayonnement solaire incident avec la perpendiculaire issue de la surface considérée. Ce coefficient est défini d'une part par la hauteur du soleil et son azimut et d'autre part par l'orientation (points cardinaux) et l'inclinaison i du plan récepteur. Ainsi, chaque plan récepteur peut être défini par un couple de valeurs, soit (O, i) . L'orientation est négative vers l'Est et est positive vers l'Ouest, Quant à l'inclinaison, elle est égale à 0° pour un plan horizontal et 90° pour un plan vertical. Si le coefficient d'incidence est négatif, la surface du plan considéré ne reçoit pas de rayon solaire direct. [13]

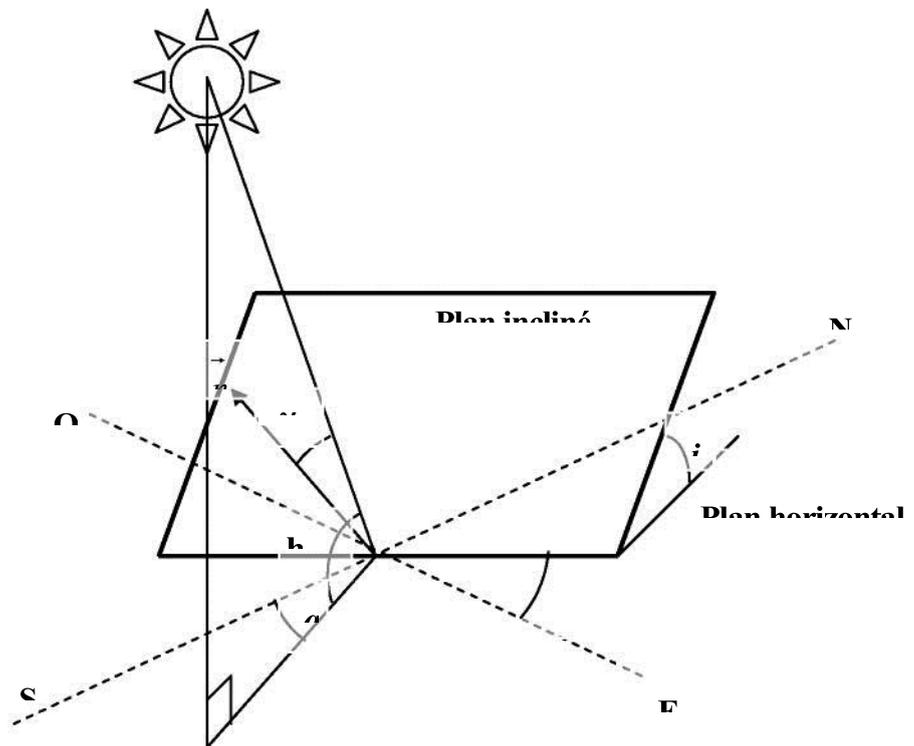


FIGURE II.15: Inclinaison et orientation d'une surface réceptrice

L'inclinaison sur l'horizontale est désignée par l'angle compris entre 0° et 90° et par le plan azimutal α compris entre -180° et 0° vers l'Est et entre 0° et 180° vers l'Ouest.

L'éclairage lumineux (W/m^2) est maximal lorsque le rayonnement est perpendiculaire au plan ($\gamma = 0$). L'angle d'incidence θ augmente jusqu'à être le rayonnement à incidence rasante ($\gamma = 90$).

L'éclairement perpendiculaire à un plan, peut être calculé par la formule [12] :

$$S = I_{DN} \cos \gamma \quad (\text{II} - 21)$$

L'angle d'incidence γ est défini par les variables a, h, α et i et peut être calculé par [11] :

$$\cos \gamma = \cos h \sin i \cos(a - \alpha) + \sin h \cos i \quad (\text{II} - 22)$$

II.4.1 Eclairement global

Eclairement énergétique solaire reçu par une surface horizontale à partir d'un angle solide de $2\pi r$ s, Symbole: G .

II.4.2 Rayonnement diffus

Eclairement énergétique solaire dirigé vers le sol reçu par une surface horizontale, provenant de tout l'hémisphère partir de l'angle solide limité au disque solaire. Symbole : D .

$$G = S + D \quad (\text{II} - 23)$$

$$G = I_{DN} \cos \gamma + D_{sol} + D_{ciel} \quad (\text{II} - 24)$$

L'énergie G^* emmagasinée pendant , le temps t est obtenue grâce à la formule suivante [12] :

$$G^* = \int_0^t G dt \quad (\text{II} - 25)$$

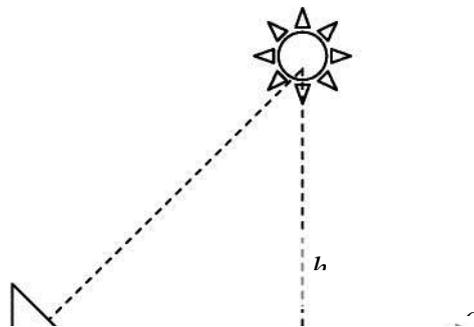


FIGURE II.16: Représentation dans le plan azimutal des coordonnées (a, h) du soleil dans le cas d'un capteur situé dans l'hémisphère nord

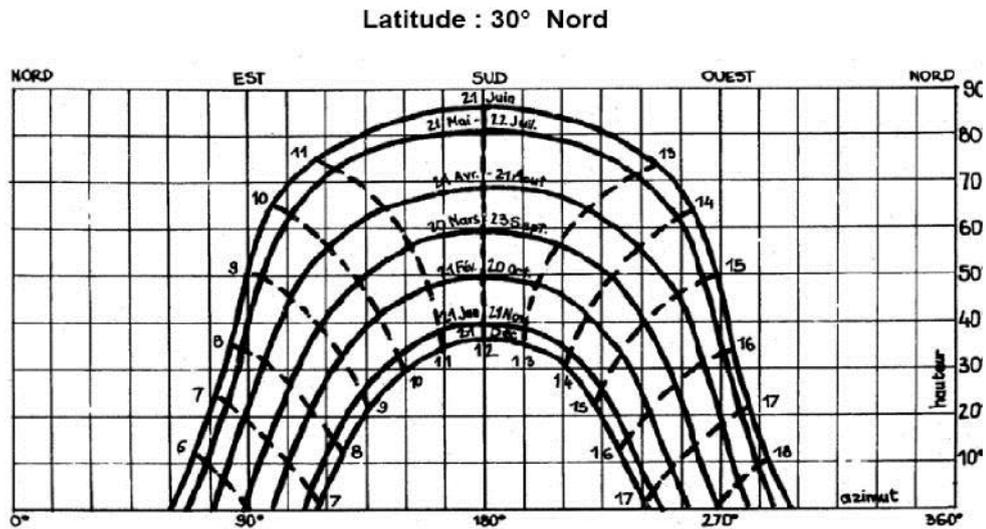


FIGURE II.17: Diagramme solaire.

L'intérêt du diagramme solaire d'un point de vue énergétique est de renseigner rapidement sur l'effet de masque dû à un obstacle (immeuble, ... etc.) pouvant occulter le soleil pendant une partie du temps [11].

II.4.3 Instrument de mesure d'éclairement

II.4.3.1 Mesures effectuées par un Pyranomètre

1. Mesures effectuées par un Pyranomètre.
2. Mesure de l'éclairement énergétique global.
3. Mesure de l'éclairement énergétique diffus par adjonction d'un dispositif d'occultation du disque solaire.

• Principe

L'élément sensible (thermopile) du Pyranomètre est une série de thermocouples exposés au rayonnement solaire, dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par h conduction et qui délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident.

Un pare-soleil constitué par une bande circulaire centrée sur la thermopile et parallèle au plan équatorial, occulte le Pyranomètre du rayonnement solaire direct pour permettre la mesure du rayonnement solaire diffus.

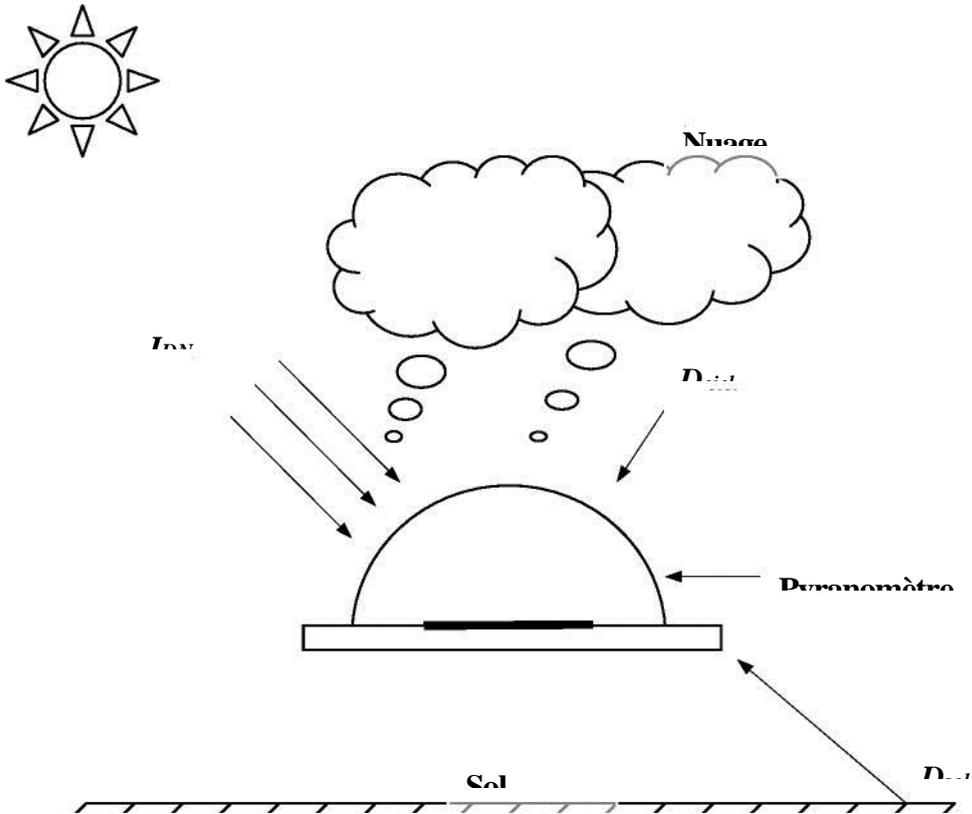


FIGURE II.18 : Mesure du rayonnement global G.

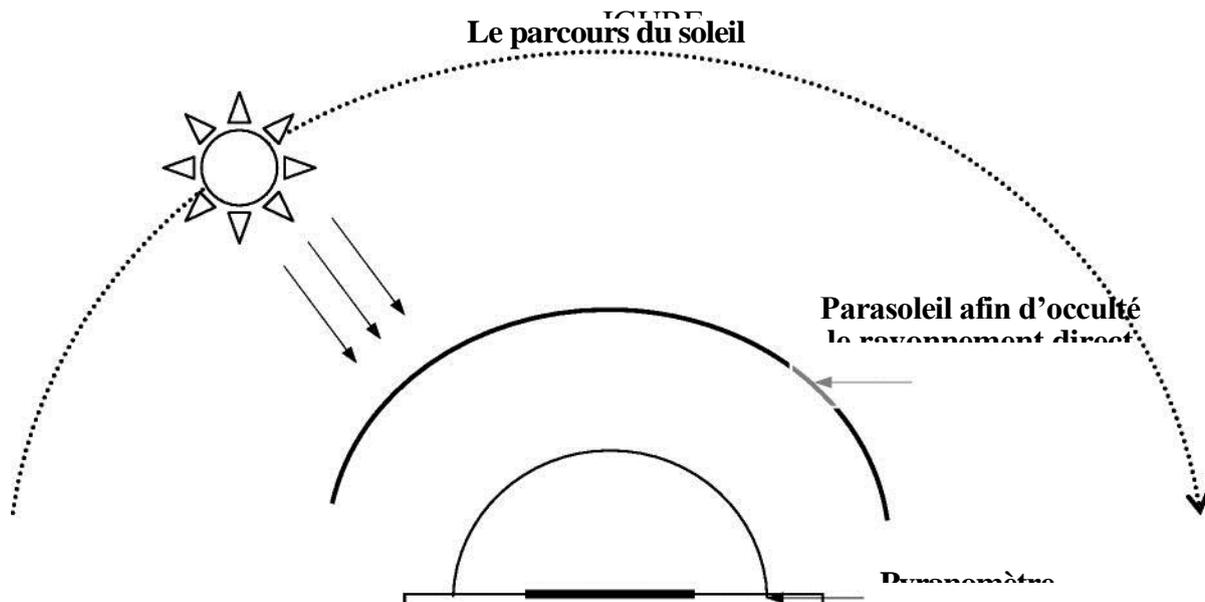
- **Caractéristiques techniques (modèle CM6)**

Thermopile de Moll composée de 14 thermocouples manganine-constantan montés en série.

Couppelles protectrices collées, étanchéité réalisée par joints toriques.

- Sensibilité : à 15°C; 10 à 13.10⁻⁶ V/W/m².
- Influence de la température : -0.12 % / °C.
- Résistance approximative : 10 Ohms.
- Domaine spectral : 300 à 2800 nm.

En option : une bande pare-soleil de 6 cm de large et de 90 cm de diamètre environ dont la position est réglable en fonction de la déclinaison [14].



II.19: Mesure du rayonnement diffus D.

II.4.3.2 Pyrhéliomètre et rayonnement direct

- **Définition du rayonnement solaire direct**

C'est l'éclairement énergétique solaire contenu dans l'angle solide limité au disque solaire et parvenant sur une surface perpendiculaire à l'axe de cet angle solide. Symbole : I_{DN} .

- **Mesure effectuée par un Pyrhéliomètre**

Mesure de l'éclairement énergétique direct. Rayonnement solaire provenant de l'angle solide limité au disque solaire parvenant sur une surface unité perpendiculaire à l'axe de cet angle solide.

- **Principe**

L'élément sensible (thermopile) du Pyrhéliomètre est constitué de thermocouples montés en série, exposés au rayonnement solaire et dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction. Il délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident. La géométrie de l'appareil limite le rayonnement incident au rayonnement solaire direct et au rayonnement provenant du ciel circumpolaire.

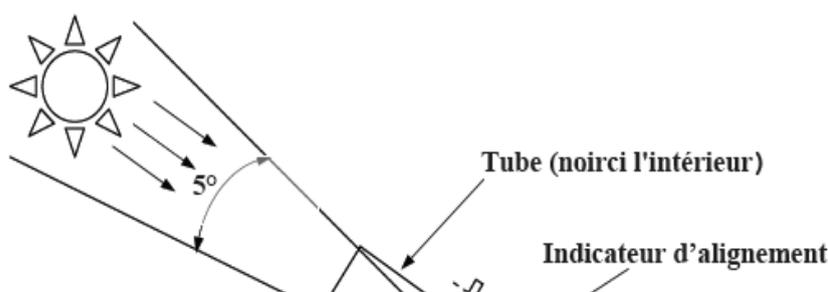


FIGURE II.20 : Une incidence normale de Pyrhéliomètre (NIP) utilisé pour mesurer la composante du rayonnement solaire direct.

- **Caractéristiques techniques (Type NIP)**

L'élément sensible est une thermopile peinte en noir, associée à un circuit de compensation en température. L'appareil est étanche et monté en atmosphère sèche.[15]

- Sensibilité : $6 \text{ à } 10 \cdot 10^{-6} \text{ V/W/m}^2$.
- Résistance approximative : 200 Ohms
- Influence de la température : 1% de -20 à $+40^\circ\text{C}$
- Linéarité : meilleure que 0.5%
- Angle d'ouverture : $5^\circ 43'$
- Domaine spectral : 300 à 4000 nm

L'appareil doit être placé sur un système de poursuite solaire (monture équatoriale) pour un suivi tout au long de la journée. [7]

II.4.4 L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

Lors de son trajet à travers l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses influences :

1. Diffusion par les molécules composant les gaz atmosphériques (diffusion de Rayleigh, Mie). Elle affecte les courtes longueurs d'onde du spectre solaire (loi de variation en λ^{-4}) ; ce qui explique la couleur bleue du ciel.
2. Absorption par les gaz atmosphériques (oxygène, O₃) dans le domaine des courtes longueurs

- d'ondes (vapeur d'eau...) et dans celui des grandes longueurs d'onde (gaz carbonique...).
3. Diffusion par les aérosols est les microparticules en suspension dans l'atmosphère, ainsi que par les microcristaux et les gouttelettes constituant les nuages. Là, toutes les longueurs d'ondes sont affectées, ce qui cause parfois des troubles atmosphériques.

II.4.5 Energie reçue par une surface horizontale située à l'extérieur de l'atmosphère

L'intégration de la formule (II – 3) entre le lever et le coucher du soleil, permet d'estimer l'irradiation (énergie) reçue par une surface réceptrice horizontale, hors atmosphère, ce qui donne la formule suivante [12] :

$$I_0 = \frac{24}{\pi} I_{SC} \left[\frac{\pi}{180} \omega_L \sin \varphi \sin \delta + \sin \omega_L \cos \varphi \cos \delta \right] \quad (\text{II} - 26)$$

$I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$: valeur moyenne de la constante solaire.

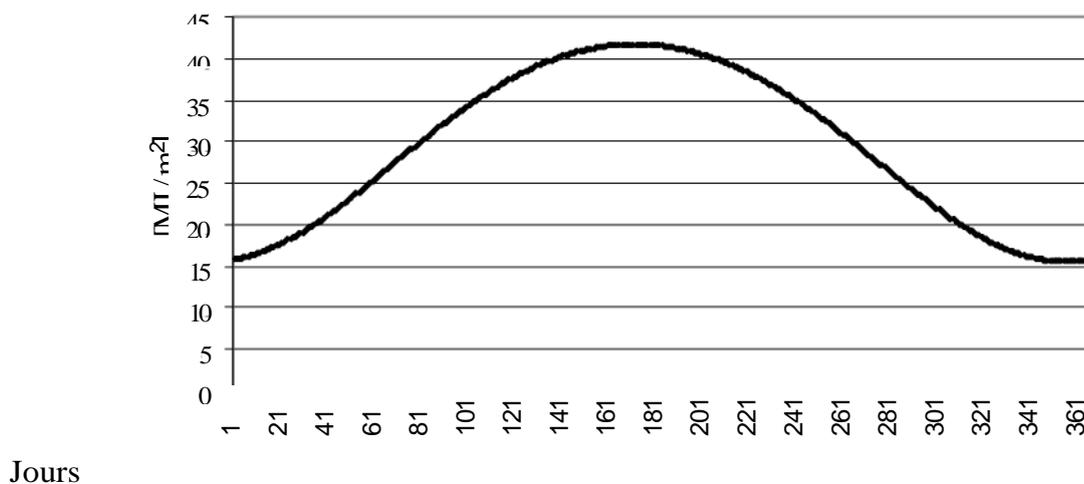


FIGURE II.21: Variation de l'énergie extraterrestre reçue par une surface horizontale

II.5 Estimation de l'éclairement solaire

II.5.1 Définition

L'éclairement solaire est défini comme étant la puissance (W/m^2) reçue par unité de surface réceptrice plongée dans un flux énergétique. L'énergie solaire (constance solaire moyenne à l'entrée de l'atmosphère, 1367 W/m^2) subit une dégradation lorsqu'elle traverse l'atmosphère, une partie seulement de cette énergie est disponible au sol. Ce rayonnement solaire se décompose en deux parties principales qui sont le rayonnement solaire direct (I_{DN}) et le rayonnement solaire diffus

(D). La somme de ces deux rayonnements est appelée : rayonnement solaire global (G).

II.5.2 La variation de l'éclairement solaire direct normal selon les conditions climatiques

1. I_{DN} diminue de 3 à 5% lorsque, à hauteur angulaire égale. L'épaisseur de l'eau condensable varie du simple au double.
2. I_{DN} diminue d'environ 100W/m² lorsque β varie de 0,05 à 0,15 pour des hauteurs du soleil comprises entre 10 et 90°.
3. 150W/m si β varie de 0,10 à 0,20.

Ces expressions empiriques ont été obtenues par analyse de nombreuses mesures météorologiques réalisées (C. Perrin de Brichambaut) : [12].

Condition de troubles	I_{DN} [W/m ²]	G [W/m ²]
Conditions normales	$1230 \exp \left[-\frac{1}{3,8 \sin(h + 1,6)} \right]$	$1130(\sin h)^{1,15}$
Ciel très pur	$1210 \exp \left[-\frac{1}{6 \sin(h + 1)} \right]$	$1080(\sin h)^{1,22}$
Zone industrielle	$1260 \exp \left[-\frac{1}{2,3 \sin(h + 3)} \right]$	$995(\sin h)^{1,25}$

TABLEAU II.2: Expressions empiriques des éclairagements solaires par, ciel clair mais pour trois conditions de troubles en fonction la hauteur solaire.

La figure I.22 Montre la variation de l'éclairement solaire direct en fonction de l'hauteur solaire pour des différentes conditions de troubles [12] .

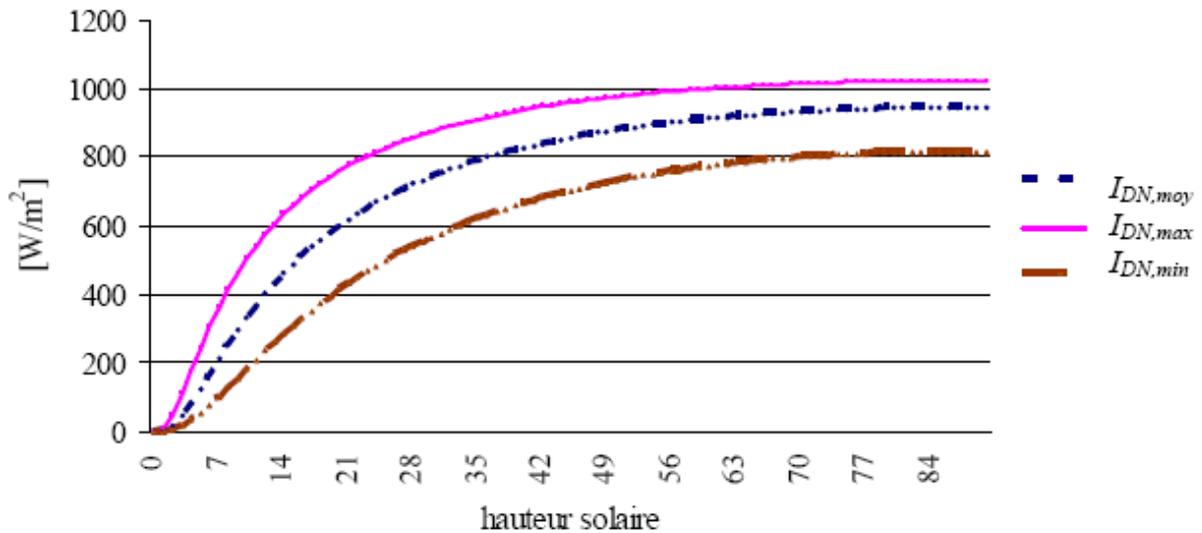


FIGURE II.22: Valeurs du rayonnement direct I_{DN} en fonction de la hauteur du soleil pour conditions moyennes et extrêmes de trouble.

II.5.3 Masse d'air

La définition la plus simple de la masse d'air est le parcours relatif d'un rayon de lumière solaire à travers l'atmosphère.

La variation de la densité de l'air doit être connue. En tenant compte de la courbure de la terre, et la réfraction de l'atmosphère, Kasten [16] a trouvé une formule dérivée de l'équation :

$$m = \frac{1}{\rho_0 z_0} \int_0^\infty \left[1 - \left(\frac{r_e}{r_e + z_0} \right)^2 \left(\frac{n_0}{n} \right)^2 \sin^2 h \right]^{-\frac{1}{2}} \rho dz \quad (\text{II-27})$$

h : Hauteur du soleil

ρ : Masse volumique, $\rho = \rho(z)$ et $\rho_0 = \rho(0)$.

n : Indice de réfraction, $n = n(z)$ et $n_0 = n(0)$.

z_0 : Hauteur de l'atmosphère homogène

r_e : Rayon de la terre.

II.5.4 Trouble atmosphérique

Dans la méthode de Linke, on introduit le facteur de trouble total T_L , défini comme le nombre atmosphérique pures et sèches (sans aérosol, ni vapeur d'eau, ni nuage) c'est-à-dire la manifestation uniquement l'absorption et la diffusion les constituants de l'atmosphère (O_2 , CO_2 , gaz rares, cts...)

Le facteur de trouble Linke T_L permet une évaluation de l'extinction atmosphérique par les gaz et l'aérosol selon la formule suivante [17] :

$$T_L = 2,4 + 14,6 \beta + 0,4(1 + 2 \beta) \ln P_v \quad (\text{II} - 28)$$

Avec : P_v : la pression partielle de vapeur d'eau.

β : coefficient de trouble (turbidité).

II.6 Estimation solaire instantanée

L'éclairement solaire direct S sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs méthodes en fonction des données disponibles.

Nous avons comparé les efficacités géométriques de différents collecteurs en examinant la constance avec laquelle chacun d'eux recueille l'énergie solaire pendant une journée ou un an, indépendamment de leurs dimensions, de l'énergie reçue, de la concentration, et de l'utilisation ultérieure du flux capté. Nous avons pour cela choisi l'heure équivalente comme unité d'énergie.

Nous avons considéré cinq (5) types fondamentaux :

- Capteur asservis sur le soleil,
- Capteur fixe,
- miroir cylindrique fixe à facettes,
- Capteur mobile autour d'un axe (miroir Cyliindroparabolique par exemple),
- miroir sphérique fixe.

Nous avons tenu compte de l'absorption différentielle de l'atmosphère, en considérant une atmosphère moyenne et sans nuages.

II.6.1 Calcul du rayonnement solaire direct normal

Le rayonnement solaire direct arrive à traverser l'atmosphère mais subit malgré tout atténuation de son intensité. Le calcul ce rayonnement suit des différents méthodes parmi c'est méthode :

- La pression atmosphérique en fonction de l'altitude du point local [16]

$$P_{atm} = P_0 \left(1 - \frac{2,26 z}{10^{-5}}\right)^{5,26} \quad (\text{II} - 29)$$

z : Altitude en mètre

- Définition de la pression de la vapeur saturante P_{vs} [16], le taux moyen d'humidité relative HR et la pression partielle de vapeur d'eau P_v

$$P_{vs} = 2,165 \left(1,098 + \frac{T_{amb}}{100}\right)^{8,02} \quad (\text{II} - 30)$$

$$P_v = 611 \exp\left(\frac{T_{amb}}{0,059 T_{amb} + 13,706}\right) \quad (\text{II} - 31)$$

$$\overline{HR} = 50 \%$$

38

$$P_v = P_{vs} \overline{HR} \quad (\text{II} - 32)$$

T_{amb} : Température de l'air en °C.

- La masse d'air optique relative m d'où en découle l'épaisseur optique de Rayleigh ER qui détermine l'atténuation due à la diffusion, la solution de l'équation (II - 27) a été faite par

Kasten [16].

$$m = \frac{P_{atm}}{P_0 \sin h + 1519,75(3,885+h)^{-1,253}} \quad (\text{II} - 33)$$

Où Dans l'atlas solaire, Capderou [12] a utilisé la formule suivante:

$$m = \frac{1}{\sin h + 9,40 \cdot 10^{-4} (\sin h + 0,0678)^{-1,253}} \quad (\text{II} - 34)$$

$$E_R = \frac{1}{(0,9m + 9,4)} \quad (\text{II} - 35)$$

Où h est la hauteur du soleil en degré.

- Le facteur de trouble de Linke :

$$T_L = 2,4 + 14,6 \beta + 0,4(1 + 2 \beta) \ln P_v \quad (\text{II} - 36)$$

Où β est le coefficient de trouble atmosphérique qui prend les valeurs de :

$\beta = 0,02$ pour un lieu en montagne ;

$\beta = 0,05$ pour un lieu rural ;

$\beta = 0,10$ pour un lieu urbain ;

$\beta = 0,20$ pour un lieu industriel (atmosphère polluée).

Le rayonnement solaire sur un plan récepteur normal à ce rayonnement vaut donc :

$$I_{DN} = I_{SC} \exp(-E_R m T_L) \quad (\text{II} - 37)$$

En simplifier l'obtention :

$$I_{DN} = I_{SC} \exp\left(-\frac{T_L}{0,9 + 9,4 \sin h}\right) \quad (\text{II} - 38)$$

11.6.2 Calcul du rayonnement solaire diffus

Le rayonnement solaire diffus arrive sur le plan récepteur après avoir été réfléchi par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol, on suppose que le rayonnement solaire diffus n'a pas une direction bien déterminé, l'orientation du plan récepteur n'a pas importance, seul l'inclinaison en tenir compte [12].

39

$$D = 125 \sin(h)^{0,4} \left(1 + \frac{\cos i}{2}\right) + 211,86 \sin(h)^{1,22} \left(\frac{1 - \cos i}{2}\right) \quad (\text{II} - 39)$$

Où par l'utilisation de la corrélation suivante en l'absence de toute mesure [12] :

$$D = 54,8 \sqrt{\sin(h)} \left[T_L - 0,5 - \sqrt{\sin(h)}\right] \quad (\text{II} - 40)$$

II.6.3 Calcul du rayonnement solaire global

La somme de deux rayonnements représente le rayonnement global [11] :

$$G = S + D \quad (\text{II} - 41)$$

Où S est la valeur de rayonnement solaire direct sur un plan récepteur qui égal à :

$$S = I_{DN} \cos \gamma \quad (\text{II} - 42)$$

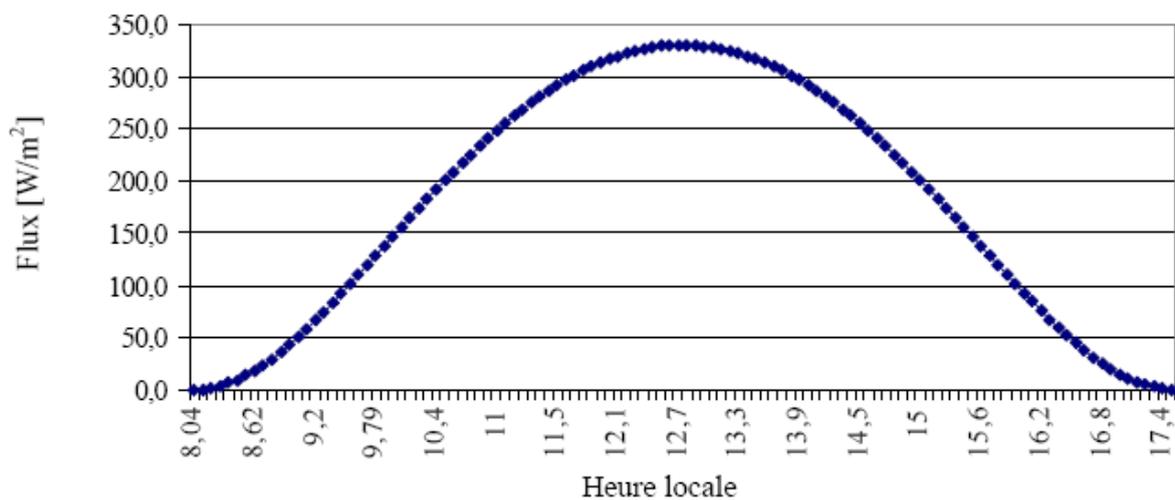


FIGURE II.23 : La variation de l'éclairement direct au cours de la journée du 22/12/04 à Latitude de 36,77, longitude de 3,70 sur un plan horizontal.

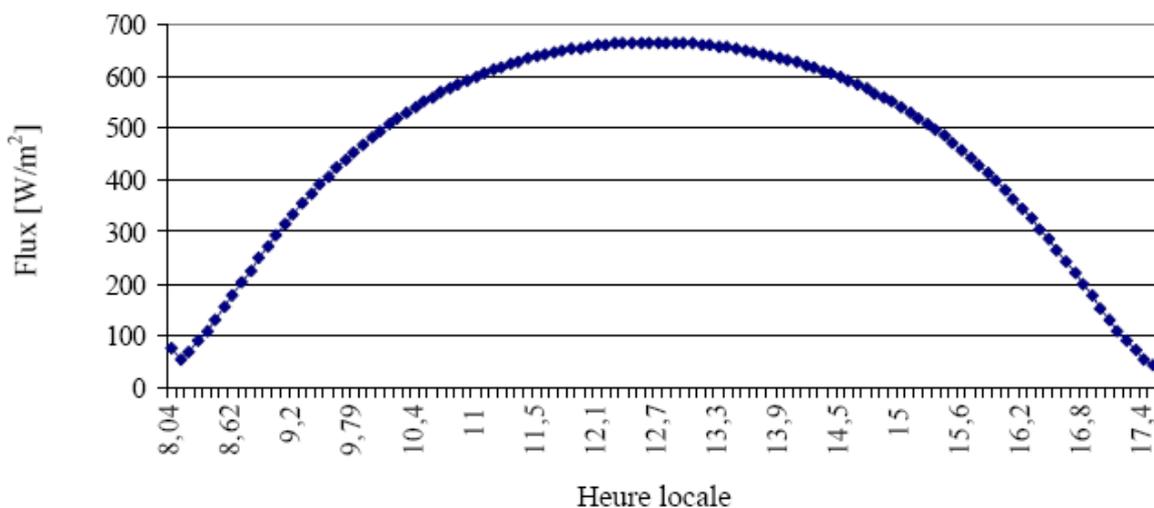


FIGURE II.24: La variation de l'éclairement direct perpendiculaire à la surface au cours de la journée du 22/12/04 à latitude de 36,77, longitude de 3,70.

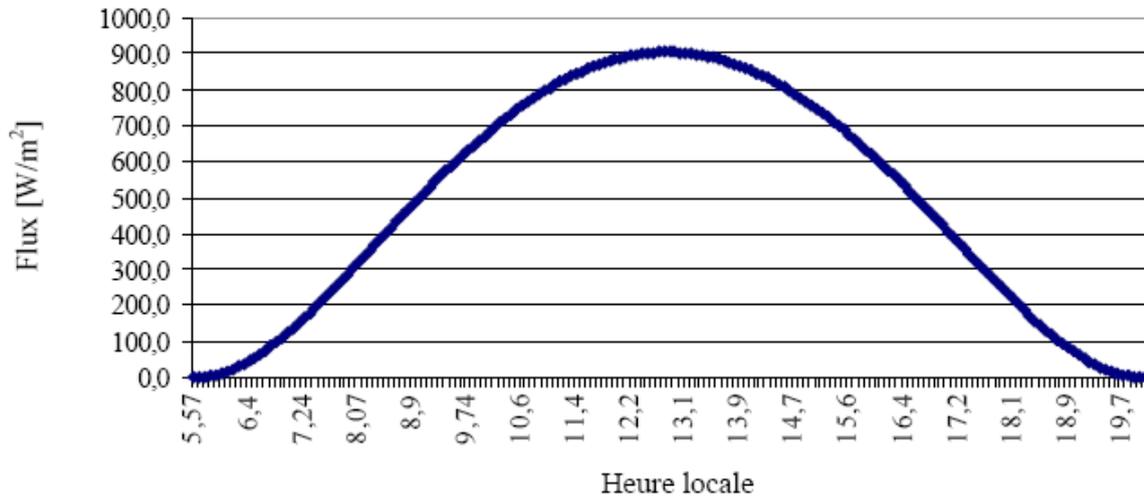


FIGURE II.25: La variation de l'éclairement direct au cours de la journée du 22/06/04 à latitude de 36,77, longitude de 3,70 sur un plan horizontal.

41

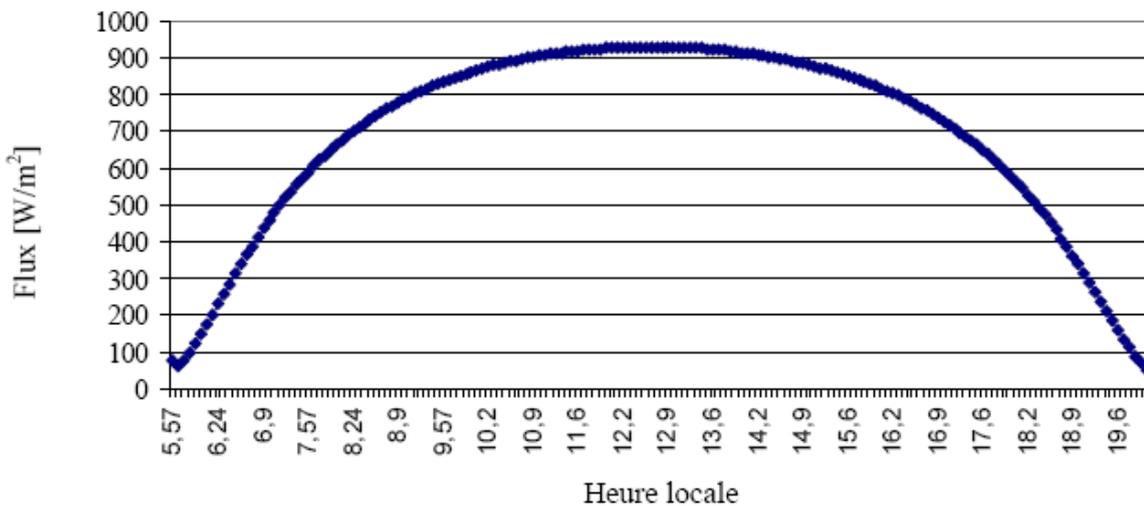


FIGURE II.26: La variation de l'éclairement direct perpendiculaire a la surface au cours de la journée du 22/06/04 à latitude de 36,77, longitude de 3,70.

II.7 Conclusion

L'utilité d'étudier le rayonnement solaire nous a permis de connaître les meilleurs lieux afin d'installer

les capteurs solaires.

La variation de l'éclairement solaire direct pour un concentrateur qui suit la course du soleil durant la journée soit en hiver ou en été a été estimée avec des différentes méthodes, parmi elles ont utiliser la formule de KASTEN [12] pour estimer le rayonnement solaire direct.

On remarque que l'éclairement solaire direct reçu par la calotte sphérique dont l'axe optique est toujours parallèle au rayonnement solaire est plus important que celui reçu sur un plan horizontal voir les figures (II.23, II.24, II.25, II.26)

Le gain en éclairement dû à la poursuite du soleil est de l'ordre de 45% en hiver et de 20% en été.

Cela est dû à la variation de la hauteur angulaire du soleil en fonction de la saison, ceci montre bien l'importance de la poursuite pour des faibles hauteurs du soleil.

CHAPITRE III

LES CAPTEURS SOLAIRES THERMIQUES

Avant l'étude théorique du capteur considéré, nous devons passer par une synthèse sur le principe de fonctionnement des capteurs solaires et les différents types de capteurs.

III.1 Capteurs solaires

III.1.1 Principe

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, etc...).

L'énergie solaire (rayonnement) est captée par la surface absorbante du capteur solaire. Dans de nombreux types de capteurs, les revêtements sélectifs sont appliqués sur les surfaces absorbantes pour augmenter l'efficacité. Un fluide caloporteur absorbe et véhicule une partie de l'énergie captée par l'absorbeur.

III.1.2 Différents types de capteurs solaires

Il existe des différents types de capteurs solaires pour chauffer les liquides. Leur choix dépend de la température désirée, de l'eau chaude et des conditions climatiques pendant la période d'utilisation du système. Les technologies les plus courantes sont : les capteurs à liquide plans sans vitrage, les capteurs à liquide plans vitrés, les capteurs à concentration et les capteurs solaires à tubes sous vide.

III.1.2.1 Capteurs plans à liquide sans vitrage

Les capteurs plans sans vitrage, sont ordinairement faits de plastique polymère noir. Normalement, ils n'ont pas de revêtement sélectif et n'ont ni cadre ni isolation en arrière. Ils sont simplement posés sur un toit ou sur un support en bois. Ces capteurs de faible coût captent bien l'énergie solaire, cependant les pertes thermiques vers l'environnement augmentent rapidement avec la température de l'eau, particulièrement dans les endroits venteux en conséquence [23]. Les capteurs sans vitrage sont couramment utilisés pour des applications demandant une fourniture d'énergie à basse température (piscines, eau d'appoint en pisciculture, chaleur industrielle, etc.); dans les climats froids, ils sont habituellement utilisés exclusivement durant l'été à cause de leurs pertes thermiques élevées.

III.1.2.2 Capteurs plans à liquide avec vitrage

Dans les capteurs à liquide plans avec vitrage, comme il est montré dans la figure III.3, une plaque absorbante (qui souvent est recouverte d'un revêtement sélectif) est fixée dans un cadre entre un vitrage simple ou double et un panneau isolant placé à l'arrière. L'énergie solaire est ainsi emprisonnée dans le capteur à cause du vitrage (effet de serre). Ces capteurs sont couramment utilisés pour des applications à températures modérées (chauffage de l'eau sanitaire, chauffage de locaux, chauffage de piscines intérieures ouvertes toute l'année et chauffage pour procédés industriels).

III.1.2.3 - Capteurs solaires à tubes sous vide

Les capteurs solaires à tubes sous vide, comportent un absorbeur revêtu d'une surface sélective et enfermé sous vide dans un tube en verre. Ils captent bien l'énergie solaire et leurs pertes thermiques vers l'environnement sont extrêmement faibles. Les systèmes présentement sur le marché utilisent un caloduc pour extraire la chaleur de l'absorbeur (un liquide se vaporise au contact de l'absorbeur chaud, la chaleur est récupérée dans la tête du tube lorsque la vapeur s'y condense et le condensat, retourne par gravité à l'absorbeur). Les capteurs sous vide sont bien adaptés aux applications requérant la fourniture d'énergie à des températures moyennes ou hautes (eau chaude domestique, chauffage de locaux et applications de chauffage industriel dans des gammes de températures de 60 °C à 80 °C, selon la température extérieure), en particulier dans les climats froids.

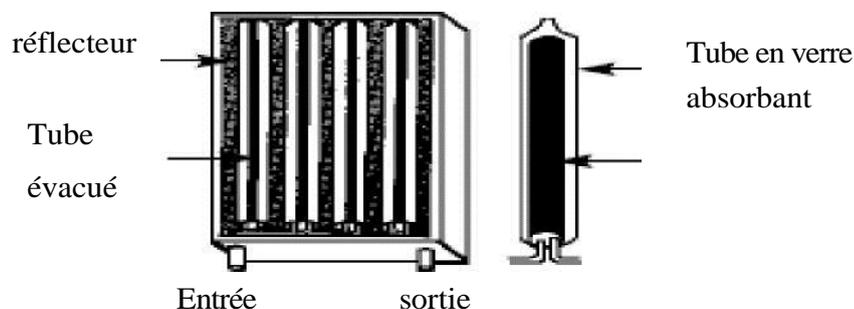


FIGURE III.1: Capteurs solaires à tubes sous vide

III.1.2.4 Capteur solaire à concentration

Ce type de capteur solaire réfléchit et focalise le rayonnement solaire reçu directement sur l'absorbeur de manière à accroître l'intensité des rayons solaires. Par conséquent, l'usage de ce type de capteur permet d'obtenir des températures supérieures à celles que peut réaliser le capteur plan.

On distingue deux types de concentration :

- 1) Les systèmes qui peuvent concentrer le rayonnement autour d'une ligne appelés concentration linéaire ou concentrateurs à deux dimensions. Il s'agit pour l'essentiel des lentilles

2) cylindriques réfléchissantes réglées.

3) Les systèmes pouvant concentrer la lumière autour d'un point, appelés concentrateurs ponctuels ou concentrateurs à trois dimensions. Ces systèmes présentent une symétrie de révolution autour d'un axe.

Les systèmes à concentration présentent un certain nombre d'inconvénients :

- Les pertes optiques peuvent être importantes. Elles sont dues aux phénomènes de réflexion et de réfraction et aux caractéristiques géométriques du système ;
- Le rayonnement diffus est très mal utilisé dans les systèmes à forte concentration, seul le rayonnement direct est concentré ;
- Les systèmes à forte concentration nécessitent des montages optiques précis et par conséquent relativement chers ;
- Il faut aussi maintenir les qualités optiques du système (contre l'oxydation,) ;
- Dans la plupart des cas, le flux n'est pas distribué de façon uniforme sur l'absorbeur ;
- L'absorbeur est soumis à de grandes variations de température lors des passages nuageux ;
- Les systèmes à forte concentration ont un champ étroit. Il est donc nécessaire de pointer pour capter le rayonnement direct et ceci demande des mécanismes d'orientation.

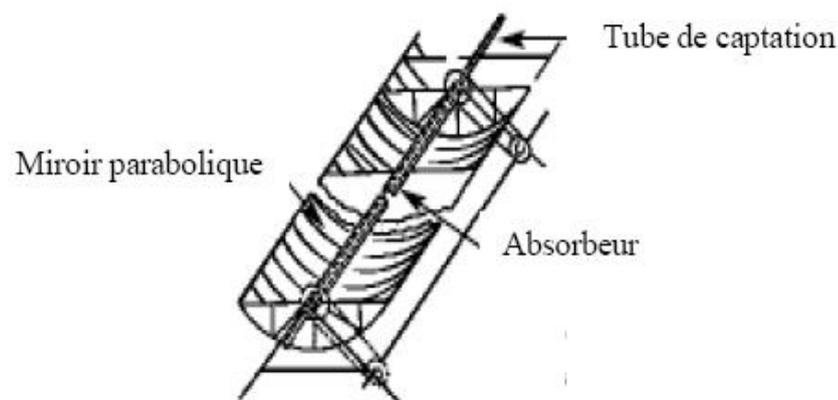


FIGURE III.2: Capteur solaire à concentration

III.1.3 Le schéma de principe d'un capteur solaire plan simple vitrage

Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure III.3.

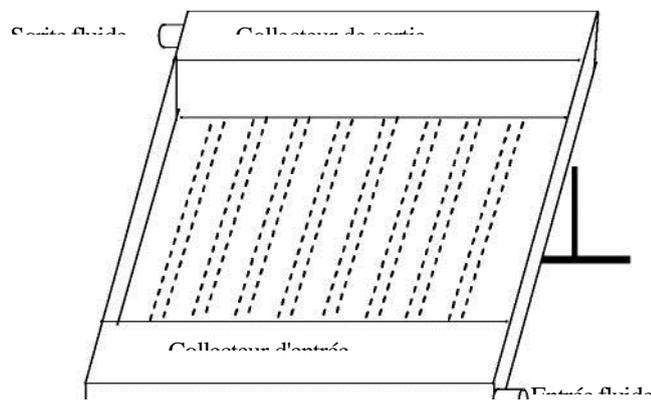


FIGURE III.3: Le schéma de principe d'un capteur solaire plan

CHAPITRE IV

CONCENTRATEURS SOLAIRES

IV.1 Introduction

La concentration du rayonnement solaire sur un seul foyer permet d'atteindre des températures élevées. Ce principe met en œuvre soit des capteurs de forme parabolique ou cylindroparabolique, soit des centrales dites « à tour », pour lesquelles une multitude de miroirs orientables, appelés héliostats, concentrent l'énergie solaire sur une chaudière unique située sur une tour. Cela rend possible le réchauffement de fluides caloporteurs, en général de l'huile ou des sels fondus, dans une gamme de température allant de 250 °C à 2000°C, avec un rendement supérieur à 70% (rapport chaleur utile/énergie incidente).

Les capteurs plans ne permettent pas, en général de dépasser 130°C au niveau de la surface absorbante. Cette température peu élevée constitue une limite au rendement thermodynamique des systèmes de 50 m² par kW, et ces capteurs ne sont donc pas adaptés à la production de fortes puissances. Pour augmenter le rendement, il faut élever la température de la source chaude et par conséquent, concentrer le rayonnement solaire en acceptant de perdre le bénéfice du rayonnement diffus parce que n'ayant pas de direction privilégiée.

Par contre les concentrateurs sphériques dont la conception est relativement simple et moins efficace par rapport aux concentrateurs paraboloides et meilleurs par rapport aux concentrateurs cylindroparabolique [22].

L'optique géométrique repose sur deux lois fondamentales :

- Propagation rectiligne de la lumière : dans un milieu transparent, homogène et isotrope, la lumière se propage en ligne droite.
- Principe du retour inverse de la lumière : si la lumière suit un trajet quelconque d'un point A à un point B (y compris dans un système optique), alors la lumière peut suivre exactement le trajet inverse de B vers A. autrement dit, le sens de parcours change, mais pas la direction.

IV.2 Principes

IV.2.1 Lois de Descartes relatives à la réflexion

1°- Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale au miroir se trouvent dans un même plan appelé plan d'incidence.

2°- l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence illustré par la figure **IV.1**.

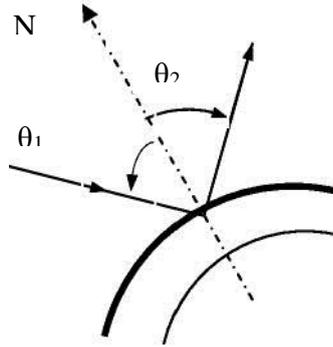


FIGURE IV.1: Réflexion d'un rayon lumineux

IV.2.2 Stigmatisme

Un système optique est dit stigmatique si tout faisceau issu d'un point lumineux donne à la sortie du système, un faisceau convergent en un point, ou semblant provenir d'un point. Ce point est appelé image montrer par la figure IV.2. [18]

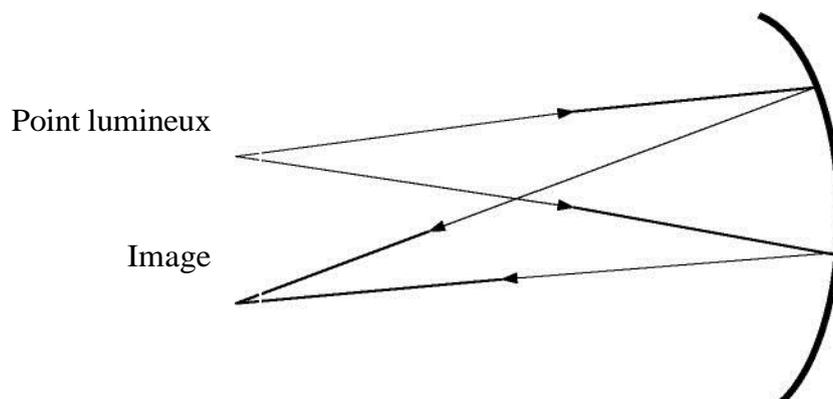


FIGURE IV.2: Stigmatisme

IV.2.3 Définition de la concentration

C'est un indicateur de la quantité de concentration réalisé par un collecteur donné, nous avons trois types de concentration [22] :

1. Concentration idéale (Gauss)
2. Concentration géométrique.
3. Concentration optique (énergétique)

IV.2.3.1 Concentration idéale (Gauss)

C'est le rapport de la section d'ouverture du concentrateur (réflecteur) A_{ref} caractérisée par l'angle d'ouverture Θ et la surface d'image de Gauss du soleil A_G [22].

$$C_{ideal} = \frac{A_{ref}}{A_G} \quad (IV - 1)$$

$$\text{Avec : } A_G = \pi f^2 \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2$$

IV.2.3.2 Concentration géométrique

C'est le rapport de la surface de l'ouverture du réflecteur A_{ref} à celle de l'absorbeur A_{abs} , elle est donnée par la formule :

$$C_g = \frac{A_{ref}}{A_{abs}} \quad (IV - 2)$$

IV.2.3.3 Concentration optique (Energétique)

C'est le rapport de l'éclairement solaire direct moyen sur la surface de l'absorbeur sur l'éclairement solaire direct de l'ouverture du réflecteur, elle est donnée par la formule [22]:

$$C_0 = \frac{\frac{1}{A_{abs}} \int A_{ads} dA_{abs}}{I_{ref}} \quad (IV - 3)$$

IV.3 Description le principe d'un concentrateur

La figure IV.3 définit les différentes grandeurs géométriques d'un capteur à concentration [18]:

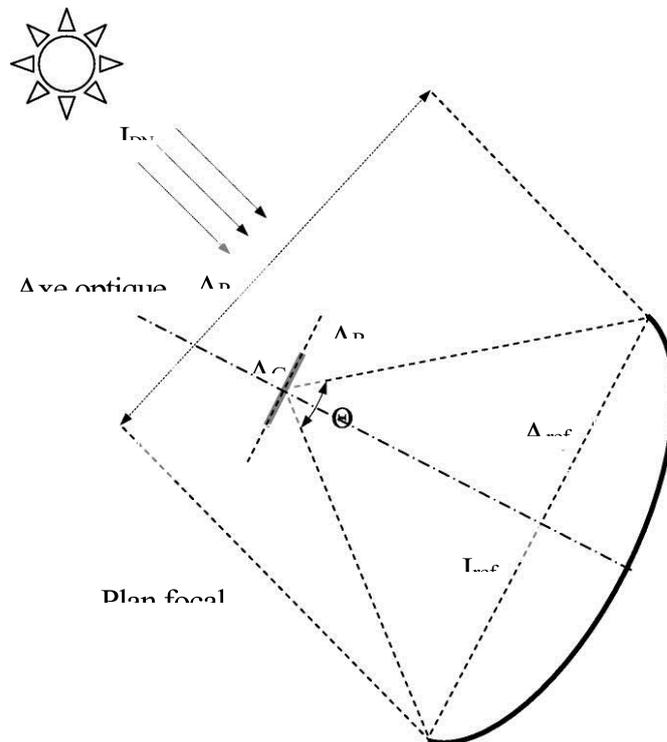


FIGURE IV.3 : Schéma d'un capteur solaire à concentration

Θ : L'angle d'ouverture du concentrateur, c'est l'angle par lequel on voit le concentrateur à partir du plan focal, il est relevé dans un plan contenant l'axe optique et dépend de l'orientation de ce plan, sauf pour les concentrateurs à révolution.

I_{DN} : Eclairement solaire direct [W/m^2].

I_{ref} : Eclairement solaire direct dans la section d'ouverture du concentrateur [W/m^2]. A_{ref}

: Section d'ouverture du concentrateur caractérisée par l'angle. [m^2].

A_p : section de passage du rayonnement solaire entrant dans le concentrateur. A_p se confond avec A_{ref} quand l'axe optique du concentrateur est dirigé vers le soleil,

A_G : surface de l'image de Gauss du soleil; c'est l'image nette du soleil dans le plan focal donnée par des rayons paraxiaux, c'est-à-dire des rayons proches de l'axe optique,

A_R : surface de l'image réelle du soleil dans le plan focal.

IV.4 Formules de calcul des différentes concentrations

On utilise les formules suivantes pour caractériser les différents types de concentrations [18] :

1. Concentration idéale:

$$C_{ideal} = \frac{A_{ref}}{A_G} = \frac{\text{Section de réflecteur}}{\text{surface de Gauss}} \quad (\text{IV} - 4)$$

2. Concentration géométrique :

$$C_g = \frac{A_{ref}}{A_R} = \frac{\text{Section de réflecteur}}{\text{surface image réelle du soleil}} \quad (\text{IV} - 5)$$

3. Concentration énergétique :

$$C_0 = \frac{I_G}{I_{ref}} = \frac{\text{flux moyen en Gauss}}{\text{flux direct en section de réflecteur}} \quad (\text{IV} - 6)$$

4. Efficacité d'un concentrateur :

$$\eta_{con} = \frac{C_0}{C_{ideal}} = \frac{\text{concentration optique}}{\text{concentration idéale}} \quad (\text{IV} - 7)$$

5. Facteur de four :

$$FF = \frac{C_{0, effective}}{C_0} = \frac{\text{concentration optique effective}}{\text{concentration optique}} \quad (\text{V} - 8)$$

Avec $C_{0, effective}$ la concentration énergétique réelle d'un système elle tient compte des pertes dues aux réflexions, aux irrégularités géométriques et la présence des masques [18].

IV.5 L'importance de la concentration solaire [19, 20, 21]

Le tableau résume les avantages et les inconvénients des systèmes à concentration comparés aux capteurs plans.

Avantages

- 1- Les surfaces réfléchissantes nécessitent. Moins de matière et sont structurellement plus simple que les collecteurs plans ; le coût au m² de l'échangeur thermique est inférieur avec un système a concentration.
- 2- L'aire d'absorption d'un système a concentration est plus faible que celle d'un capteur plan pour la même surface collectrice Du rayonnement solaire (surface spécifique plus faible).
- 3- Parce que l'aire d'absorbeur est plus petite que celle d'un capteur plan, la densité d'énergie au niveau de l'absorbeur, est supérieure, donc le fluide caloporteur peut travailler à température plus élevées pour la même surface captatrice d'énergie.
- 4- À cause de la moindre surface spécifique de l'absorbeur, on peut utiliser des surfaces a absorption sélective ou même une isolation par le vide pour réduire les pertes thermiques et augmenter le rendement de manière économique.

Inconvénients

- 1- On collecte peu ou pas du tout de rayonnement diffus.
- 2- Dans les systèmes réfléchissants stationnaires, il faut ajuster périodiquement soit le concentrateur soit le récepteur thermique selon l'époque de l'année. Le rendement est plus faible que pour les systèmes à poursuite qui, par contre, sont plus coûteux.
- 3- Dans les systèmes a poursuite a chaudière mobile, il faut au moins une connexion flexible pour extraire le fluide chaud de l'échangeur thermique, d'où nécessité d'un entretien périodique et source de pannes possible.
- 4- Le pouvoir réflecteur des miroirs décroît dans le temps et il faut les réargenté ou le repolir.
- 5- Il existe encore peu de réalisations de

5- les systèmes a concentration peuvent être

utilisés a la production d'énergie électrique.

Le nombre d'heures annuel de

grande puissance a réflecteur stationnaire a haute concentration et des recherches

fonctionnement est plus élevé que celui d'un collecteur plan. Le surcoût de l'installation

supplémentaires sont nécessaires pour étudier la fiabilité et la maintenance de tels systèmes.

peut s'amortir en un temps plus court par un gain supplémentaire en énergie.

6- Parce que la température atteinte avec les systèmes à concentration est plus élevée, la quantité de chaleur qui peut être stockée est plus grande et par conséquent, le coût du stockage est plus faible pour des systèmes à concentrateurs qu'à capteurs plans.

7- Pour les applications des chauffages et de climatisation, la température plus élevée du fluide caloporteur atteinte avec les systèmes à concentration permet d'obtenir des rendements plus élevés pour le cycle de refroidissement que dans les systèmes à collecteurs plans, donc ces systèmes sont plus économiques.

8- En cas de non fonctionnement en hiver, il faut moins d'antigel dans les systèmes à concentration que dans les systèmes à capteurs plans. la fiabilité et la maintenance de tels systèmes.

IV. 6.1 Paraboloïde

IV.6.1.1 Propriétés

Un paraboloïde de révolution illustré par la figure IV.4 s'obtient par rotation d'une parabole autour de son axe. Rappelons ici quelques propriétés de cette courbe [18].

Cette surface est dite stigmatique (tout rayon parallèle à l'axe optique converge, après réflexion, en point F appelé foyer). Parmi les propriétés de la parabole est l'égalité suivante, vraie pour tout point M situé sur la parabole : $FM = MM'$

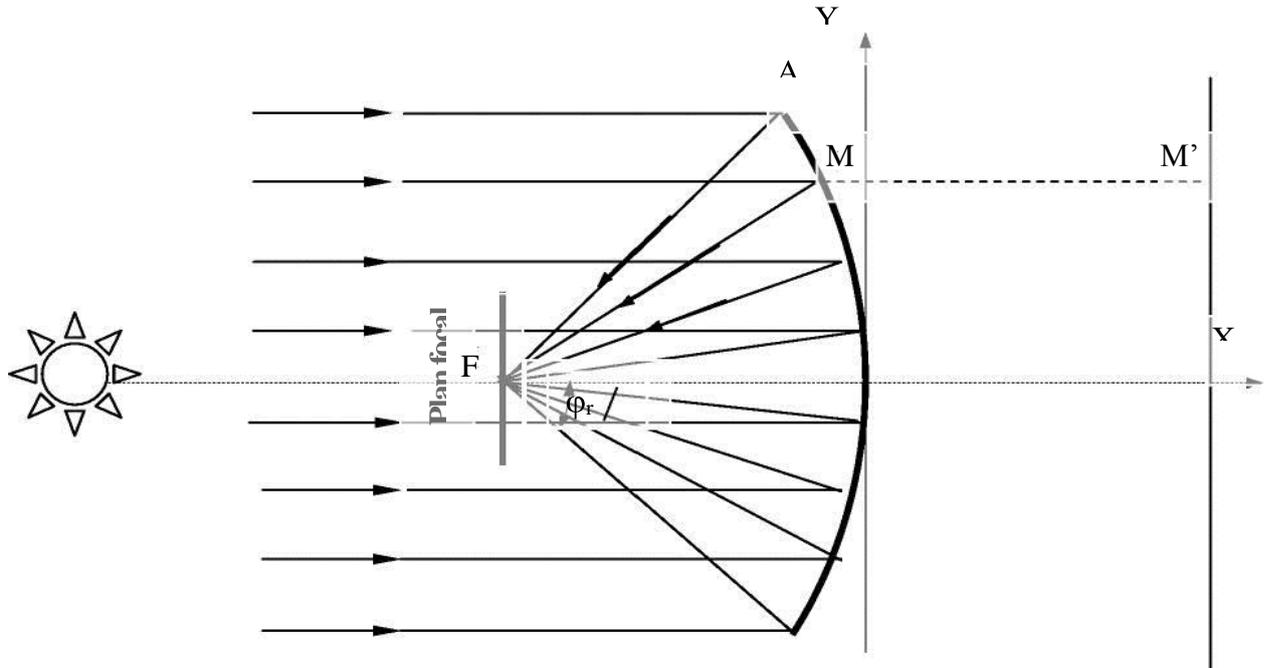


FIGURE IV.4 : Coupe d'un paraboloïde de révolution

IV.6.1.2 Concentration idéale

La concentration idéale est calculée par :

$$A_{ref} = \pi Y_A^2 \quad (\text{IV} - 9)$$

et que

$$A_G = \frac{\pi}{4} f^2 \varepsilon^2 \quad (\text{IV} - 10)$$

de plus :

$$\tan \frac{\theta}{4} = \frac{Y_A}{2f} \quad (\text{IV} - 11)$$

D'où finalement on obtient la formule suivante [8] :

$$C_{\text{idéale}} = \left(\frac{4}{\varepsilon} \tan \frac{\theta}{4} \right)^2 \quad (\text{IV} - 12)$$

IV.6.1.3 Concentration géométrique

Par définition :

$$C_g = \left(\frac{\sin \theta}{\varepsilon} \right)^2 \quad (\text{IV} - 13)$$

En se référant à la figure IV.6, on pose :

FJ=Y et FA= ρ_0

On peut écrire:

$$Y = \rho_0 \frac{\varepsilon}{2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

Et avec:

ε : L'angle sous lequel on voit le soleil à partir de la terre, comme illustré dans la figure IV.5.

$\varepsilon = 9,3 \cdot 10^{-3}$ rad. [24]

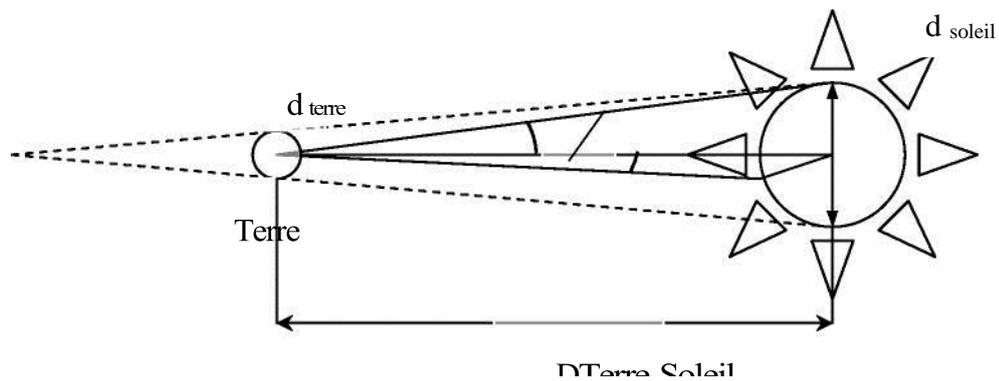


FIGURE IV.5 : Le diamètre apparent du soleil est $\varepsilon = 32'$

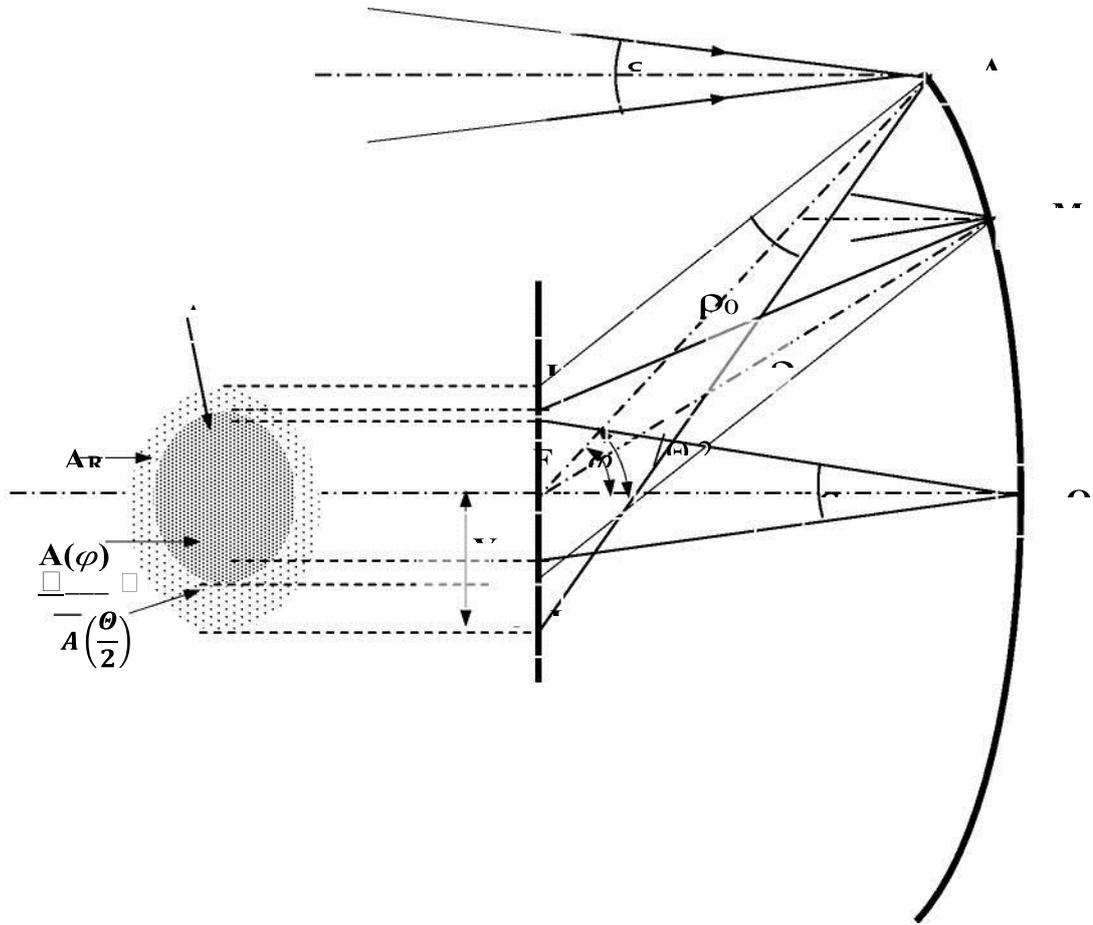


FIGURE IV.6: Coupe d'un paraboloid de révolution montrant les projections dans le plan focal de l'image du soleil

L'image du soleil sur le plan focal montré par la figure IV.7 a pour surface [18]:

$$A_R = \pi Y^2 \tag{IV - 14}$$

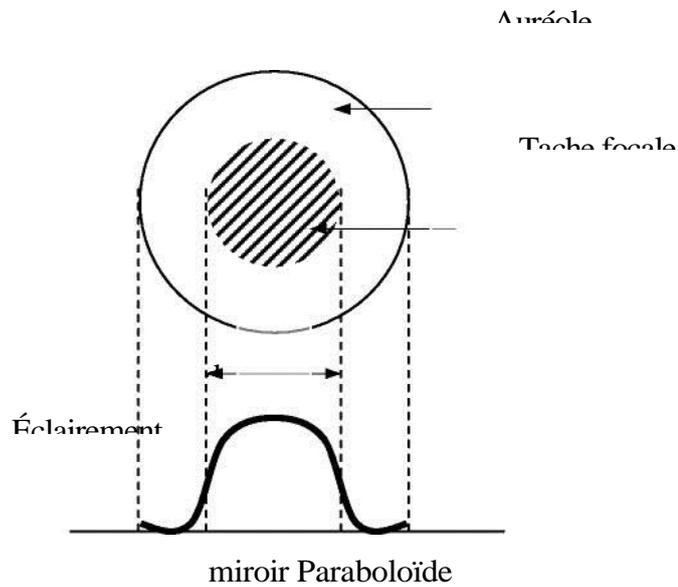


FIGURE IV.7 :

Image de Gauss d'un

miroir Paraboloid

IV.6.1.4 Concentration optique

Par définition [18] :

$$C_0 = \left(\frac{2}{\varepsilon} \sin \frac{\theta}{2} \right)^2 \quad (\text{IV-15})$$

L'efficacité du paraboloïde comme concentrateur des rayons solaires s'écrit [13] :

$$\eta = \frac{C_0}{C_{id\acute{e}ale}} = \cos^4 \left(\frac{\theta}{4} \right) \quad (\text{IV-16})$$

La concentration énergétique sera maximale pour $\Theta = \pi$ et on retrouve alors:

$$C_{\max} = 46165 \quad \text{Avec : } \eta_{\max} = 25\%.$$

IV.6.2 Cyllindroparabolique

IV.6.2.1 Propriétés

Les miroirs ayant la forme d'un cylindre droit parabolique (Cyllindroparabolique), de construction facile et moins coûteux, sont utilisés dans de nombreux montages. Cependant Ils ne permettent pas d'atteindre des facteurs de concentration élevés.

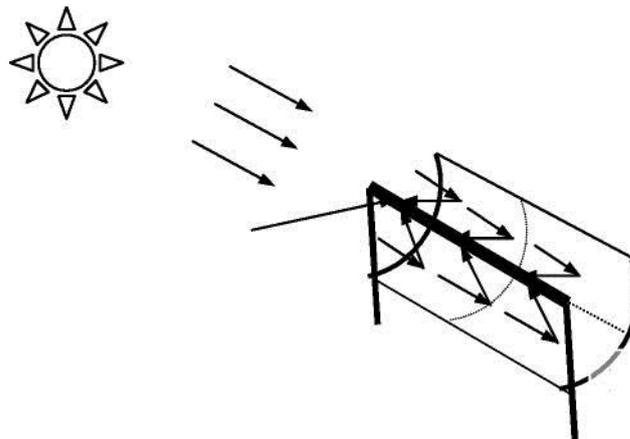


FIGURE IV.8 : Tube absorbeur

Capteur Cyllindroparabolique

IV.6.2.2 Concentration idéale

En appelant L la longueur du concentrateur, la section

Déflecteur d'ouverture s'écrit:

$$A_{ref} = 4fL \tan \frac{\theta}{4} \quad (\text{IV-17})$$

L'image de Gausse a pour surface [18] :

$$A_G = f\varepsilon \quad (\text{IV-18})$$

D'où la concentration idéale ($L = 1$) :

$$C_{\text{idéal}} = \left(\frac{4}{\varepsilon} \tan \frac{\theta}{4} \right)^2 \quad (\text{IV} - 19)$$

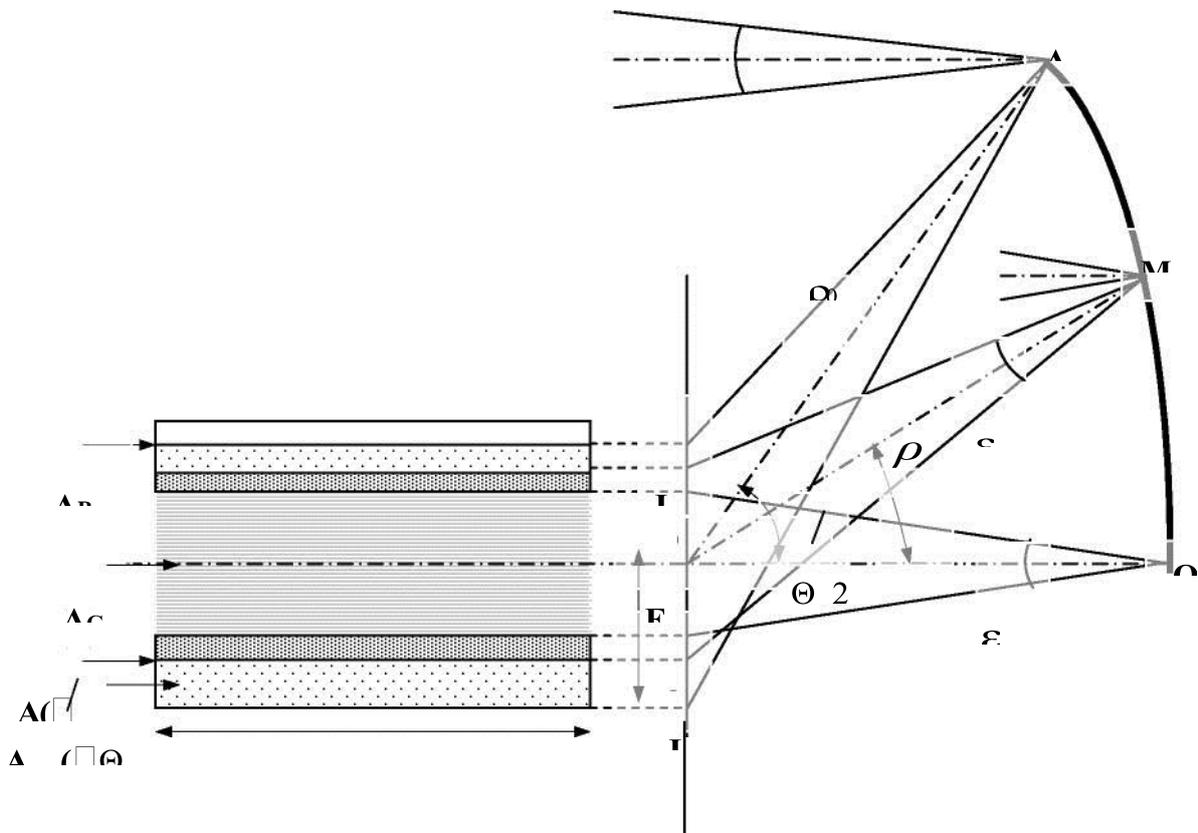


FIGURE IV.9 : Coupe méridienne d'un demi-concentrateur cylindroparabolique

IV.6.2.3 Concentration géométrique

En posant $FJ = Y$ et $AF = \rho_0$

On a :

$$Y \approx \frac{\rho_0}{2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}, A_R = 2YL$$

$$A_{ref} = 2L\rho_0 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

On trouve :

$$C_g = \frac{\sin \theta}{\varepsilon} \quad (\text{IV} - 20)$$

IV.6.2.4 Concentration optique

$$C_0 = \frac{2}{\varepsilon} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (\text{IV} - 21)$$

La concentration énergétique sera maximale pour $\Theta = \pi$ et on retrouve alors:

$C_{\text{max}} = 215$ avec $\eta_{\text{max}} = 50\%$.

IV.6.2.5 Montage

Il existe deux types de montage d'un capteur cylindroparabolique [18]:

1. le premier montage suivant l'axe du monde tel que le tube récepteur est parallèle à l'axe de rotation de la terre. Le suivi du soleil nécessite un simple asservissement en rotation autour de cet axe.
2. le montage est-ouest. Il faut orienter le capteur vers le soleil deux ou trois fois par jour pour optimiser la réception du rayonnement. Le rendement de captation est moins bon qu'avec le montage est-ouest asservi en rotation.

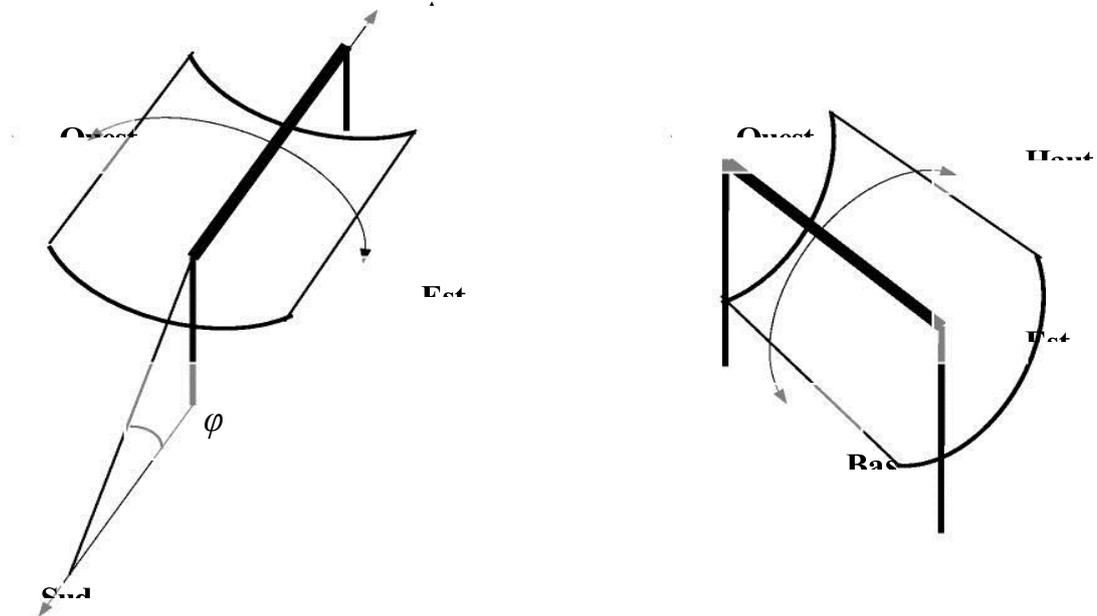


FIGURE IV.10: Montage d'un capteur cylindroparabolique, - (à gauche)-suivant le Sud, - (à droite)-suivant la direction Est-Ouest

IV.6.3 Centrale à tour

Les centrales solaires ou hélio thermodynamiques transforment l'énergie lumineuse en provenance du soleil dans un premier temps en énergie thermique puis dans un deuxième temps en électricité. La voie thermodynamique oblige à satisfaire au principe de Carnot. Il sera donc nécessaire d'élever au maximum la température de la source chaude pour accroître le rendement [13].

IV.6.3.1 Description de système

La concentration du rayonnement solaire peut être réalisée au moyen de récepteur cylindroparabolique pour des températures moyennes ou bien, pour des températures plus élevées, par un champ d'héliostats qui renvoie le rayonnement vers une chaudière placée en haut d'une tour [13].

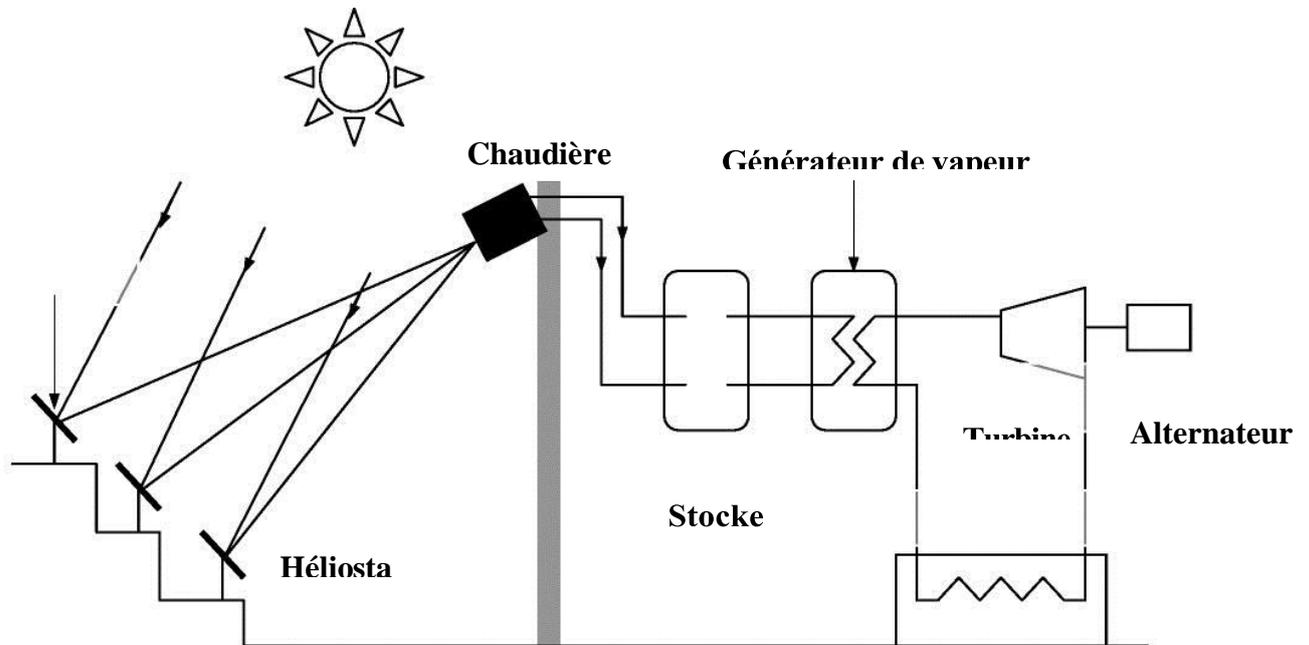


FIGURE. IV.11 : Schéma de principe d'une centrale à tour

IV.6.3.2 Le rendement thermique

La puissance de la chaudière P_{ch} est égale à la puissance solaire absorbée diminuée des pertes thermiques. Exprimons les grandeurs suivantes relatives à la chaudière :

\dot{Q}_{abs} : Flux solaire moyen dans l'ouverture,

A_p : Section de passage du rayonnement solaire, α_{abs}

: Facteur d'absorption solaire,

ε_{abs} : Facteur d'émission infrarouge,

T_{abs} : Température moyenne des parois intérieures,

T_{amb} : Température ambiante,

Si on ne considère que les pertes par rayonnement, les parois extérieures de la chaudière étant bien isolées, on peut écrire :

$$P_{ch} = \dot{Q}_{abs} A_p \alpha_{abs} - \varepsilon_{abs} \sigma (T_{abs}^4 - T_{amb}^4) A_p \quad (IV - 22)$$

Le rendement de la chaudière (absorbeur) s'écrit :

$$\eta = \frac{P_{ch}}{\dot{Q}_{abs} S_p} = \alpha_{abs} - \frac{\varepsilon_{abs} \sigma (T_{abs}^4 - T_{amb}^4)}{\dot{Q}_{abs}} \quad (IV - 23)$$

En notant I_{ND} l'éclairement solaire direct tombant sur les héliostats et $C_{o, effective}$ la concentration effective de l'installation, le flux solaire moyen dans l'ouverture de la chaudière s'écrit

$$\dot{Q}_{abs} = C_{0,effective} \cdot I_{DN} \quad (IV - 24)$$

En considère que la température au condenseur est la même que la température ambiante T_{amb} on peut écrire le rendement de Carnot sous la forme :

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{amb}}{T_{abs}} \quad (IV - 25)$$

Finalement le rendement théorique η_{th} de la centrale électro-solaire s'écrira :

$$\eta = \eta_{ch} \cdot \eta_c = \alpha_{abs} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{abs}}\right) \left[1 - \frac{\varepsilon_{abs} \sigma (T_{ch}^4 - T_{amb}^4)}{\alpha_{abs} C_{0,effective} I_{DN}}\right] \quad (IV - 26)$$

Dans le cas où l'on tient compte de toutes les pertes thermiques, on peut écrire :

$$\eta = \alpha_{abs} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{abs}}\right) \left[1 - \frac{U_{ch}(T_{abs} - T_{amb})}{\alpha_{abs} C_{0,effective} I_{DN}}\right] \quad (IV - 27)$$

Où U_{ch} est le coefficient global de perte thermique de la chaudière :

La température optimale $T_{abs,opt}$ est donnée en écrivant : $\frac{d\eta}{dT_{abs}} = 0$

On obtient :

$$T_{abs,opt} = \left[\left(\frac{\alpha_{abs} C_{0,effective} I_{DN}}{K_{ch}} + T_{amb} \right) T_{amb} \right]^{1/2} \quad (IV - 28)$$

La figure IV.12 montre l'évolution du rendement η en fonction de la température de chaudière T_{abs} et ceci pour différentes valeurs de la concentration effective $C_{0,effective}$. On voit donc que la température de la chaudière doit être adaptée à la concentration effective pour espérer atteindre le rendement maximal. [18]

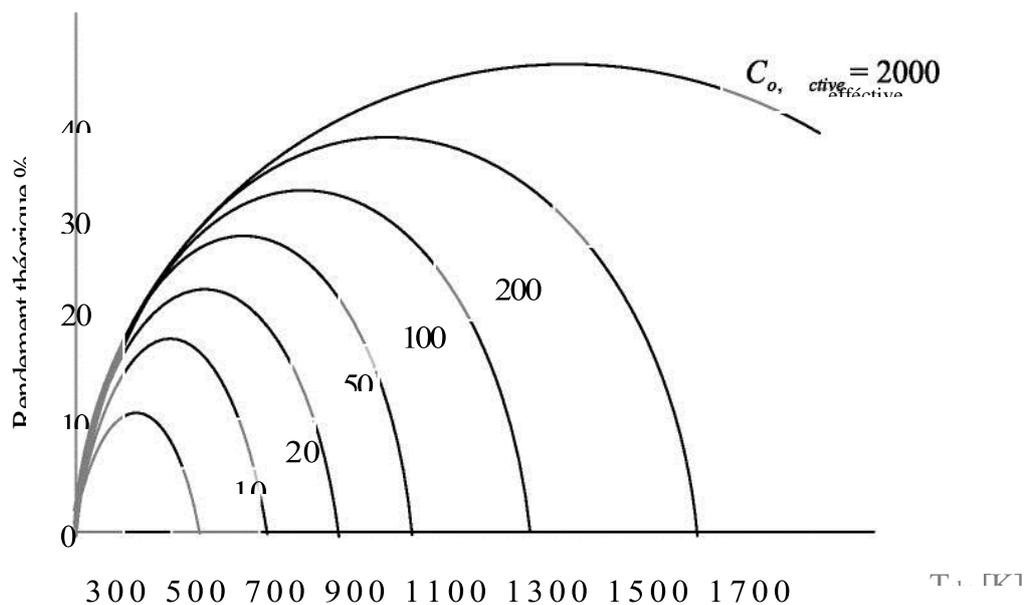


FIGURE IV.12 : Température de l'absorbeur (chaudière)

Pour les données suivantes :

1. Facteur d'absorption apparent de la chaudière $\alpha_{abs} = 0,7$
2. Facteur d'émission apparent de la chaudière, $\varepsilon_{abs} = 0,9$
3. Eclairement solaire direct $I_{DN} = 800 \text{ W/m}^2$
4. Température ambiante $T_{amb} = 300 \text{ K}$

IV.7 Conclusion

L'augmentation considérable de la puissance du rayonnement solaire à travers la concentration solaire est intéressante, chaque concentrateur caractérisé par leur concentration géométrique, optique (énergétique) et leur rendement optique au niveau du réflecteur et le rendement thermique au niveau de l'absorbeur (chaudière).

CHAPITRE V

ETUDE THEORIQUE DU CONCENTRATEUR CYLINDROPARABOLIQUE

V.1 Introduction

L'énergie solaire peut être exploitée sous deux formes principales : la conversion photo thermique qui consiste en une transformation directe du rayonnement solaire en chaleur et la conversion photovoltaïque pour la production d'électricité.

Nous traiterons dans le cadre de ce travail seulement la première voie de conversion.

V.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.

V.2.1 Captation sans concentration : capteurs plans

Le rayonnement solaire peut être transformé en chaleur à basse température, par des capteurs plans utilisant conjointement l'absorbeur, surface sélective et l'effet de serre créé par le vitrage. Ces capteurs ont l'avantage d'utiliser aussi bien les rayons directs du soleil que les rayons diffusés, c'est à dire que même par temps couvert, le liquide caloporteur de capteur parvient à s'échauffer. L'autre avantage est qu'il n'est pas nécessaire d'orienter le capteur suivant le soleil.

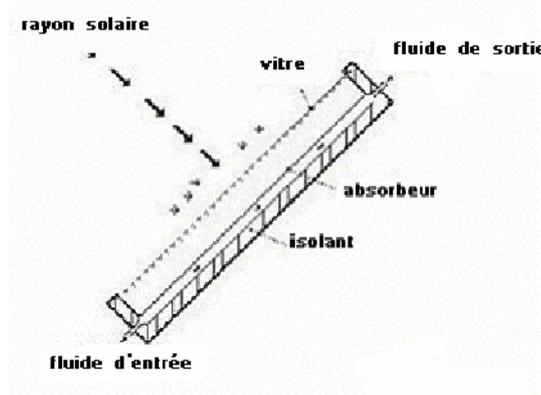


Figure V.1: Capteur plan

V.2.2 Captation avec concentration : capteurs à concentrations

Quand les températures plus élevées sont exigées, des capteurs solaires à concentration sont utilisés. Ils utilisent l'énergie solaire arrivant sur une grande surface réfléchissante, et elle est réfléchi sur une plus petite surface générant une chaleur qui entraînerait des températures plus élevées. La plupart des collecteurs à concentration peuvent seulement concentrer le rayonnement solaire parallèle venant directement à partir du disque du soleil (rayonnement direct), donc ils doivent suivre le mouvement apparent du soleil [25].

Les trois systèmes à concentration les plus importants pour l'application à grande échelle de l'énergie solaire sont :

V.2.2.1 Concentrateurs cylindroparaboliques

Les réflecteurs cylindroparaboliques sont des systèmes en forme de « U ». Ils concentrent les rayons du soleil sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur [26]. Parfois un tube en verre transparent entoure le tube récepteur afin de réduire les pertes de chaleur. Ces concentrateurs utilisent souvent un système de pointeur solaire à simple axe ou à double axe. Les températures du récepteur peuvent atteindre 400°C.

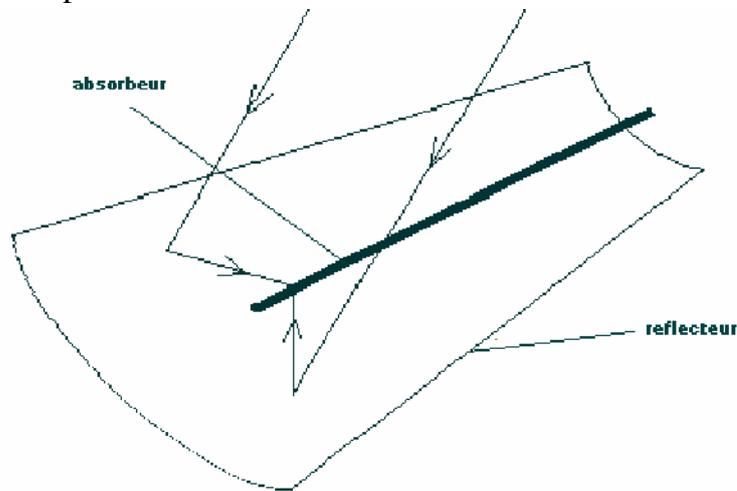


FIGURE V.2 : Concentrateur cylindroparabolique

V.2.2.2 Concentrateur parabolique

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbeurs) qui capte la chaleur solaire ainsi concentrée [18]. Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1500°C) sur le récepteur.

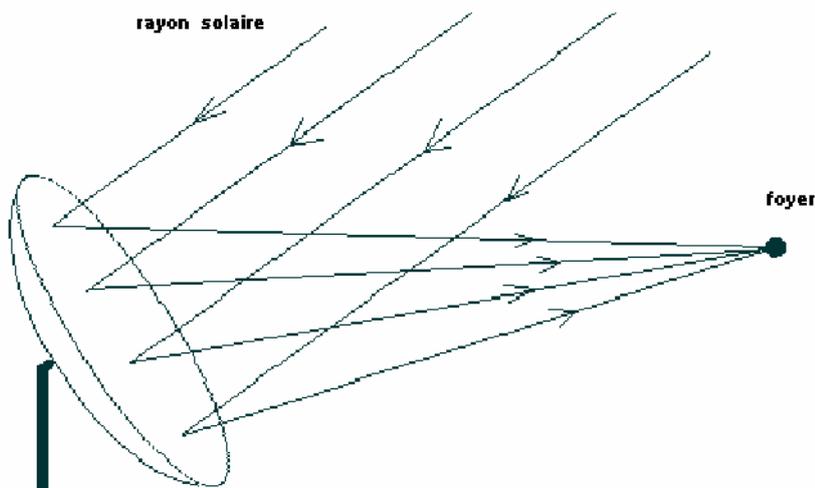


FIGURE V.3: Concentrateur parabolique

V.2.2.3 Système de centrale à tour (héliostat)

Un héliostat utilise un ensemble de pointeurs solaires à double axe qui dirige l'énergie du soleil vers un grand absorbeur situé dans une tour juste en face des grands miroirs qui suit le mouvement du soleil. Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur le récepteur en haut de la grande tour. Un ordinateur permet garder les miroirs alignés afin que les rayons du soleil, qui sont réfléchis, soient orientés toujours vers le récepteur, où la température peut dépasser $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [27], [28].

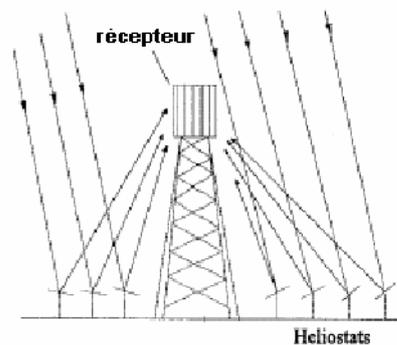


FIGURE V.4 : système de centrale à tour

V.2.3 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.

V.3 Etude théorique du concentrateur cylindroparabolique

V.3.1 La géométrie parabolique

V.3.1.1 Définition

Une parabole est l'ensemble des points situés à égale distance d'une droite fixe (D) appelée directrice, et un point fixe (F) appelé foyer [32]. L'intersection de la parabole et de son axe représente le sommet (V) qui est exactement intermédiaire entre le foyer et la directrice.

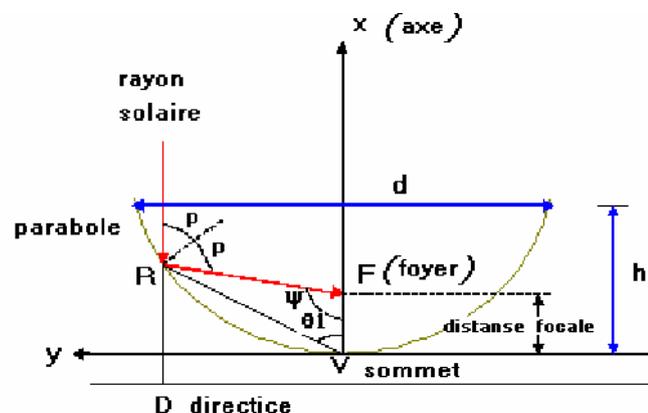


FIGURE V.5 : Propriétés géométriques de la parabole.

L'équation de la parabole est [29] :

$$Y = 4. f. x^2 \quad (V-1)$$

f : la distance focale FV

$$p = \frac{2f}{1 + \cos \psi} \quad (V-2)$$

p : rayon parabolique, distance (RF) entre la courbe de la parabole et le foyer f : angle mesuré à partir de la ligne (VF) et le rayon parabolique (P).

III.3.1.2 Angle d'ouverture d'une parabole

$$\tan \psi_p = \frac{(f/d)}{2(f/d)^2 - \frac{1}{8}} \quad (V-3)$$

3)

f : distance focale

d : diamètre de l'ouverture de la parabole. [21]

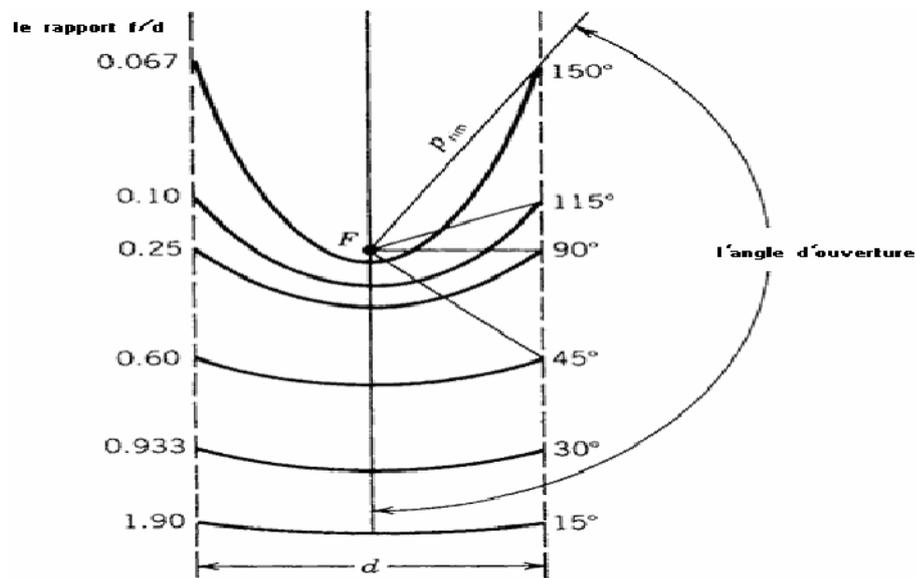


FIGURE V.6: Section d'une parabole possédant un foyer commun F et le même diamètre d'ouverture d.

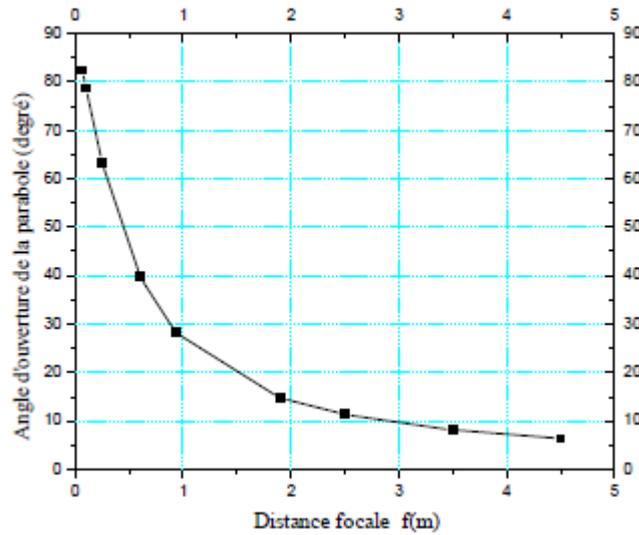


FIGURE V.7: Distance focale en fonction de l'angle d'ouverture d'une parabole d =1m

On peut voir qu'une parabole avec un petit angle d'ouverture est relativement plate. L'augmentation de l'angle d'ouverture de la parabole fait diminuer la distance focale.

V.3.1.3 Taille d'une parabole

La taille de la courbe parabolique h peut être définie comme la distance maximale du sommet à une ligne tracée à travers l'ouverture de la parabole, elle est définie par [31] :

$$h = \frac{d^2}{16f} \quad (\text{V-4})$$

De façon semblable, l'angle d'ouverture peut être trouvé en fonction des dimensions d'une parabole :

$$\tan \Psi_p = \frac{1}{(d/8h) - (2h/d)} \quad (\text{V-5})$$

V.3.1.4 Surface d'une parabole

C'est l'espace inclus entre la parabole et la ligne qui passe par ses extrémités à travers son ouverture, elle est donnée par [30] :

$$A_x = \frac{2}{3} \cdot d \cdot h \quad (\text{V-6})$$

V.3.1.5 Longueur d'une parabole

La longueur d'arc d'une parabole peut être trouvée en intégrant une surface différentielle de cette courbe (l'équation V-1), en appliquant les limites X=h et Y=d/2 comme décrit sur la figure (V-1), on trouve [32] :

$$S = \left[\frac{d}{2} \sqrt{\left[\frac{4h}{d} \right]^2 + 1} \right] + 2f \operatorname{Ln} \left[\frac{4h}{d} + \sqrt{\left[\frac{4h}{d} \right]^2 + 1} \right] \quad (\text{V-7})$$

V.3.2 Système optique d'une surface parabolique

L'idée d'utiliser une surface parabolique vient du fait qu'elle est stigmatique pour les points à l'infini situé sur son axe. D'après les lois de réflexion, tout rayon lumineux parallèle à l'axe de la parabole est réfléchi par la parabole suivant une droite passant par le foyer. Donc la parabole permet de focaliser tous les rayons réfléchis en un point appelé : foyer [29].

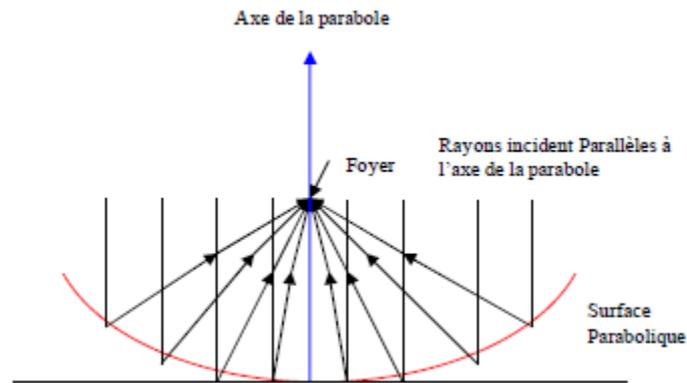


FIGURE V.8: Système optique d'une surface parabolique

V.3.3 Les composants d'un concentrateur solaire cylindroparabolique

Le concentrateur solaire est composé des éléments suivants :

V.3.3.1 Réflecteur cylindroparabolique

Un capteur cylindroparabolique est un capteur à concentration à foyer linéaire utilisant un réflecteur cylindrique de section parabolique. Dans un concentrateur cylindroparabolique, le fluide caloporteur (eau, huile thermique ou gaz) peut être porté à des températures de 50 - 400 °C.

Le capteur doit permettre de transmettre le plus de chaleur possible au fluide. Pour cela, il faut que la plaque soit métallique car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre : 383, aluminium : 200, acier : 60). Le plus efficace serait une tôle d'inox avec une face miroir brillante.

On obtient un cylindre parabolique par translation de la parabole le long de son axe.

L'équation pour le cylindre parabolique en coordonnées cylindriques rectangulaires avec l'axe (y) comme axe de symétrie est [31], [32] :

$$y = \frac{1}{4f} \cdot x^2 \quad (\text{V-8})$$

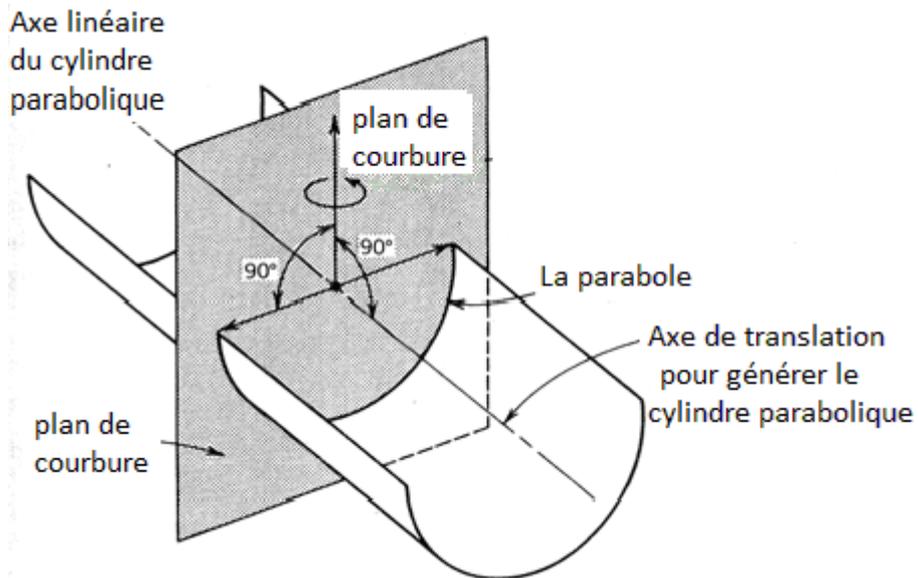


FIGURE V .9: Définition du plan de courbure.

La surface formée par le déplacement d'une parabole sur l'axe perpendiculaire à son plan est appelé la surface réfléchissante ou un *cylindre parabolique* A_s , cette surface peut être trouvée en multipliant la longueur de l'arc de la parabole de l'équation (V-7) par la longueur l du cylindre, est donnée par [32] :

$$A_s = S * l \quad (V-9)$$

La surface d'ouverture de concentrateur cylindre parabole est donnée par [37]:

$$S_o = l_a * L \quad (V-10)$$

L : longueur du miroir

l_a : Largeur du miroir

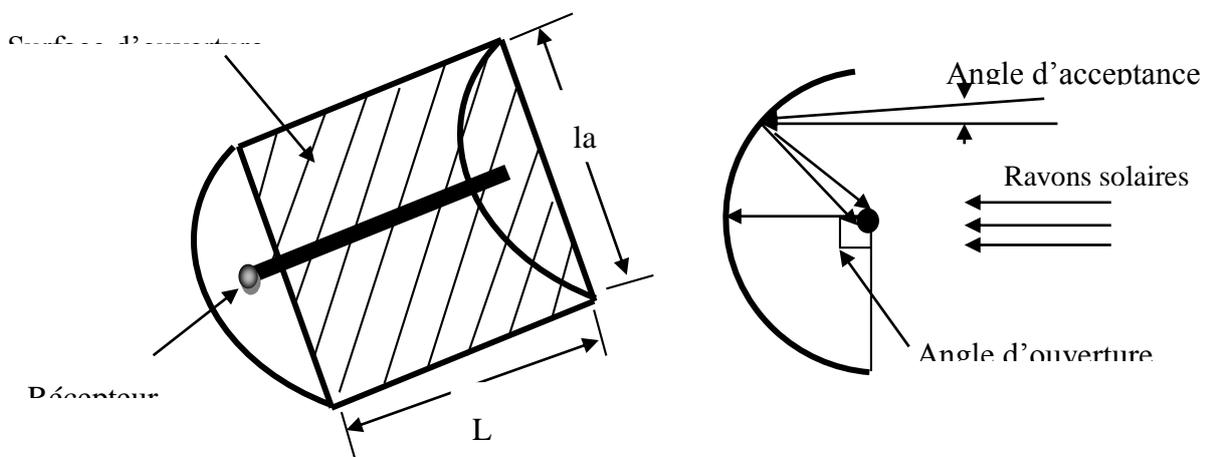


FIGURE V.10: Les caractéristiques du miroir cylindroparabolique.

V.3.3.2 - Récepteur (absorbeur)

L'absorbeur est l'élément essentiel du capteur solaire, il doit absorber la plus grande partie du rayonnement solaire et transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec le minimum de perte. Il doit être le plus léger possible afin d'éviter l'inertie de mise en régime et construit avec un matériau bon conducteur.

A ces deux qualités, il faut ajouter les qualités d'ordre mécanique et chimique (bonne tenue à la pression, à la dilatation, résistance à la corrosion, fiabilité dans le temps).

D'autre part il doit être réalisé en tenant compte des critères économique. Le contact entre l'absorbeur et le fluide caloporteur doit être le meilleur possible.

On classe les récepteurs solaires en 2 catégories en fonction de leur surface de transfert, :

1- Surface externe : Il y a plusieurs configurations possibles : plane, cylindrique, conique ou sphérique, dépendantes de la répartition, de l'intensité du flux, de la température et de l'application. Ce genre de récepteur est utilisé généralement pour les gammes de température de l'ordre 50-400°C maximum.

2- Surface interne ou cavité : Ce type de récepteur est bien adapté pour le cas où l'intensité du flux et la température de travail sont élevées. Le flux énergétique concentré entre dans le récepteur par l'ouverture dont la surface est généralement 5 à 10 fois inférieure à celle de la surface de transfert dans la cavité. C'est un moyen efficace pour augmenter le coefficient d'absorption et diminuer les pertes [33].

La surface du récepteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une bonne conductivité et diffusion thermique.
- Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- Une bonne résistance chimique vis à vis du fluide utilisé.

Il est important que le récepteur soit métallique car seuls les métaux ont un bon coefficient de conduction de la chaleur (cuivre : 360 W/(m.°K), aluminium : 200 W/(m.°K), acier 60 W/(m.°K)).

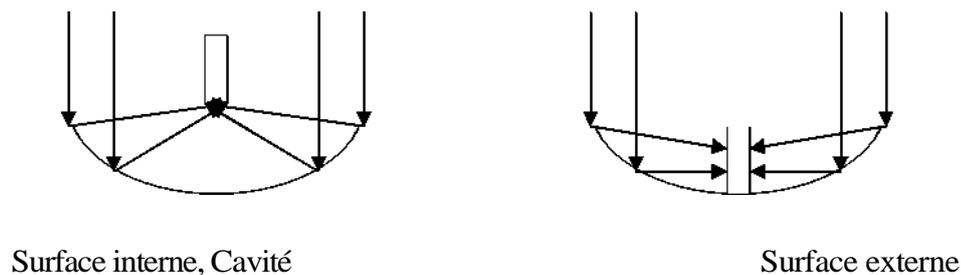


FIGURE V.11: Catégories des récepteurs

Notre étude est concernée par des températures moyennes, nous allons donc étudier un récepteur de forme cylindro-parabolique.

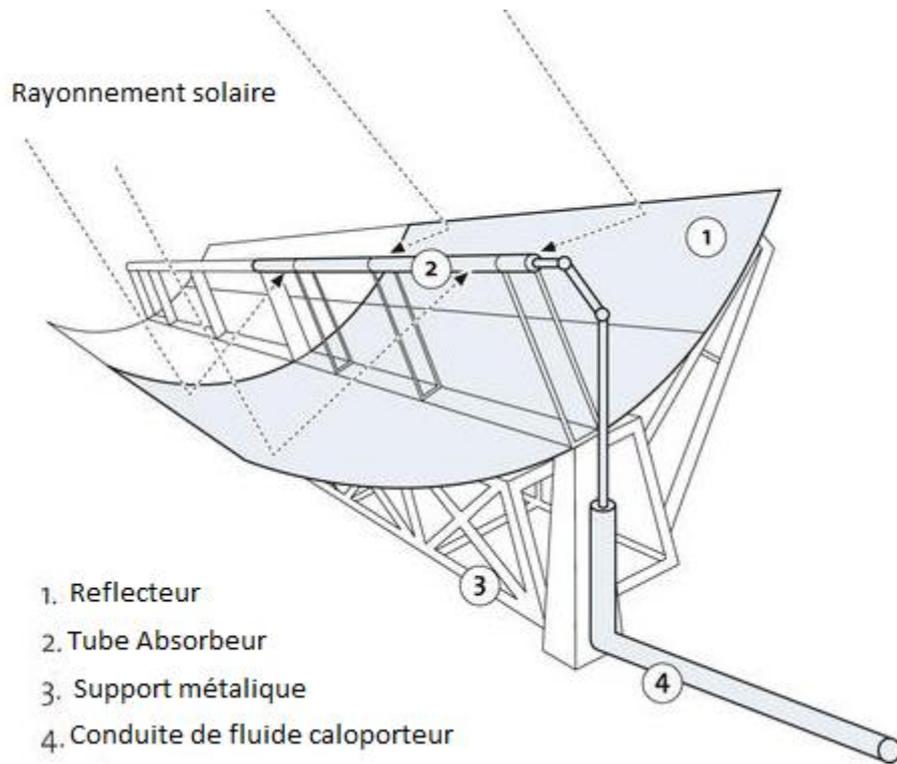


FIGURE V.12: Concentrateur solaire cylindroparabolique.

V.3.4- Dimension du réflecteur

- La propriété principale d'une parabole

Tout rayon incident parallèle à l'axe d'une parabole est réfléchi en un point unique appelé foyer (F). La ligne joignant le sommet de la parabole (O) au foyer (F) est appelé "axe focal" (voir dessin V.13). Le plan contenant l'axe focal d'une coupe du miroir et la ligne Est-Ouest est appelé le plan focal du miroir. La ligne des foyers de chaque section de parabole est la ligne focale.

V.3.5 Dimension de tube récepteur

Le choix des dimensions du tube récepteur est lié à la largeur de la ligne focale pour les concentrateurs linéaire,

Quand l'angle d'ouverture d'une parabole est aligné en parfait état vers le soleil, la réflexion des rayons forme une image sur ligne de foyer sous forme d'une bande d'une longueur égale a celle du cylindre parabolique.

On remarque que la largeur de la tache solaire diminue quand l'angle de l'ouverture de la parabole augmente.

Pour que l'ouverture du récepteur capte tous les rayons du champ arrivant au foyer, le récepteur doit avoir un rayon minimum égal à la taille de la tache solaire.

Dans les applications solaires, cette largeur est très petite, on peut l'augmenter en variant la distance de point focal sur l'axe de la parabole.

Le diamètre d'ouverture du récepteur est donné par [38]:

$$D = 2 \cdot r_r \cdot \sin(\theta_m) \quad (\text{V} - 11)$$

θ_m : la moitié de l'angle apparent du soleil par la terre.

Pour les réflecteurs paraboliques, le rayon r est donné par la formule : [38]

$$r = \frac{2 \cdot f}{1 + \cos(\varphi)} \quad (\text{V} - 12)$$

Pour les angles φ_r

$$r_r = \frac{2 \cdot f}{1 + \cos(\varphi_r)} \quad (\text{V} - 13)$$

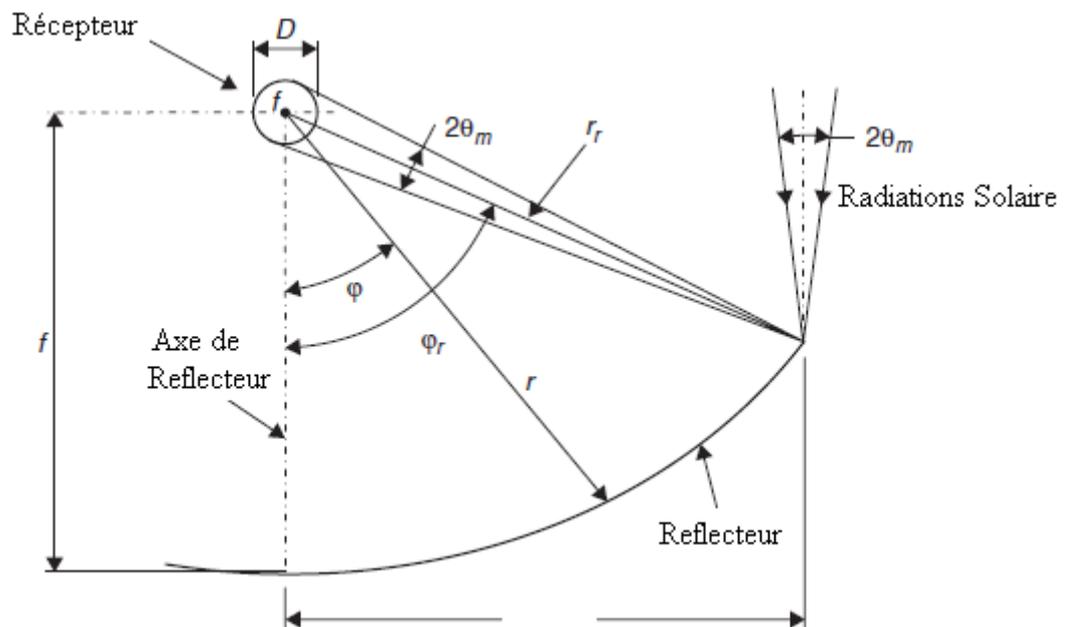


FIGURE V.13: Les différents paramètres de récepteur cylindro-parabolique

Images du soleil sur le plan focal [18]

A_r donnée par le concentrateur,

$A(\varphi)$ donnée par les rayons tombant au point M

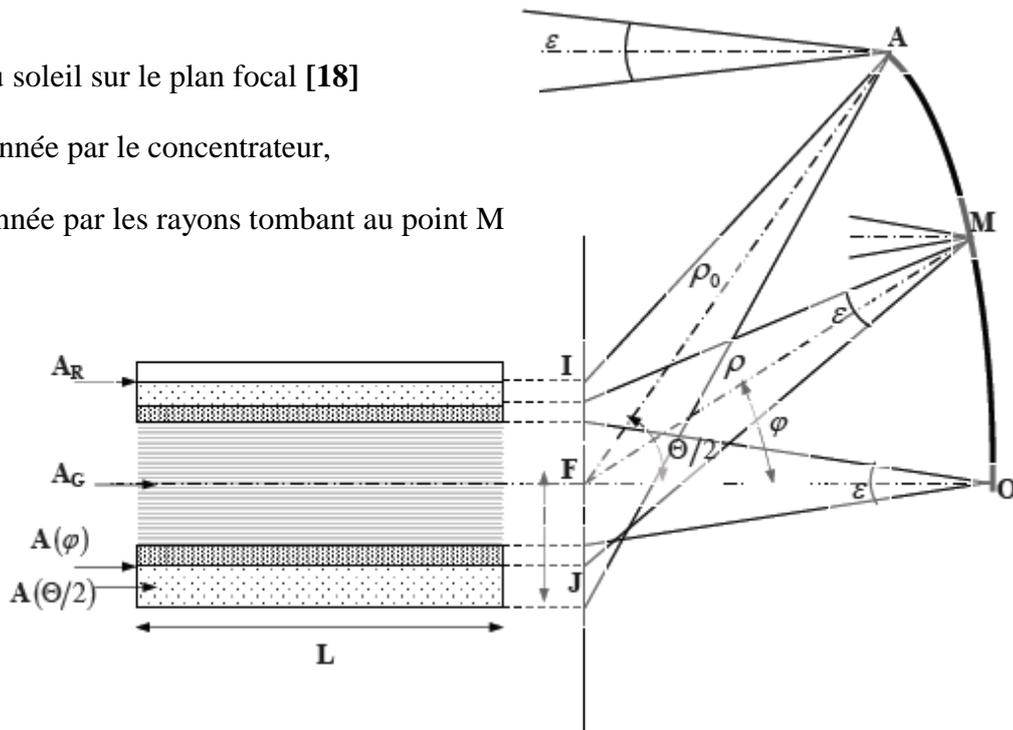


FIGURE V.14: Coupe méridienne d'un demi-Concentrateur Cyllindroparabolique

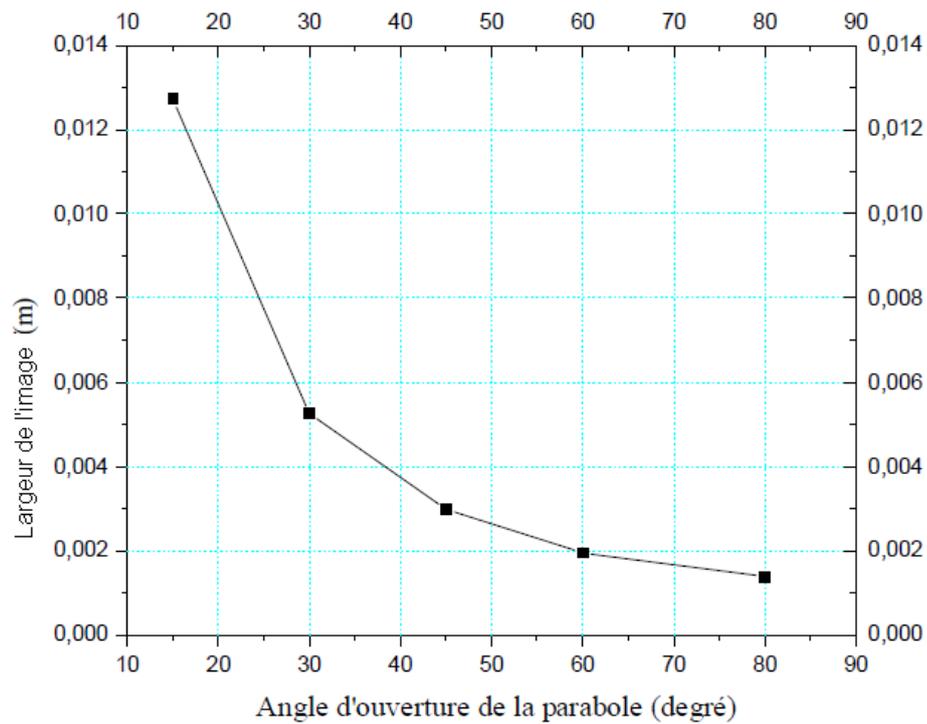


FIGURE V.15: La largeur de l'image focale en fonction de l'angle d'ouverture de la parabole $d = 1\text{m}$

V.4- La concentration

Ce paramètre indique la quantité de concentration légère d'énergie réalisée par un collecteur donné, Les deux définitions normales de la concentration solaire sont la concentration géométrique (surface) et la concentration système optique (flux).

V.4.1- Concentration géométrique

C'est le rapport de la surface de l'ouverture du collecteur A_a à celle du récepteur A_r .

$$C_g = \frac{A_a}{A_r} = \frac{l_a * L}{\pi * D * L} = \frac{l_a}{\pi * D} \quad (\text{V} -$$

14)

V.4.2- Concentration optique

Est égale au rapport de l'éclairement moyen sur la surface de l'absorbeur à l'éclairement de l'ouverture.

I_r : l'énergie reçue à l'ouverture du récepteur.

I_a : l'énergie reçue à l'ouverture du cylindre parabolique.

$$C_{opt} = \frac{I_r}{I_a} \quad (\text{V} -$$

15)

L'optique peut délivrer des concentrations théoriques supérieures à 100000, ce qui est énorme. Dans la pratique on réalise des concentrateurs paraboliques dont les rapports réalisables de la concentration sont beaucoup plus petits, on peut obtenir des concentrations de l'ordre de 40000 en tenant compte de la contribution des erreurs sur la qualité géométrique des surfaces, de l'erreur de poursuite du soleil et de l'erreur de focalisation du récepteur, [27], [28].

CHAPITRE VI
BILAN ENERGETIQUE

VI.1 Introduction

Les principaux effets intervenant dans l'absorbeur/récepteur sont réunis dans cette étude, seule une fraction de l'énergie incidente du récepteur est transmise au fluide, soit en stabilité où en circulation. Une part de l'énergie incidente est perdue par réflexion sur l'absorbeur sous forme des pertes optiques, une autre part de l'énergie thermique produite par l'absorption des photons incidents est perdue par transfert vers l'environnement de l'absorbeur par convection, conduction et rayonnement, ce sont les pertes thermiques. Les pertes thermiques par convection et par conduction sont en première approximation proportionnelles à la température.

Les pertes thermiques par rayonnement sont par contre proportionnelles à la puissance quatrième de la température, conformément à la loi de Stefan Boltzmann.

Cette étude porte sur une modélisation mathématique d'un absorbeur pour un concentrateur solaire de type cylindroparabolique, sur lequel nous avons établi un bilan thermique respectivement sur le fluide dans l'absorbeur et nous avons résolu le système d'équations obtenues par le logiciel Engineering Equation Solver (EES).

On obtient comme résultat et pour une journée typique la variation de la température du fluide, et de l'absorbeur.

On examine ainsi la distribution de la température du fluide dans le récepteur, l'effet de la vitesse du vent, le débit massique du fluide caloporteur.

VI.2 Absorbeur/Récepteur

L'absorbeur d'un capteur a pour rôle de transformer en chaleur le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit et de transmettre cette chaleur au fluide (liquide, gaz). Les principales qualités seront donc [18] :

- Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité,
- Facteur d'émission dans l'infra rouge aussi faible que possible,
- Un bonne conductivité thermique λ_{abs} et diffusivité thermique α_{abs} ,
- Une bonne résistance chimique vis-à-vis du fluide qui le baigne.

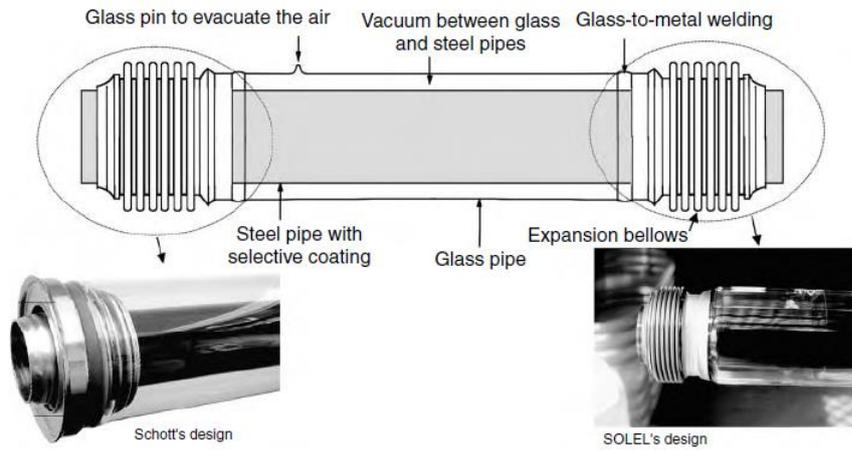


FIGURE VI.1: Les différents types d'absorbeur.

VI.3 Surface sélective

Le rôle de la surface absorbante est de transformer le rayonnement de courte longueur d'onde en chaleur. La part du rayonnement solaire incident qui est absorbé par le capteur est appelée facteur d'absorption solaire α_{abs} de la surface. Le facteur complémentaire à l'unité de cette fraction correspond au facteur de réflexion solaire ρ_{abs} , dans le cas où la plaque absorbante est opaque le facteur de transmission τ_{abs} est nul.

On appelle sélectivité le rapport du facteur d'absorption solaire α_{abs} sur le facteur d'émission infrarouge ε_{abs} [24].

VI.4 L'équation d'équilibre thermique

Pour réaliser un bilan énergétique sur un absorbeur solaire sous forme cylindrique, on isole la surface qui absorbe le rayonnement solaire concentré par le réflecteur.

Le bilan énergétique de la surface absorbante de concentration solaire peut être écrit sous la forme [39] :

$$\dot{Q}_{Util} = (m_{abs} \cdot m_f) \frac{dT_{abs}}{dt} \quad (VI-1)$$

\dot{Q}_{util} : L'énergie utile transmise par la surface réceptrice du rayonnement concentré par le réflecteur.

L'énergie utile pour un absorbeur thermique solaire est la soustraction de l'énergie thermique cédée par l'absorbeur et l'énergie perdue par ce dernier, décrit l'énergie absorbée par le fluide caloporteur passant par le récepteur ou le convertisseur [40], c'est-à-dire :

$$\dot{Q}_{Util} = \dot{Q}_{abs} - \dot{Q}_{pert} \quad (VI-2)$$

\dot{Q}_{abs} : L'énergie optique qui atteint la surface de l'absorbeur, est donnée par [41] :

$$\dot{Q}_{abs} = \eta_{opt} \cdot \dot{Q}_{ref} \quad (\text{VI} - 3)$$

$$\dot{Q}_{ref} = I_{DN} \cdot A_{ref} \quad (\text{VI} - 4)$$

\dot{Q}_{ref} : L'énergie captée par le réflecteur

Le rendement optique est donné par la formule : [42]

$$\eta_{opt} = \Gamma \cdot \alpha_{abs} \cdot \tau_{abs} \cdot \rho_{ref} \quad (\text{VI} - 5)$$

Γ : Rapport de captation (fraction de l'énergie reflétée par le réflecteur) [9]

$$\Gamma = \frac{A_{ref} - A_{abs}}{A_{abs}} \quad (\text{VI} - 6)$$

α_{abs} : Facteur d'absorption de la surface de l'absorbeur.

τ_{abs} : Facteur de transmission de l'absorbeur.

ρ_{ref} : Facteur de réflexion de surface de réflecteur (miroir)

VI.5 Les pertes du concentrateur cylindroparabolique

La perte totale peut être divisée en trois types qui sont classés dans l'ordre décroissant d'importance:

- Les pertes optiques ;
- Les pertes géométriques ;
- Les pertes thermiques de l'absorbeur à l'ambient.

VI.5.1 Les pertes optiques :

Les pertes optiques sont associées à quatre paramètres :

1-Le facteur de réflectivité ρ , de la surface réflectrice du collecteur: la réflectivité de concentrateur cylindroparabolique est inférieure à l'unité, seulement une fraction de la radiation de l'incident est reflétée vers le tube absorbeur. La réflectivité typique évaluée de miroirs en verre propres argentés est autour de 0.93.

2- Le facteur d'interception γ : le facteur optique le plus compliqué dans le calcul de la performance optique d'un concentrateur cylindroparabolique. Il représente le rapport entre l'énergie

interceptée par l'absorbeur et celle réfléchiée par les surfaces réfléchissantes, c-a-d que certains rayons solaires peuvent être renvoyés vers l'extérieur du concentrateur ou bien passer à côté de l'absorbeur lorsque les surfaces optiques présentent des défauts ou des irrégularités et lorsque l'absorbeur est mal positionné dans le plan focal, donc il dépend des propriétés optiques des matériaux utilisés. Il est autour de 0.95 pour un collecteur assemblé correctement.

3- Le facteur de transmission τ : Le rapport entre la radiation qui traverse des dispositifs en verre et le rayonnement total incident, il est autour 0.93.

4- Absorptivité α : ce coefficient concerne le tube absorbeur et sa couche sélective, ce paramètre quantifie la quantité d'énergie absorbée par le tube et transmise à l'absorbeur, il est typiquement égal à 0.95.

La multiplication de ces quatre paramètres (réflectivité, facteur de l'interception, transmission, et la absorptivité de cuivre utilisé) quand les rayons solaires sont perpendiculaires c'est-à-dire l'angle d'incidence sur le plan de l'ouverture égal à 0° donne le rendement optique du concentrateur cylindroparabolique, $\eta_{opt,0^\circ}$

$\eta_{opt,0^\circ}$ est habituellement dans la gamme de 0.70 - 0.76.

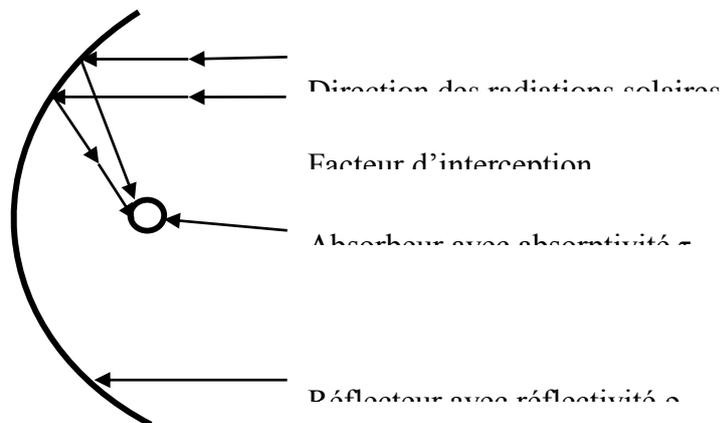


FIGURE VI.2: Les paramètres optiques du concentrateur cylindroparabolique

VI.5.2 Les pertes géométriques :

Le troisième type de pertes dans un concentrateur est les pertes géométriques à cause de l'angle d'incidence θ , de rayonnement solaire direct sur le plan de l'ouverture du collecteur. L'angle d'incidence est l'angle entre le normal au plan de l'ouverture du collecteur et le vecteur du soleil, les deux sont contenu sur un plan perpendiculaire à l'axe du collecteur. Cet angle dépend des jours de

l'année et les temps du jour.

L'angle d'incidence de rayonnement solaire direct est un facteur très important, parce que le rayonnement direct utile au collecteur est directement proportionnelle au cosinus de cet angle.

L'angle d'incidence réduit la zone de l'ouverture de concentrateur par une quantité A_e appelé les pertes géométriques de collecteur on peut la calculer par:

$$A_e = l_a l_\theta = l_a f_m \tan \theta \tag{VI-7}$$

$$f_m = f + \left[\frac{(f l_a^2)}{(48 f^2)} \right] \tag{VI-8}$$

où l_a : la largeur de la parabole,

L : la longueur du collecteur,

f : la distance focale de la parabolique concentrateur,

f_m : la distance focale,

θ : l'angle d'incidence de la radiation solaire directe.

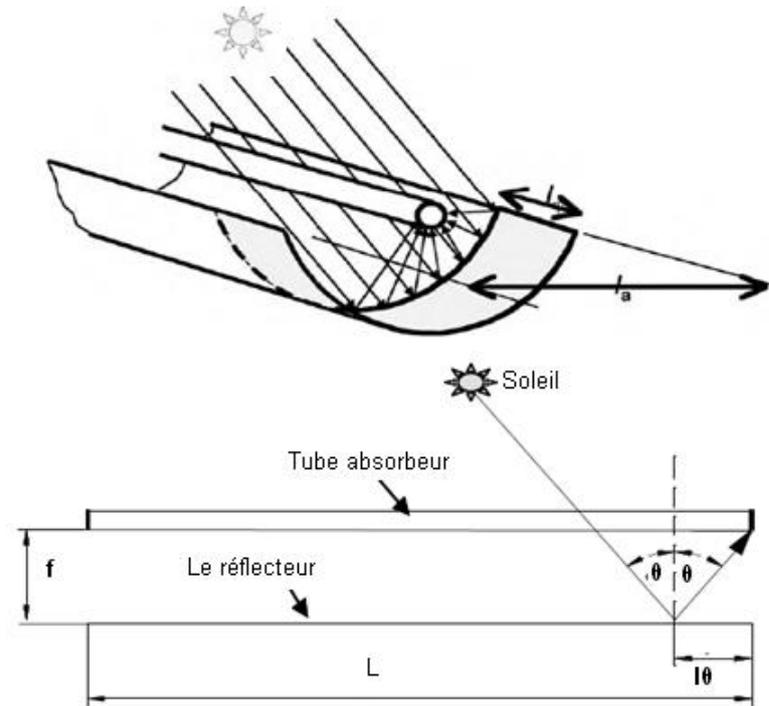


FIGURE VI.3: Les pertes géométriques d'un concentrateur cylindroparabolique.

L'effet de l'angle d'incidence sur le rendement optique et la surface de l'ouverture utile d'un concentrateur est quantifié par l'angle d'incidence modifié, $K(\theta)$, ce paramètre inclut toutes les pertes optiques et géométriques dues à l'angle d'incidence plus grand que 0° .

Le paramètre géométrique dominant est le facteur d'ombre, la puissance concentrée est alors réduite par les effets d'ombre surtout pour une orientation Est-Ouest.

VI.5.3 Les pertes thermiques

La perte thermique totale dans un concentrateur cylindroparabolique est la combinaison de plusieurs modes de transfert.

Ces pertes sont de type conduction, convection, et rayonnement, elles sont dépendantes de la différence de la température entre le récepteur et l'environnement et aussi de la géométrie du récepteur et celle du concentrateur.

Les pertes sont données par la formule suivante [43, 44] :

$$\dot{Q}_{pert} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{ray} \quad (\text{VI} - 9)$$

VI.5.3.1 Les pertes par conduction

Les pertes par conduction sont habituellement petites comparées à ceux par convection et par rayonnement. Elles sont souvent combinées avec le terme de perte de convection dans la plupart des analyses.

$$\dot{Q}_{cond} = \lambda_{abs} \cdot A_{abs} \cdot (T_{abs} - T_{amb}) \quad (\text{VI} - 10)$$

A_{abs} : Surface de l'absorbeur

T_{abs} : Température de l'absorbeur

T_{amb} : Température ambiante

VI.5.3.2 Pertes par convection

La mauvaise connaissance du phénomène de la convection est encore posée pour une plaque plane. Elle est dépendante de la vitesse du vent et sa direction par rapport au site. Ces pertes sont proportionnelles à la surface de l'absorbeur et la différence entre la température de surface captatrice et la température ambiante [45], les pertes par convection sont données par la formule :

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} \cdot A_{abs} \cdot (T_{abs} - T_{amb}) \quad (\text{VI} - 11)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donné par la formule suivante [46] :

$$h_{conv} = \frac{Nu \cdot \lambda_{air}}{d} \quad (\text{VI} - 12)$$

d : Diamètre du récepteur

λ_{air} : Conductivité thermique de l'air

Le nombre de Nusselt Nu est donné par :

$$Nu = 0,664 (Re)^{1/2} (Pr)^{1/3} \quad (\text{VI} - 13)$$

Le calcul du nombre de Reynolds (Re) par la formule :

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu_{air}} \quad (\text{VI} - 14)$$

V : Vitesse du vent

ν_{air} : Viscosité de l'air

VI.5.3.3 Pertes par rayonnement

La perte de chaleur par rayonnement est importante pour des récepteurs fonctionnant seulement aux températures légèrement au-dessus de la température ambiante, et devient dominante pour des collecteurs fonctionnant à températures élevées. Le taux de perte de chaleur par rayonnement est proportionnel à l'émissivité de la surface et à la différence de la température et à la puissance quatre. Les pertes par rayonnement sont calculées par la formule suivante [44]:

$$\dot{Q}_{ray} = \varepsilon \varepsilon_{abs} \cdot \sigma \cdot A_{abs} (T_{abs}^4 - T_{ciel}^4) \quad (\text{VI} - 15)$$

ε_{abs} : Facteur émissivité de l'absorbeur.

σ : Constante Stefan-Boltzmann.

T_{ciel} : Température du ciel

La température équivalente du rayonnement du ciel dépend de la densité de l'air et de son contenu d'humidité, quand le taux de l'humidité relatives est grand dans le cas ou qu'on soit au niveau de la mer, on peut supposer que la température du ciel est identique à la température de l'air ambiant. Cependant pour les basses humidités relative ou aux altitudes élevées, la température du rayonnement du ciel peut être inférieur de 6°C que la température ambiante, la température du ciel est donné par la formule de Whillier (1967) [18]:

$$T_{ciel} = T_{amb} - 6 \quad (\text{VI} - 16)$$

Et aussi par la formule de Swinbank (1963) :

$$T_{ciel} = 0,0552 T_{amb}^{1,5} \quad (\text{VI} - 17)$$

Ces deux relations donnent le même résultat pour $T_{ciel} \# 308 \text{ K}$ ou $T_{ciel} \# 35^\circ\text{C}$.

On peut écrire l'équation (VI – 15) par la forme suivante [47] :

$$\dot{Q}_{ray} = A_{abs} \cdot h_{ray} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (VI - 18)$$

$$h_{ray} = \varepsilon \varepsilon_{abs} \cdot \sigma \cdot \frac{T_{abs}^4 - T_{ciel}^4}{T_{abs} - T_{amb}} \quad (VI - 19)$$

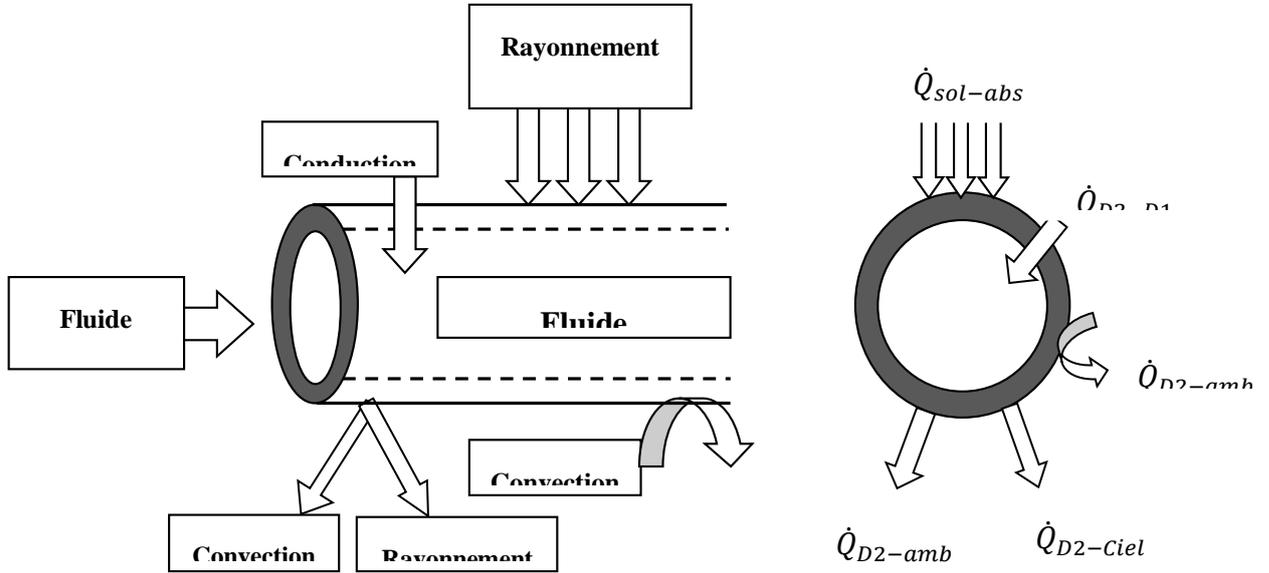


FIGURE VI.4: Les échanges thermiques sur l'absorbeur

On combine les équations précédentes on aura une expression simple de l'énergie utile à partir d'un concentrateur cylindroparabolique basée sur un bilan énergétique du récepteur.

VI.6 Expression de la température de l'absorbeur

On calcule la température de la surface captive de l'absorbeur à partir de l'équation (VI – 1), après les calculs précédents, l'équation devient [48].

$$\dot{Q}_{util} = \eta_{opt} I_{DN} A_{ref} - A_{abs} \left[h_{conv} (T_{abs} - T_{amb}) + h_{ray} (T_{abs} - T_{amb}) + h_{cond} (T_{abs} - T_{amb}) \right]$$

$$\dot{Q}_{util} = A_{abs} \left[\left(\eta_{opt} I_{DN} \frac{A_{ref}}{A_{abs}} \right) - (h_{conv} + h_{ray} + h_{cond}) (T_{abs} - T_{amb}) \right]$$

$$\dot{Q}_{util} = \eta_{opt} I_{DN} A_{abs} - U_{glob} (T_{abs} - T_{amb}) A_{ref} \quad (VI - 20)$$

Où U_{glob} : Coefficient global des pertes de chaleur données par :

$$U_{glob} = h_{conv} + h_{ray} + h_{cond} \quad (IV - 21)$$

On remplace :

$$P_{opt} = \eta_{opt} I_{DN} C_g \quad (IV - 22)$$

Ainsi :

$$mc = m_{abs} c_{abs} + m_f c_f \quad (IV - 23)$$

L'équation devient :

$$mc \cdot dT_{abs} = A_{abs} [P_{opt} - U_{glob} (T_{abs} - T_{amb})] dt$$

On intègre entre t_0 et t :

$$\int_{T_{abs}(t_0)}^{T_{abs}(t)} mc \, dT_{abs} = \int_{t_0}^t A_{abs} [P_{opt} - U_{glob} (T_{abs} - T_{amb})] dt$$

On trouve l'équation suivante :

$$T_{abs}(t) = T_{amb} + \frac{P_{opt}}{U_{glob}} - \left(\frac{P_{opt}}{U_{glob}} - T(t_0) + T_{amb} \right) \exp \left[-\frac{U_{glob} A_{abs}}{mc} (t - t_0) \right] \quad (VI - 24)$$

VI.7 Expression de l'évolution de la température du fluide dans le tube

On considère un écoulement de fluide dans un tube exposé à un flux de chaleur uniforme sur la surface, et nous allons déterminer la variation de la température du fluide à l'intérieur de tube, cette température varie considérablement en fonction de l'axe de l'écoulement, $T_m(x)$, Q_s est le transfert total entre $x=0$ et $x=L$.

On applique l'équation de conservation de l'énergie sur un volume de contrôle entre deux sections on obtient :

$$dQ_s = m C_p \cdot dT_m$$

$$dQ_s = h(x) \cdot (T_{abs} - T_m(x)) \pi D \, dx$$

pour les condition aux limites : $x=0 \quad T_m(x=0) = T_e$

$$x=L \quad T_m(x=L) = T_s$$

$$\ln \left[\frac{T_m(x) - T_{abs}}{T_e - T_{abs}} \right] = -\frac{\pi D}{m C_p} \int_0^x h(x) \, dx \quad (VI - 25)$$

L'équation finale de variation de température est :

$$T_e(x) = T_{abs} + (T_e - T_{abs}) * \exp\left(-\frac{\pi D \bar{h}}{\dot{m} C_p} x\right) \quad (\text{VI-26})$$

VI.8 Efficacité de concentrateur cylindroparabolique

Efficacité de concentrateur cylindroparabolique est la combinaison de trois rendements différents :

η_{glob} : Rendement global ;

$\eta_{opt,0^\circ}$: Rendement optique maximum pour un angle d'incidence 0° ;

η_{th} : Rendement thermique.

VI.8.1 Efficacité globale

Le rendement global, η_{glob} est composé des trois types de pertes qui se produisent dans le concentrateur cylindroparabolique (optique, géométrique, et thermique) et peut être calculé en fonction du rendement optique maximum, de l'angle d'incidence modifié, et rendement thermique, en utilisant la formule (VI - 25),

$$\eta_{glob} = \eta_{opt,0^\circ} \cdot k(\varphi) \cdot \eta_{th} \quad (\text{VI - 27})$$

Avec :

$K(\varphi)$: l'angle incidence modifié,

$K(\varphi) = 1$ si $\varphi = 0^\circ$ les rayons incidents perpendiculaires sur la surface d'ouverture.

$\eta_{opt,0^\circ}$: Rendement optique maximum pour un angle d'incidence 0° ,

η_{th} : Rendement thermique.

Le rendement global peut aussi être calculé comme le rapport entre la puissance de sortie thermique nette délivrée par le collecteur, et le flux l'énergie solaire incident sur le plan de l'ouverture du collecteur.

VI.8.2 Efficacité optique

Le rendement optique est défini comme le rapport du rayonnement absorbé et le rayonnement incident sur l'ouverture du concentrateur.

Le rendement optique dépend des propriétés optiques des matériaux utilisés, de la géométrie de collecteur, de l'angle d'incidence du rayonnement solaire, et les imperfections de la construction du collecteur,

Le rendement est donné par l'équation (Sodha et al, 1984),

$$\eta_{opt} = \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \gamma \left[(1 - A_f \tan(\theta)) \cos(\theta) \right] \quad (\text{VI - 28})$$

$$A_f = \frac{A_l}{A_a} \quad (\text{VI - 29})$$

A_f : Facteur géométrique. C'est le rapport de la zone perdue par la zone de l'ouverture ;

ρ : Facteur de réflectivité du miroir;

τ : Facteur de transmission de verre ;

α : Facteur d'absorption de l'absorbeur;

γ : Facteur de l'interception ;

θ : Angle d'incidence du rayonnement solaire.

VI.8.3 Efficacité thermique

La mesure des performances d'un concentrateur solaire est une opération importante et nécessaire pour la compréhension du fonctionnement du système.

Cette efficacité se définit comme le rapport de l'énergie thermique absorbée par l'absorbeur et l'énergie reçue à l'ouverture du réflecteur [49, 50].

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{util}}{I_{DNI} A_{ref}} \quad (VI - 30)$$

$$\eta = \frac{\eta_{opt} I_{DNI} A_{ref} - A_{abs} U_{glob} (T_{abs} - T_{amb})}{I_{DNI} A_{ref}} \quad (VI - 31)$$

$$\eta = \eta_{opt} - \frac{A_{abs} U_{glob} (T_{abs} - T_{amb})}{I_{DNI} A_{ref}} \quad (VI - 32)$$

Ou bien :

$$\eta = \eta_{opt} - \frac{U_{glob} (T_{abs} - T_{amb})}{I_{DNI} C_g} \quad (VI - 33)$$

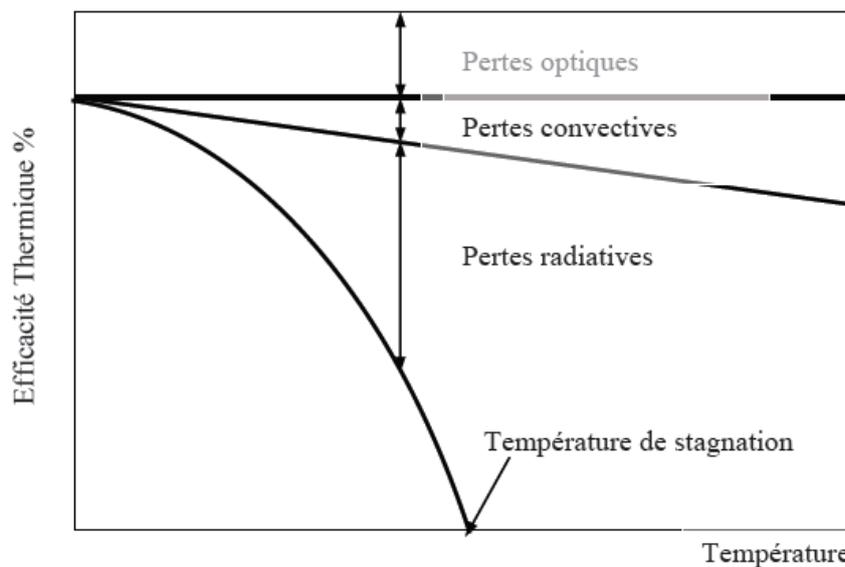


FIGURE VI.5: Évaluation des pertes d'un capteur concentrateur en fonction de la température.

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

VI.9 Résolution du système d'équations

La résolution des équations est faite avec le logiciel EES. Un petit programme sur Excel a été réalisé pour évaluer les nombreux paramètres.

VI.10 Température de stagnation

La stagnation est l'état d'un capteur où d'un système sans circulation du fluide caloporteur. La température de stagnation se reproduit généralement à la température du fluide caloporteur sans circulation ou les pertes thermiques sont égales au flux du rayonnement solaire incident donné par la formule [47] :

$$\dot{Q}_{util} = \dot{Q}_{opt} - \dot{Q}_{pert} \quad (\text{VI} - 34)$$

Dans des conditions de stagnation, aucune chaleur n'est fournie à l'absorbeur c'est-à-dire

$$\dot{Q}_{util} = 0$$

En tant que tels, les températures du récepteur à contrôler dans les conditions de la température de stagnation, un capteur solaire doit pouvoir dissiper toute l'énergie absorbée.

En effet, la température de récepteur augmentera jusqu'à : $\dot{Q}_{abs} = \dot{Q}_{pert}$

Ou :

$$\eta_{opt} I_{DN} A_{abs} = U_{glob} (T_{abs} - T_{amb}) A_{ref} \quad (\text{VI} - 35)$$

En utilisant cette expression, nous pouvons estimer la température de stagnation du récepteur pendant la stagnation après résolution de l'équation (IV – 32) pour T_{stag} [47] :

Le tableau VI.1 : résume tous les échanges au niveau de l'absorbeur :

	Nom	Le mode	Le sens		Equation
			De	Vers	
	$\dot{Q}_{Sol-abs}$	Rayonnement	Rayonnent solaire	Tube absorbeur	$\dot{Q}_{abs} = \eta_{opt} \cdot \dot{Q}_{ref}$ $\dot{Q}_{ref} = I_{DN} \cdot A_{ref}$
	\dot{Q}_{D1-D2}	Conduction	Diamètre extérieur	Diamètre intérieur	$\dot{Q}_{cond} = 2\pi Lk(T_{D1} - T_{D2})/Ln(R1-R2)$
	$\dot{Q}_{D1-fluide}$	Convection	Diamètre intérieur	Fluide à l'intérieur	$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} \cdot A_{abs} \cdot (T_{D1} - T_f)$
Perdu	$\dot{Q}_{D2-ciel}$	Rayonnement	Diamètre extérieur	Ciel	$\dot{Q}_{ray} = \varepsilon \varepsilon_{abs} \cdot \sigma \cdot A_{abs} (T_{abs}^4 - T_{ciel}^4)$
	\dot{Q}_{D2-amb}	Convection	Diamètre extérieur	Air ambiant	$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} \cdot A_{abs} \cdot (T_{abs} - T_{amb})$

TABLEAU VI.1 : Les transferts de chaleur au niveau de l'absorbeur

CHAPITRE VII

REALISATION DU CONCENTRATEUR
ET EXPERIMENTATION

VII.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes étapes de réalisation d'un prototype de concentrateur solaire cylindroparabolique conçu conformément au modèle théorique étudié au chapitre précédent. Nos expériences ont été réalisées au niveau du laboratoire de Génie physique des hydrocarbures de l'Université M'Hamed Bougara de Boumerdès ex-INH, faculté des hydrocarbures et de la chimie. Le concentrateur est placé sur la terrasse du Bloc A, de la faculté des hydrocarbures et de la chimie. La figure **VII.5** montre l'installation du prototype dont les spécifications sont représentées dans les tableaux **VII.2**, **VII.3** et **VII.4**.

VII.2 Description générale du montage réalisé

Nous avons un montage de support en cornières d'acier et une structure porteuse du miroir de forme parallélépipède avec un axe horizontal de rotation qui permet de suivre les positions du soleil durant la journée, ce dispositif a été réalisé manuellement.

Le concentrateur est composé de trois éléments essentiels :

- Le réflecteur ;
- L'absorbeur ;
- La structure en acier.

Le miroir réflecteur concentrateur est de géométrie cylindroparabolique en inox brillant, soutenu par un gabarit de forme parallélépipédique. Le concentrateur est illustré par la figure VII.3

L'importance de la situation météorologique joue un rôle primordial dans le déroulement des expériences. On peut citer à titre d'exemple qu'en cas d'une situation météorologique défavorable le cas d'un ciel couvert, de grêle, de vent fort, présence d'aérosol ou de pollution, ces paramètres peuvent survenir pour empêcher ou minimiser le fonctionnement optimal du concentrateur.

VII.2.1 Conception du concentrateur

La conception du concentrateur réalisé pour le besoin de l'expérience se présente selon les schémas illustrés par les figures (**VII.1**, **VII.2**, **VII.3** et **VII.4**) suivantes :

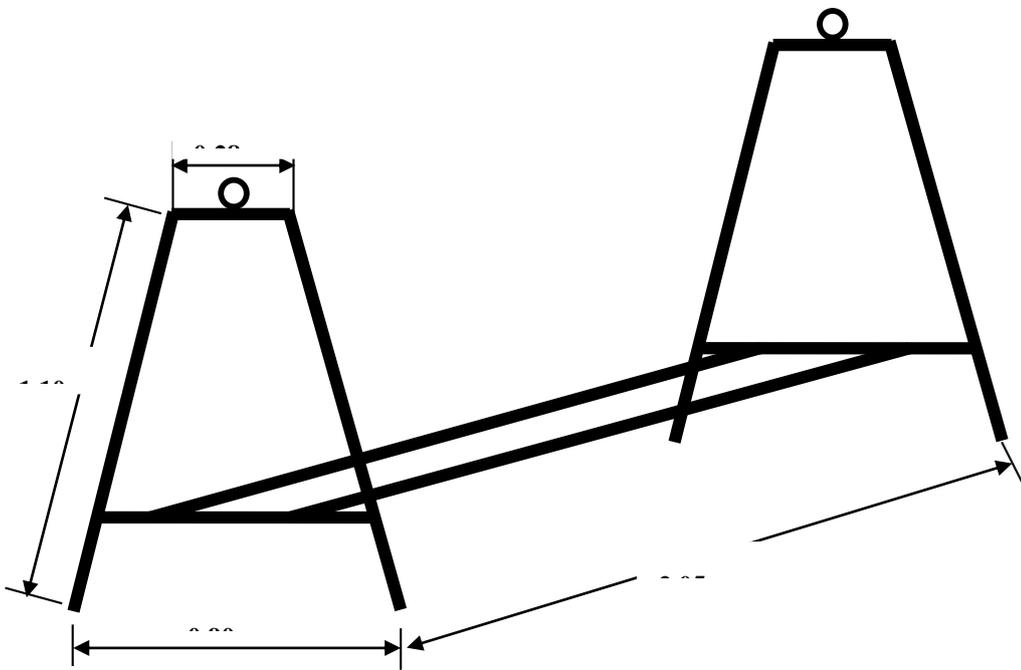


FIGURE VII.1: Le support en acier.

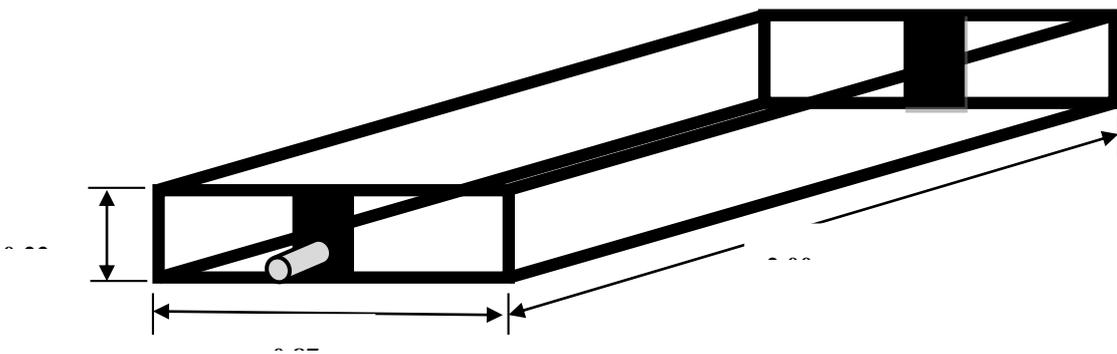


FIGURE VII.2: La structure porteuse miroir, la partie relative.

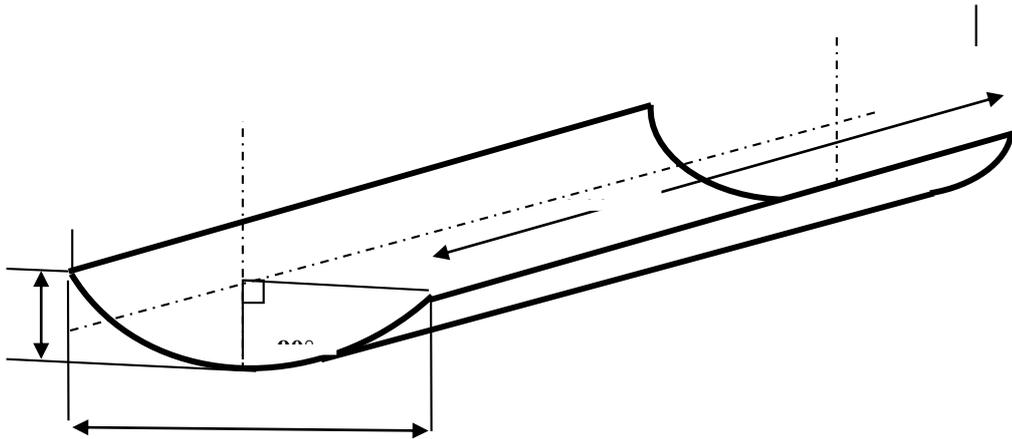


FIGURE VII.3: La tôle miroir concentrateur

VII.2.2 Liste du matériel utilisé

Désignation	Unité	Qté
- Tôle INOX Brillante Dim (0.5*2000*1000) mm	u	01
Cornières en acier:		
- cornière 35*35*0.35 mm Lourde barre de 6m	u	04
- Fer T 35*0.30 mm barre de 6m	u	01
- Tube en acier galvanisé \varnothing 40 mm (axe)	u	02
- Tube en acier galvanisé \varnothing 35 mm (axe)	u	02
Accessoires de travail et de montage		
- Mèche pour acier \varnothing 12 mm	u	01
- Mèche pour acier \varnothing 8 mm	u	02
- Mèche pour acier \varnothing 6 mm	u	01
- Baguette de soudure Rutile \varnothing 3.25	u	10
- Disque pour acier	u	01
Peinture :		
- Papier verre	u	03
- Anti rouille (250g)	u	01
- Peinture argentée en soc (250g)	u	01
- Peinture argentée en soufflète	u	01
- Peinture noir non réfléchissante	u	01
- Pinceau	u	01
Boulons, rondelle et écrous :	u	15
- Boulons, rondelles et écrous 13	u	10
- Boulons, rondelles et écrous 10		
Plomberie :	m	2,30
- Tube en cuivre \varnothing 12mm	m	03
- Tube en cuivre \varnothing 6mm	m	07
- Tuyau en plastique	u	01
- Robinet en plastique	u	01
- Téflon		
- Collier \varnothing 12 mm	u	02
Menuiserie :		
- contreplaquer(pour maintenir la forme parabolique du miroir)		

TABLEAU VII.1: Les matériels utilisés

VII.2.3 Description des différentes parties du prototype

VII.2.3.1 Le réflecteur

Il est constitué d'une tôle en inox brillante dans une cage parallélépipède en cornières faite pour donner la forme cylindroparabolique au miroir. Tout l'ensemble est posé sur un support rigide en acier, posé au sol.

Acier Inox ayant un coefficient de réflexion égal à 0,93 – 0,96

Caractéristiques géométriques du réflecteur	
Longueur	$l = 2 \text{ m}$
Largeur linéaire	$l_1 = 1 \text{ m}$
Largeur d'ouverture	$l_a = 0,87 \text{ m}$
L'angle d'ouverture	$\varphi = 90^\circ$
Distance focale	$f = 0,215 \text{ m}$
Surface d'ouverture	$A_a = 0,87 \times 2 \text{ m}^2$

TABLEAU VII.2: Spécification du réflecteur

VII.2.3.2 L'absorbeur

Le métal du récepteur doit être un bon conducteur de chaleur, pour cela nous avons choisi le cuivre ($360 \text{ W}/(^{\circ}\text{K} \cdot \text{m}^2)$) comme dispositif absorbant. C'est un tube 10/12, 10 mm diamètre intérieur, 12 mm diamètre extérieur et 220 cm de longueur. L'absorbeur est recouvert d'une mince couche de peinture noire non réfléchissante pour diminuer la réflexion des rayons solaires. Il est posé le long de la ligne focale du cylindre parabolique.

- coefficient d'absorption de l'absorbeur : 0.8

- masse du récepteur vide 0,562 kg

Caractéristiques géométriques de l'absorbeur	
Diamètre extérieur	$D_e = 0,012 \text{ m}$
Diamètre intérieur	$D_i = 0,010 \text{ m}$
La longueur	$L = 2,00 \text{ m}$
Surface totale	$S_r = 0,0471 \text{ m}^2$
Surface de captation	$A_r = 0,00783 \text{ m}^2$

TABLEAU VII.3: Spécifications de l'absorbeur

La concentration géométrique de ce modèle est donnée par le rapport : $C_g = \frac{A_a}{A_r} = 23$



FIGURE VII.4: L'absorbeur



FIGURE VII.5: Le concentrateur parabolique

VII.3 L'expérimentation

Notre série d'expériences s'est déroulée durant la journée du 22 juin 2012, de 9h00 à 14h30. Le test s'est déroulé de la manière suivante :

VII.3.1 Installation du concentrateur

Nous savons que le concentrateur cylindroparabolique fonctionne quand les rayons solaires rentrent parallèles à son axe et perpendiculaire sur la surface d'ouverture. Donc il faut le placer dans un endroit clair, avec un ciel dégagé en évitant les zones d'ombres autour de l'équipement.

VII.3.2 Réglage du concentrateur

L'orientation du concentrateur joue un rôle très important sur le niveau de réception du rayonnement solaire, le concentrateur est pointé sur l'orientation Est- Ouest à l'aide d'une boussole. Chaque 10 min on change sa position en le tournant légèrement sur son axe manuellement pour suivre le soleil et les rayons solaires seront perpendiculaires à la surface d'ouverture ou ils seront réfléchies au foyer grâce au miroir réflecteur parabolique et formeront ainsi la tache solaire qui devrait apparaître sous l'absorbeur.



FIGURE VII.6: La tache solaire sur l'absorbeur.

VII.3.3 Les emplacements des thermocouples de mesure de température

Pour suivre l'état et le bon déroulement de l'expérience nous avons programmé de prélever quatre températures à l'aide des thermocouples dans des endroits différents : sur la surface de l'absorbeur, à l'entrée de l'eau, à la sortie de l'eau et dans l'air ambiant.

La figure suivante montre les positions des quatre thermocouples pour la mesure des différentes températures.

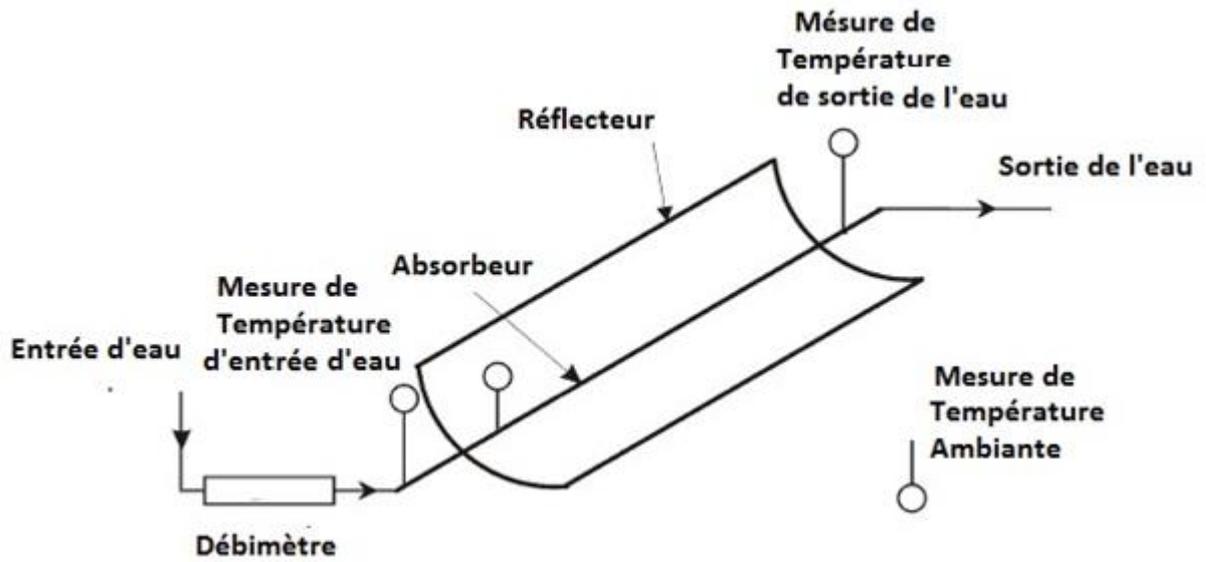


FIGURE VII.7: Les endroits des thermocouples sur le montage.



a : à l'entrée du récepteur



b : à la sortie du récepteur



c : sur la surface de l'absorbeur

FIGURE VII.8 a, b, et c : Les emplacements des thermocouples



FIGURE VII.9: Vue générale du prototype du concentrateur parabolique.

VII. 3.4 Les éléments du concentrateur et leurs propriétés

Les éléments du concentrateur et leurs propriétés	Valeur
<u>Le miroir concentrateur :</u>	
- Largeur linéaire	1,00 m
- Largeur d'ouverture	0,87 m
- Longueur	2,00 m
- Surface	1,56 m ²
- Distance focale	0,215 m
- Angle d'ouverture	90°
- Rapport de concentration	23
- Taux de réflexion	0,93
<u>Le récepteur :</u>	
- Diamètre de tube	0,010 m
- Longueur	2,00 m
- Absorptivité	0,90
- Emissivité	0,40
<u>La structure métallique :</u>	
1- Les pieds	
- Hauteur	1,10 m
- Ouverture en bas	0,90 m
2- La structure porteuse du miroir	
- Longueur	2,05 m
- Largeur	0,87 m
- Hauteur	0,22 m

TABLEAU VII.4 : Les éléments du concentrateur et leurs propriétés

VII.3.5 Les mesures

Les températures ont été prises à l'aide de thermocouples à affichage numérique. Le relevé de la température se fait toutes les 10 minutes.

Le tube en cuivre (absorbeur) est à la température ambiante quand l'expérience a commencé.

Les mesures sont relevées dans le tableau suivant :

Mesures relevées au cours de l'expérience

Heure	TSV heure	T _{abs} °C	T _e °C	T _s °C	T _s - T _a °C	T _{ext} °C	Eclairement W/m ²
9h:00	9,00	25	23	23	0	24	607
9h:10	9,17	25	23	23	0	24	634
9h:20	9,33	25	23	23	0	24	665
9h:30	9,50	25	23	23	0	24	716
9h:40	9,67	25	23	23	0	24	734
9h:50	9,83	25	23	23	0	24	772
10h:00	10,00	46	23	24	1	24	791
10h:10	10,17	59	23	27	4	24	840
10h:20	10,33	61	23	28	5	24	859
10h:30	10,50	66	23	28	5	24	860
10h:40	10,67	70	23	28	5	25	879
10h:50	10,83	69	23	29	6	25	897
11h:00	11,00	66	23	28	5	25	915
11h:10	11,17	67	23	28	5	26	926
11h:20	11,33	68	23	29	6	26	941
11h:30	11,50	69	23	30	7	26	951
11h:40	11,67	70	23	30	7	26	966
11h:50	11,83	72	23	31	8	26	974
12h:00	12,00	71	23	31	8	26	982
12h:10	12,17	68	23	33	10	26	986
12h:20	12,33	69	23	38	15	26	992
12h:30	12,50	71	23	40	17	26	997
12h:40	12,67	70	23	42	19	27	1002
12h:50	12,83	69	23	43	20	27	999
13h:00	13,00	73	23	44	21	27	1003
13h:10	13,17	78	23	44	21	27	996
13h:20	13,33	70	23	43	20	27	995
13h:30	13,50	71	23	43	20	27	990
13h:40	13,67	70	23	42	19	28	986
13h:50	13,83	69	23	42	19	28	984
14h:00	14,00	68	23	40	17	28	967
14h:10	14,17	70	23	39	16	28	959
14h:20	14,33	66	23	39	16	28	947

TABLEAU VII.5: Boumerdès : 22/06/2012, Orientation du concentrateur: Est-Ouest Débit = 0,01 kg/s



FIGURE VII.10: Les plus grandes températures atteintes dans l'expérience

VII.4 Les problèmes rencontrés

Les problèmes rencontrés lors de la réalisation du prototype de concentrateur cylindro-parabolique et durant l'expérience se résument comme suit :

- Tenir la courbure exacte du miroir sous la forme parabolique : nous avons réalisé le profil suivant la fonction de la parabole et tracé sur un contreplaqué. En menuiserie nous avons découpé les contreplaqués pour les mettre sur chaque côté en haut et en bas de la parabole. (Voir photo Annexe).
- Le réglage et l'ajustement sur la meilleure position dans l'orientation Est-Ouest : à cause de la trajectoire de la terre qui est un peu inclinée la hauteur angulaire du soleil change au cours de la journée, à l'aide d'une boussole et le suivi des ombres nous avons pu obtenir la meilleure position.
- La courbure de l'absorbeur et son déplacement de la ligne focale : le tube en cuivre peint en noir sur la ligne focale se courbe à cause de la température et sa longueur de 2m, nous l'avons attaché sur les deux côtés aux axes avec des cordes.
- Le problème de relevé des températures car les valeurs varient rapidement sous l'influence de la vitesse du vent.

CHAPITRE VIII

RESULTATS ET DISCUSSION

Les mesures de cette expérience sont prises le vendredi 22/06/2012 sur la terrasse du Bloc A, EX- INH Boumerdès, Latitude 36,76°, altitude 60m, avec un ciel clair, et une humidité de 60 % selon estimation de la météo Algérie.

VIII.1 Evolution des flux et des puissances

VIII.1.1 Comparaison entre l'éclairement théorique et mesuré

- Rappelons que l'éclairement théorique est la somme de l'éclairement reçu sur le plan récepteur et l'éclairement diffus, ils sont calculés à partir des expressions (II-37) et (II-40).
- La figure **VIII.1** montre le flux expérimental qui reproduit assez fidèlement le flux théorique. Toutefois, nous remarquons un léger décalage entre les deux courbes ne dépassant pas les 10%. Ceci est dû entre autre au non disponibilité de valeurs exactes de certains paramètres qui figurent dans la formule théorique utilisée. En effet, par exemple la valeur de 60% de l'humidité, n'est qu'approximative, elle est donnée par les services de météo pour la ville de Boumerdès pour cette journée. De plus, il est clair que sa valeur est variable au cours de la journée, dont on n'a pas tenu compte. Par ailleurs, l'indice optique a été calculé également avec des valeurs approchées relatives à la ville de Boumerdès.
- En absence de Pyrhéliomètre, pour déterminer l'éclairement solaire direct parallèle à l'axe optique de miroir cylindroparabolique, on utilise une méthode de calcul simple qui consiste à retrancher du rayonnement globale le rayonnement diffus et diviser le tout par $\sin(h)$.
- Ces différents paramètres ont induit par exemple un décalage entre les maxima d'une heure et demi, alors que le maximum des intensités est pratiquement identique.

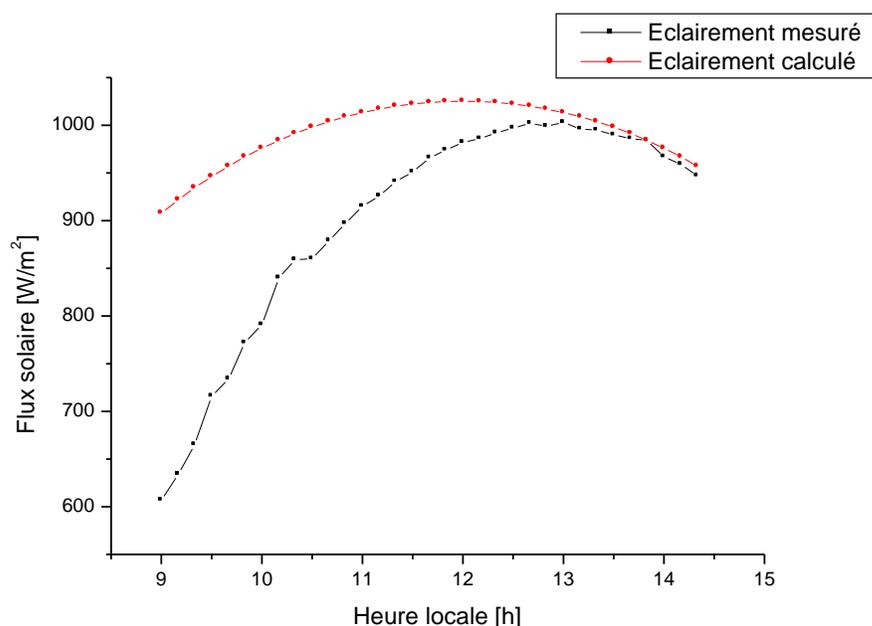


FIGURE VIII.1 : L'éclairement solaire direct lieu de mesure : Boumerdès, Latitude: 36,73°.

VIII.1.2 Evolution des différents éclairagements théorique le long de la durée de l'expérience

- Sur le graphe de la figure VIII.2 nous avons représenté les flux direct et diffus, donnés théoriquement par leurs formules empiriques qui tiennent compte des paramètres météorologiques, de la position du soleil, des coordonnées géographiques du lieu de l'expérimentation et de la qualité de l'air environnant (humidité, indice de l'air et sa composition,...). Ces flux étant intimement liés au flux global et mesuré, cette courbe permet de voir l'évolution relative de chacun des flux.

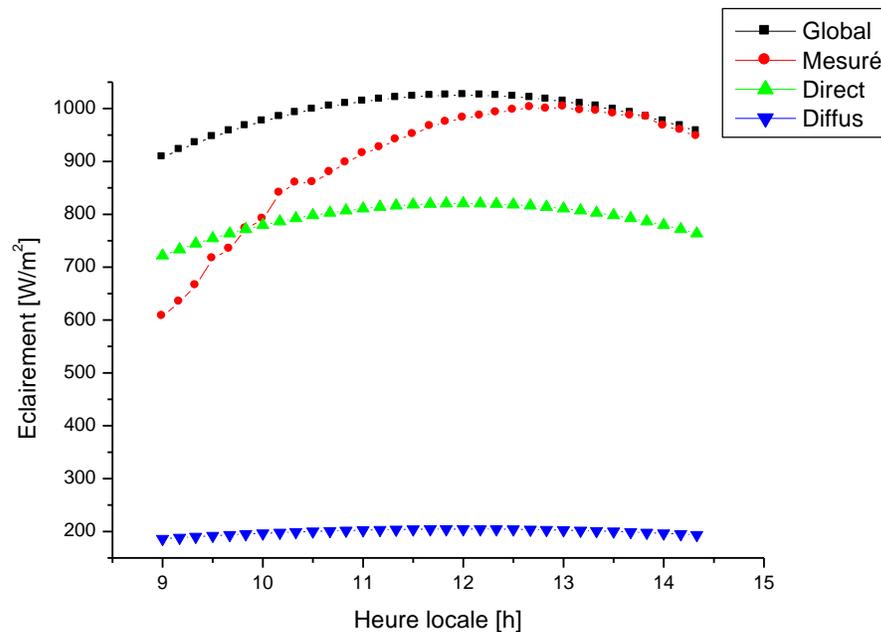


FIGURE VIII.2 : Variation des différents flux durant la journée de l'expérience

- Nous constatons que la variation du flux diffus est assez faible. Ceci nous donne un renseignement précis sur l'évolution de la composition de l'atmosphère durant la journée de l'expérience.
- On peut conclure, en effet que les caractéristiques de l'atmosphère (humidité, indice optique, qualité de l'air) varie très peu durant l'expérience.
- Cette observation va dans le sens de l'hypothèse des paramètres constants caractérisant l'atmosphère. Ainsi, le décalage entre les courbes théorique et expérimentale pourrait être dû aux valeurs non appropriées utilisées.
- La courbe illustrée par la figure VIII.2, montre que l'éclairement solaire direct varie lentement entre 09h30 jusqu'à 11h10 avec une vitesse de $76,5 W/m^2/heure$, dans l'intervalle 11h10 et 15h00 environ l'éclairement varie faiblement et devient presque stable ($\sim 20 W/m^2.heure$) où il atteint son maximum.
- Lorsque le ciel est clair toute la journée la répartition de l'éclairement est symétrique par rapport au midi solaire vrai.
- On remarque aussi que vers 13h00 jusqu'à 14h00 environ, une augmentation d'éclairement liée à l'activité solaire dans cette période et au rayonnement électromagnétique envoyé.

VIII.1.3 Évolution des puissances journalières

- La figure VIII.3 montre l'évolution de la puissance reçue par le réflecteur (Q_{ref}), celle utile (Q_{util}), celle perdue (Q_{pert}) ainsi que celle reçue par l'absorbeur (Q_{Abs}).
- Rappelant que ces courbes expérimentales ont été obtenues respectivement à partir des expressions (VI.4), (VI.1), (VI.2) et (VI.3).

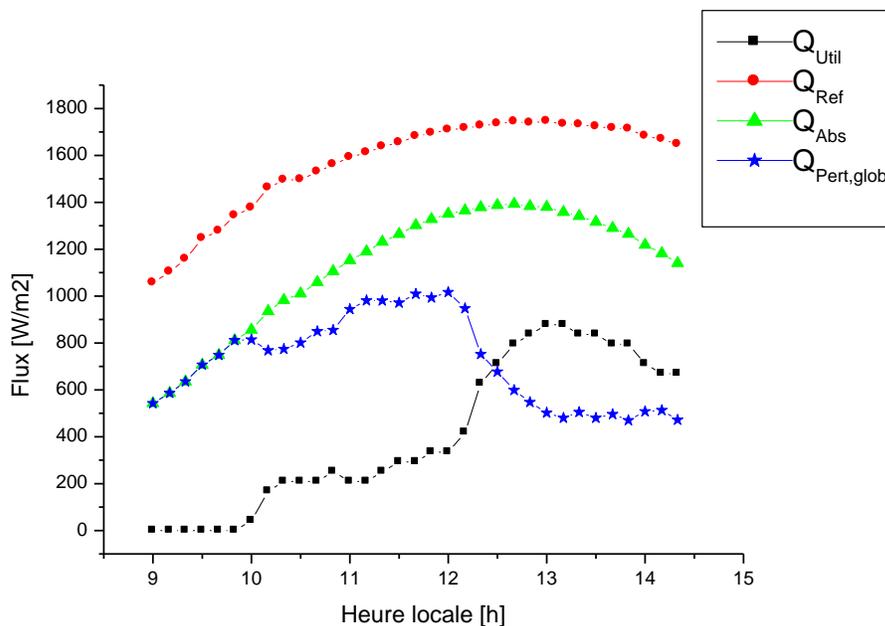


FIGURE VIII.3 : Variations des différentes puissances en fonction des heures de la journée

- Il est à noter que la puissance reçue par le réflecteur (Q_{ref}) n'est pas transmise totalement à l'absorbeur, ceci est dû aux pertes optiques. En effet, on remarque que : $Q_{ref} > Q_{Abs} > Q_{util}$.

Toutefois, il est à signaler que les pertes demeurent sensiblement de même grandeur toute l'expérience, ceci montre que les légères variations atmosphériques ont une faible contribution dans les pertes thermique. Ainsi la puissance utile (Q_{util}) récupérée dans le chauffage de l'eau suit sensiblement le flux reçu sur le miroir.

- N'oublions pas que des zones d'ombres se développent sur le miroir durant l'expérience à cause de changement des positions du soleil. Sur place nous constatons que la zone d'ombre sur le miroir est maximale au lever et au coucher du soleil et nulle au midi vrai. Notons que cette zone d'ombre touche le miroir et beaucoup plus encore l'absorbeur à cause de l'angle d'incidence.

- Les effets de cette zone d'ombre sont visibles sur la figure VIII.3. En effet on voit que jusqu'à 10 h locale, la puissance utile est minimale. De même vers le coucher du soleil (voir figure VI.3).

- Ces effets se répercutent également sur la courbe représentant $Q_{pert, glob}$ et correspondant aux pertes globales incluant les pertes optiques et thermiques. On observe sur cette courbe une réduction des pertes à partir de 12h locale, pour laquelle les zones d'ombres (bords) s'atténuent jusqu'à disparition totale vers 13h locale. Ainsi, après 13h, les seules pertes restantes sont celles thermiques, ceci implique une augmentation de flux utile, comme le montre bien la figure.

VIII.I.4 Variations de flux mesuré et de flux utile absorbé par le récepteur

- La figure VIII.4 montre les variations de flux mesuré et de flux utile absorbé par le récepteur durant l'expérience.

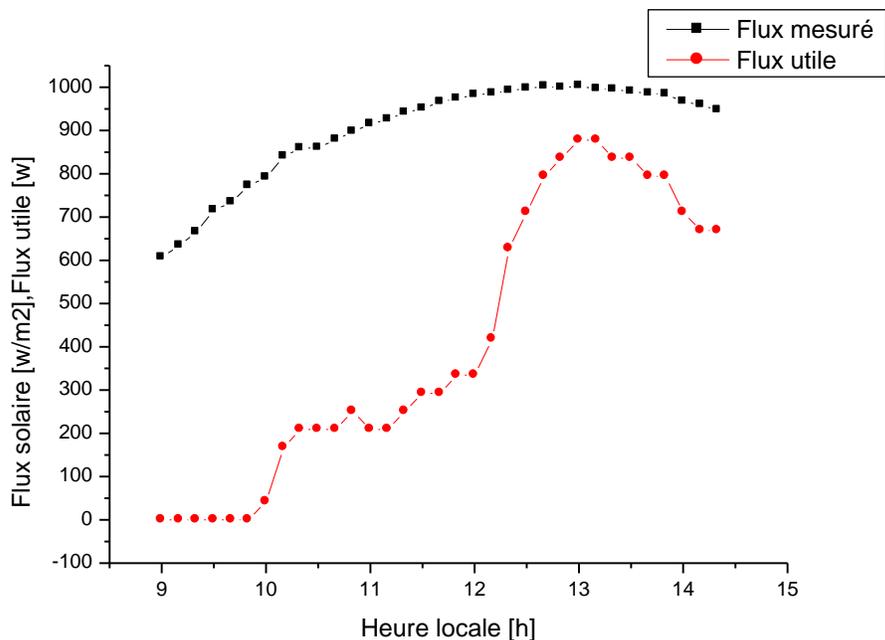


FIGURE VIII.4 : Variations de flux mesuré et de flux utile absorbé par le récepteur

- On constate que l'écart est remarquable entre 9h et 12h, il se réduit entre 12h et 13h30 à cause des pertes dans toutes les formes : les pertes optiques de réflexion, géométriques de l'ombre, à l'angle d'incidence de rayonnement solaire sur la surface de réflecteur, et aux pertes thermiques essentiellement par la convection et le rayonnement.

VIII.2 Evolution des températures

VIII.2.1 Variations des différentes températures au cours de l'expérience

- Nous avons jugé utile d'examiner les variations de températures en différents endroits du dispositif de chauffage de l'eau durant une journée d'expérimentation. En effet, des capteurs de température sont placés à des endroits préalablement choisis (voir figure VII.7).

- La figure VIII.5 montre les résultats obtenus. Pour les températures ambiantes (T_{amb}) et d'entrée d'eau (T_e) constante, la figure montre l'évolution des températures de l'absorbeur et celle de sortie de l'eau (T_s).

- Notons que la température de l'absorbeur est celle relevée par le capteur placé sur la surface externe de l'absorbeur. On constate qu'un régime permanent s'établit assez rapidement. Ceci est dû à la forte conductivité thermique du cuivre qui constitue le matériau de l'absorbeur.

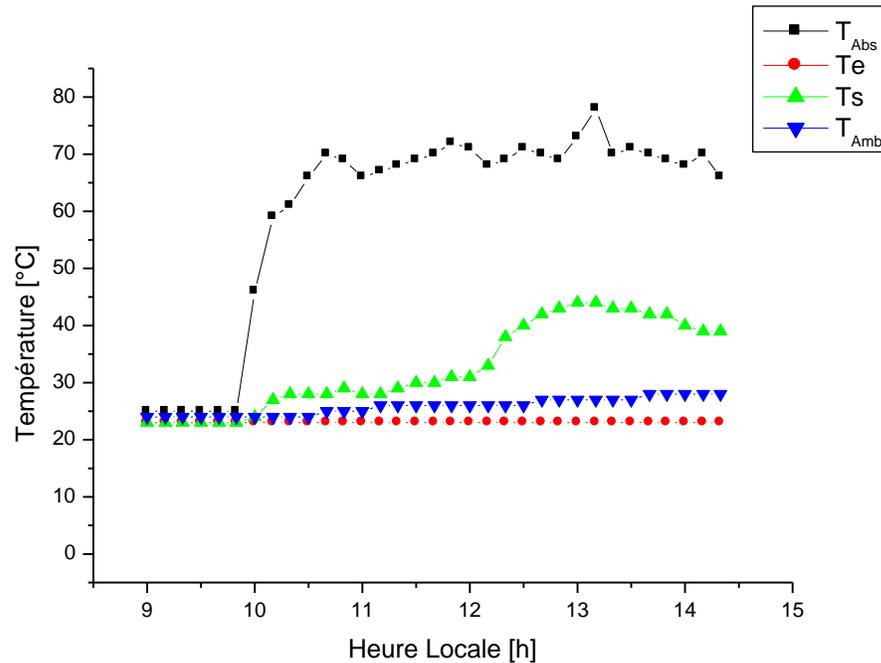


FIGURE VIII.5 : Variations de différentes températures au cours de l'expérience

- Cette figure met en relief la variation de température de sortie de l'eau. On constate d'abord une légère augmentation de la température de sortie de l'eau jusqu'à 12h locale. Puis une augmentation sensible qui atteint les 44°C aux environs de 13h locale.
- La température de sortie de l'eau devrait en principe suivre l'évolution de la température de l'absorbeur. On constate, cependant que cette observation n'est vérifiée qu'à partir de 12h locale, c'est-à-dire, qu'après la disparation totale de toute zone d'ombre sur le miroir et beaucoup plus sur l'absorbeur.
- En effet, durant toute l'expérience, le capteur de température se trouve toujours en zone éclairée et ne montre pas qu'une partie de l'absorbeur est passée dans une zone d'ombre. Cette anomalie peut être éliminée, en augmentant le nombre de capteurs sur l'absorbeur ou enlevé les supports de courbure du miroir sur les côtés.

VIII.2.2 Variation des différentes températures de sortie T_s et d'entrée T_e de l'eau

- La figure VIII.6 illustre la variation relative de température de sortie de l'eau T_s par rapport à celle d'entrée T_e au cours de la journée de l'expérimentation.

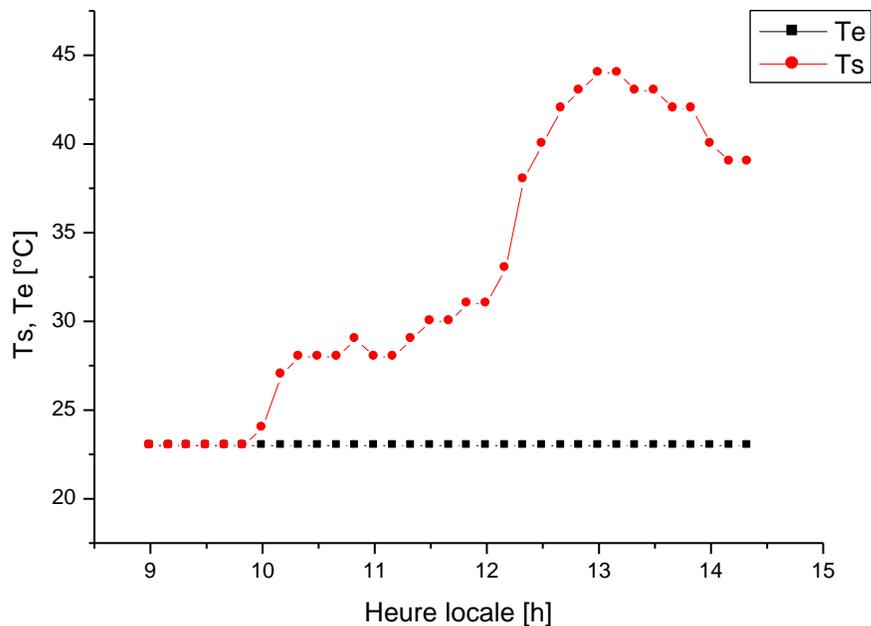


FIGURE VIII.6 : Variations des différentes températures de sortie et d'entrée

- Pour nos essais la température d'entrée de l'eau étant maintenue constante, nous constatons que celle de la sortie ne commence à prendre de l'ampleur qu'à partir de 10h locale pour atteindre le maximum aux alentours de 13h locale.

- Nous remarquons toujours l'influence de la zone d'ombre qui s'atténue entre 12h et 15h locale et durant cette période la température augmente sensiblement.

VIII.2.3 Variation des températures de sortie expérimentale et théorique

- Il est intéressant, à présent de faire une comparaison entre les températures expérimentales et théorique de sortie de l'eau. Comme support théorique, nous disposons d'une expression couramment utilisée et modélisant un échange de chaleur en convection forcée dans un tube cylindrique (VI-24). Cette expression suppose une température uniforme du cylindre.

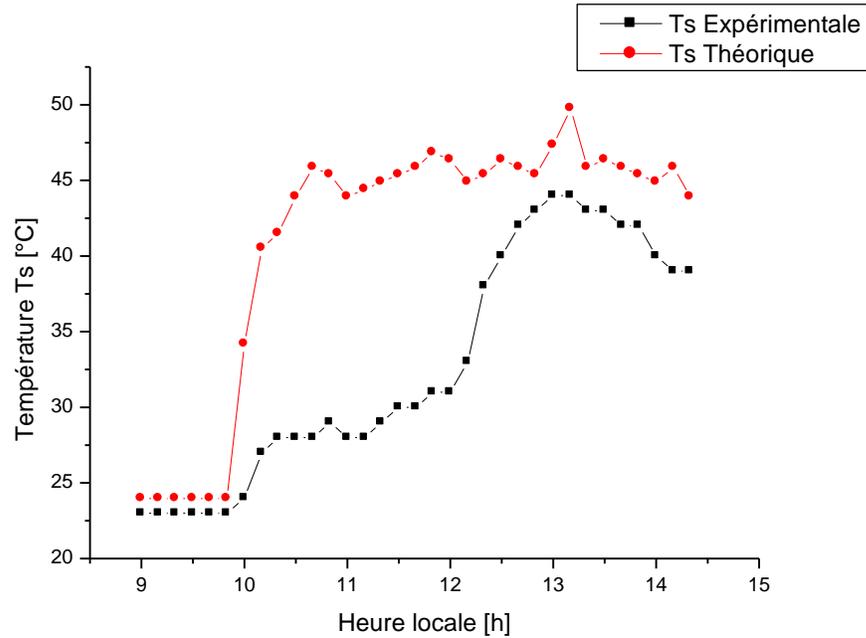


FIGURE VIII.7 : Variations des températures de sortie expérimentale et théorique

- La figure VIII.7 montre ainsi les résultats obtenus, où on observe clairement que les courbes ne se superposent pas. Ceci montre bien que la température de l'absorbeur n'est pas uniforme comme supposée dans le calcul théorique. Les zones d'ombres causées par l'angle d'incidence, ainsi que l'emplacement des capteurs décrits précédemment sont en particulier responsables de cet écart.

VIII.2.4 Variation des températures de sortie T_s d'eau et de l'absorbeur T_{abs}

- La figure VIII.8 montre l'évolution des températures de l'absorbeur (T_{abs}) et la température de sortie de l'eau (T_s) durant la journée d'expérimentation.

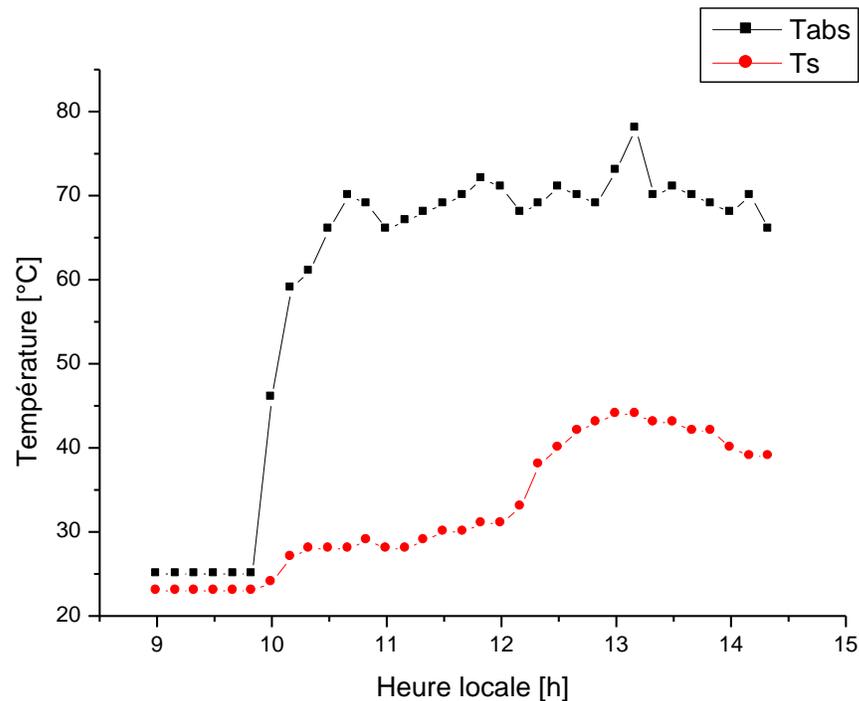


FIGURE VIII.8 : Variations des températures d'absorbeur durant l'expérience

- Au début de l'expérience la température de l'absorbeur est égale à la température ambiante.
- Comme le prévoit la théorie ces courbes devraient être de même allure. Cependant, ce résultat n'est visible qu'à partir de 12h locale. En effet, comme il a été dit précédemment, la position du capteur sur l'absorbeur ne traduit pas la distribution réelle de la température de l'absorbeur à cause des zones d'ombre déjà discutées. Signalons toutefois qu'un pic de température de l'absorbeur est atteint vers 13h locale avec 87°C, comme le flux mesuré.

VIII.2.5 Évolution de la température de Sortie T_s en fonction de la température d'absorbeur T_{Abs}

- Les températures de sortie de l'eau (T_s) et de l'absorbeur (T_{Abs}) étant intimement liées, nous avons voulu représenter leur dépendance ce qui est montrée sur la figure VIII.9.

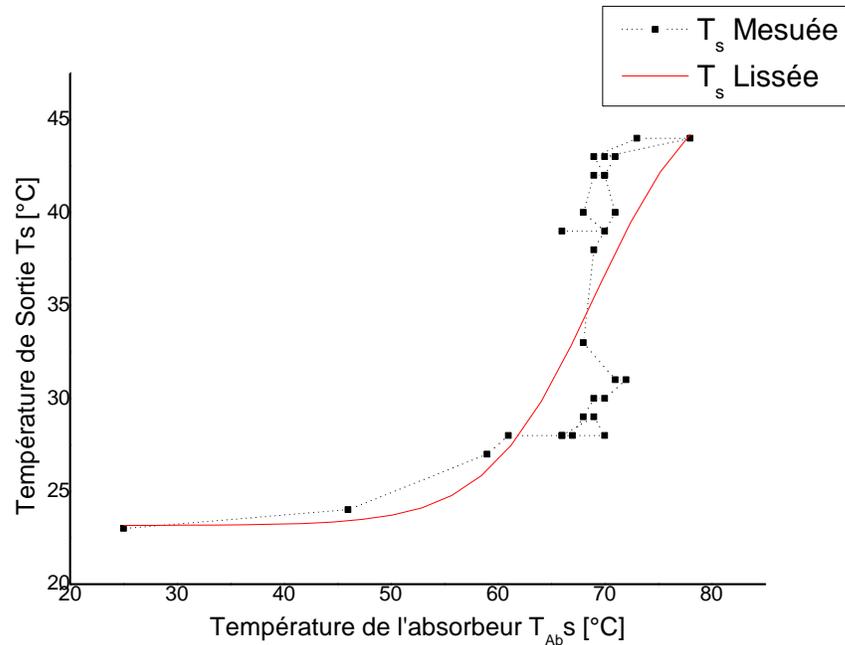


FIGURE VIII.9 : Variations de la température de Sortie T_s en fonction de la température d'absorbeur T_{Abs}

- Nous remarquons une forte dépendance quasi linéaire pour les températures de l'absorbeur au dessus de 60 °C, cette courbe traduit en effet l'échange de chaleur entre l'absorbeur et l'eau en circulation. Ainsi, l'échange est meilleur aux grandes températures de l'absorbeur et correspond donc aux meilleurs rendements.

VIII.2.6 Évolution théorique de température de sortie T_s en fonction de la longueur de l'absorbeur

- Il est clair que la température de sortie de l'eau dépend de la longueur de l'absorbeur. Cette dépendance est donnée par l'expression (VI-26) et elle est représentée sur la figure VIII.10.

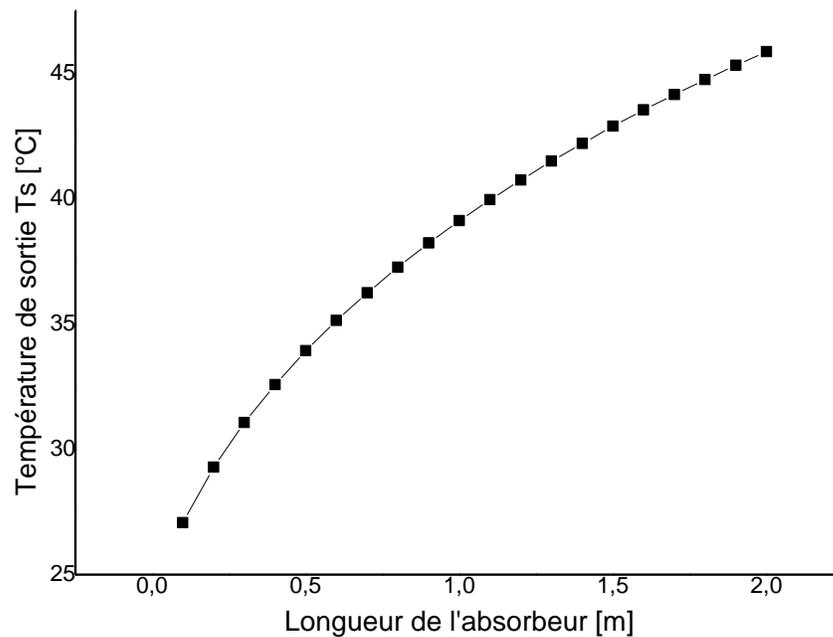


FIGURE VIII.10 : Évolution de la température T_s en fonction de la longueur de l'absorbeur

- L'expérimentation correspondante n'a pu être réalisée vu à la complexité du montage. Cette expérience pourrait être réalisée de deux manières différentes : soit en utilisant plusieurs longueurs de tube absorbeur et en mesurant à chaque fois la température de sortie (T_s), soit en implantant des capteurs de température en différents points sur la longueur de tube de l'absorbeur.
- A vitesse égale l'augmentation de la longueur de tube de l'absorbeur augmente le temps de séjour de l'eau améliore ainsi l'échange entre le fluide caloporteur en circulation et l'absorbeur.

VIII.2.7 Variation de la différence de température T_s-T_e en fonction du flux reçu

- La figure VIII.11, montre la variation de l'écart de température (T_s-T_e) d'entrée et de sortie en fonction du flux solaire reçu par le réflecteur.

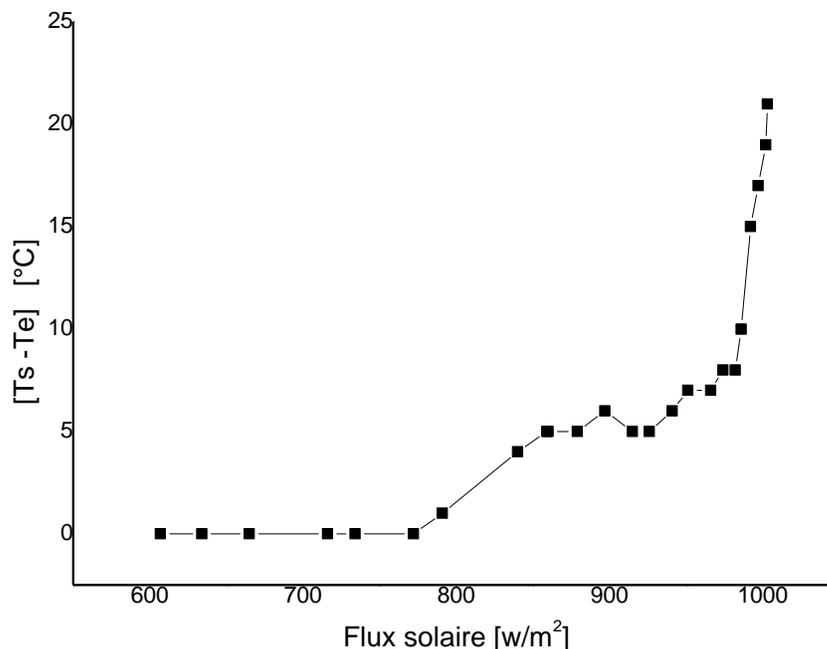


FIGURE VIII.11 : Variation de la différence de température T_s-T_e en fonction du flux reçu

- Nous constatons que jusqu'à un flux de $800 W/m^2$, il n'y a pratiquement pas de différence entre les deux températures. Autrement dit, il n'y a pas d'échange de chaleur entre l'absorbeur et l'eau.
- En effet, ces flux correspondent aux moments de la journée pour lesquels le tube absorbeur baigne en partie dans la zone d'ombre, donc l'échauffement de l'eau ralentit. Au contraire quand les flux dépassant les $800 W/m^2$ sont obtenus pour des faibles angles d'incidences et donc des zones d'ombre réduites ou inexistantes.
- Signalons enfin un échange de chaleur intense et remarquable pour des flux voisinant les $1000 W/m^2$ qui sont vers 13h locale.
- Le flux solaire reçu sur le réflecteur est concentré par le miroir sur l'absorbeur, ce qui entraîne l'augmentation de la température de l'absorbeur, ensuite cette chaleur est transmise au fluide à l'intérieur du tube, ce qui crée l'augmentation de la différence de température, qui dépend de l'intensité de flux solaire reçu.

VIII. 3 Évolution des pertes

VIII. 3.1 Évolution de la perte globale, pertes optique et thermique :

- La figure VIII.12 montre l'évolution des différentes pertes le long de la journée d'expérimentation.

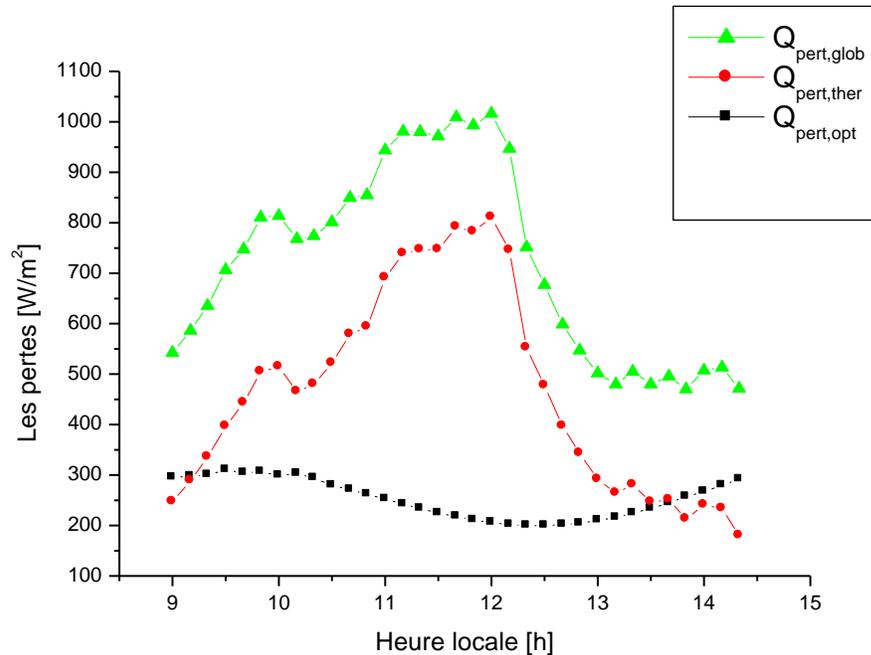


FIGURE VIII.12: Variation de la perte globale et les pertes thermique et optique.

- La perte globale étant une combinaison des pertes thermique et optique et sont représentées par l'expression (VI-2). Celles des pertes thermiques et optiques correspondent respectivement aux équations (VI-9) et (VI-7).

- Nous constatons que les pertes optiques sont minimales entre 12h et 13h locale. Durant cette période, l'angle d'incidence est nul et la zone d'ombre est inexistante. Ce qui a pour effet d'augmenter la température de l'absorbeur et donc d'accentuer les pertes par convection et par rayonnement à cause de l'élévation de la différence de température entre l'absorbeur et le milieu environnant.

VIII.3.2 Évolution des pertes thermiques

- Les variations des pertes thermiques sont représentées à la figure VIII.13.

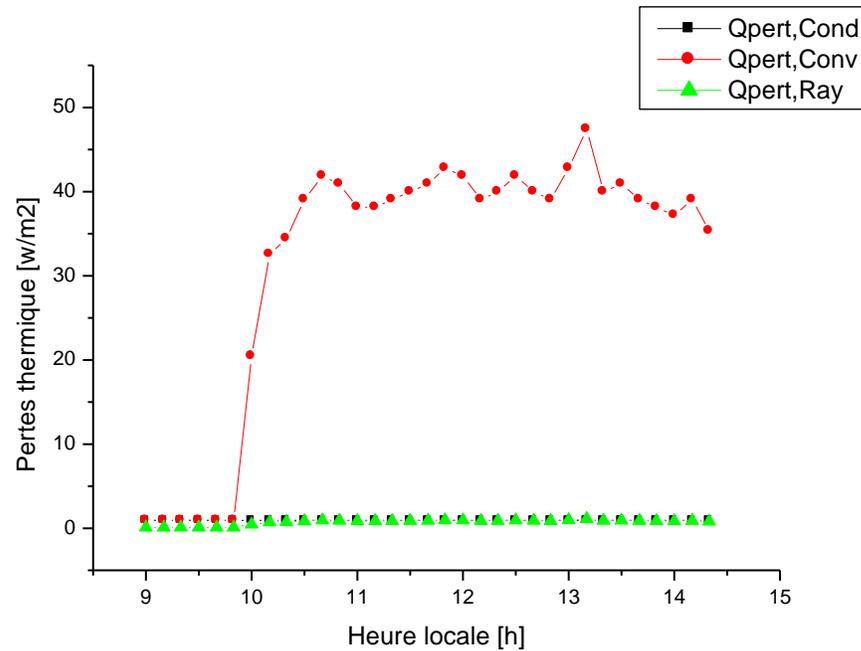


FIGURE VIII.13 : Vvariations des pertes thermiques

- Nous observons que les pertes thermiques par convection sont très importantes par rapport aux pertes thermiques par rayonnement et par conduction à cause de la différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.

- Nous constatons aussi que les pertes thermiques par conduction sont négligeables à cause de la faible épaisseur du tube et de nature métallique de l'absorbeur, (conductivité thermique considérable du cuivre).

VIII.4 Evolution du rendement :

VIII.4.1 Efficacité thermique et optique du concentrateur en fonction du temps

- La figure VIII.14 complète l'exploitation de nos mesures par l'illustration des variations du rendement le long d'une journée d'expérimentation.

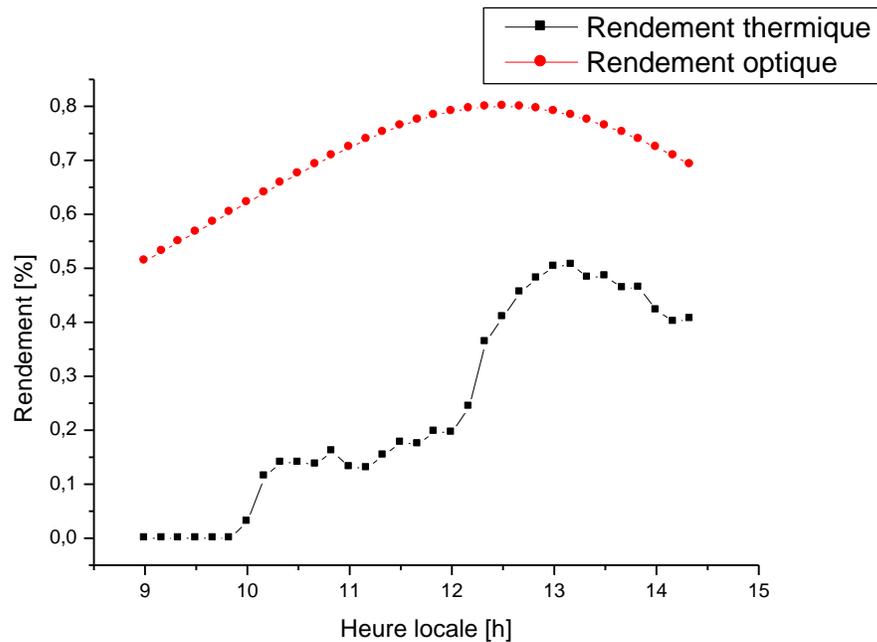


FIGURE VIII.14 : Évolution d'efficacité thermique et optique du concentrateur

- Les rendements optique et thermique sont représentés respectivement à partir des expressions (VI-28) et (VI-30).

- Ces courbes montrent que le rendement (théorique et optique) maximal se situe vers 13h locale.

Le rendement optique est directement lié à l'angle d'incidence et à la zone d'ombre, elle-même liée à cet angle.

- On voit que les deux rendements atteignent les valeurs maximales vers 13h locale c'est-à-dire quand la zone d'ombre aurait disparu.

VIII.4.2 Efficacité thermique et optique du concentrateur en fonction de l'angle d'incidence

- Le problème des rendements demeure toujours, l'un des principaux facteurs à examiner dans toute réalisation.
- Nous proposons dans ce qui suit d'examiner les rendements optique et thermique en fonction de l'angle d'incidence.
- Les expressions correspondantes sont données respectivement par (VI-28) et (VI-30). Ces expressions tiennent compte des paramètres géométriques du réflecteur et du rayonnement incident, ainsi que des paramètres optiques caractéristiques du réflecteur et de l'absorbeur.
- La prise en compte de ces facteurs spécifiques de notre installation nous a permis de tracer les courbes de la figure VIII.15.

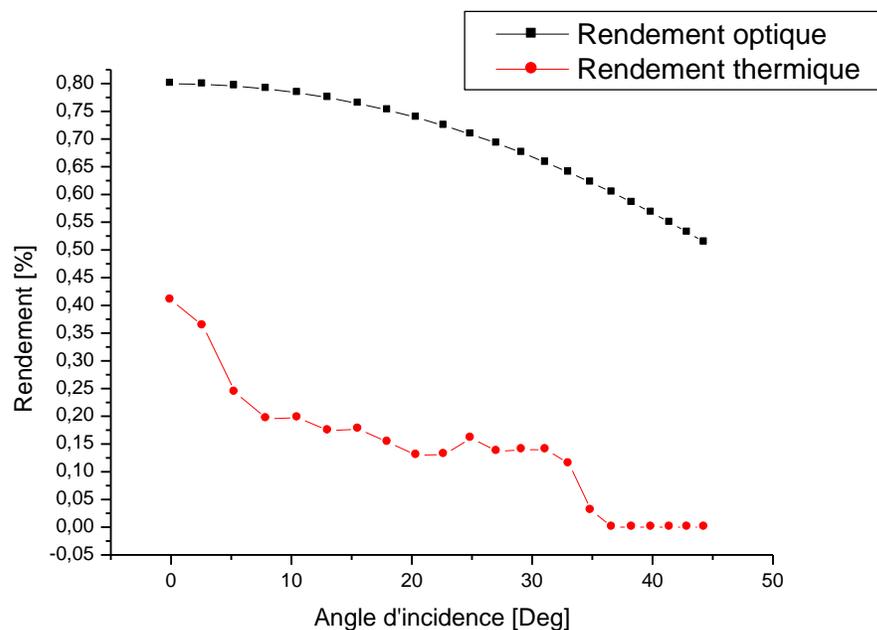


FIGURE VIII.15 : Évolution d'efficacité thermique et optique en fonction de l'angle d'incidence.

- Il est clair que les meilleurs rendements sont obtenus pour les angles d'incidences assez faibles, c'est-à-dire pour des positions du soleil voisines du 13 h locale.
- Remarquons que le rendement thermique est plus sensible à l'angle d'incidence que le rendement optique.
- Nous rappelons que le rendement optique dépend des caractéristiques du collecteur, ainsi que du rayonnement alors que le rendement thermique dépend du rayonnement, des caractéristiques de l'absorbeur et de la surface d'ouverture du réflecteur.

VIII.5 Evolution du coefficient d'échange en fonction de la longueur de l'absorbeur

- Dans cette partie, nous avons voulu voir la relation entre le coefficient d'échange et la longueur de tube absorbeur.
- Comme pour la figure VIII.10, le manque de moyen et la complexité de réalisation d'un système permettant d'observer la variation du coefficient d'échange en fonction de la longueur du tube absorbeur, nous a poussés à traiter théoriquement ce problème.

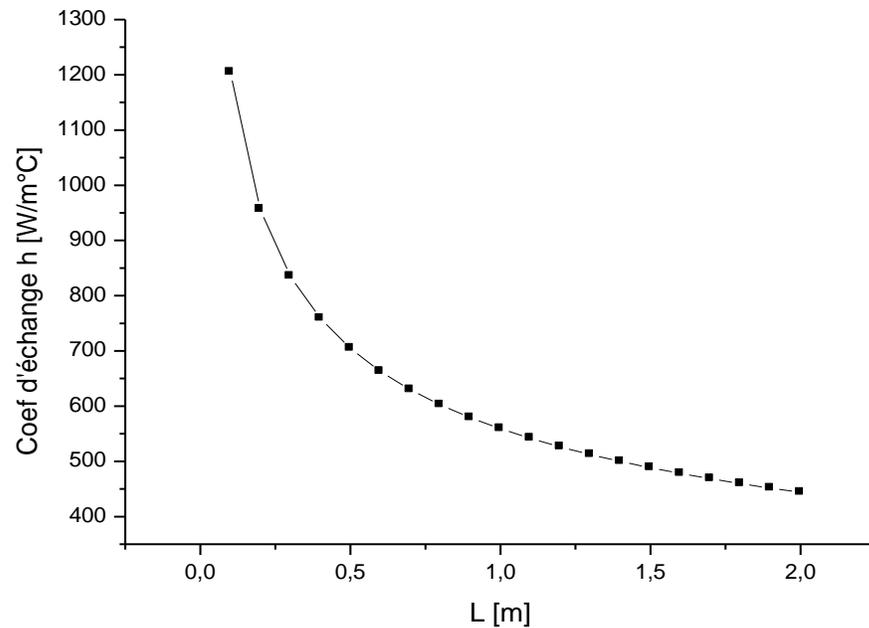


FIGURE VIII.16 : Evolution de coefficient d'échange en fonction de la longueur de l'absorbeur

- La figure VIII.16 est obtenue à partir de l'expression (VI-27) dans laquelle nous avons introduit les caractéristiques thermique dynamique de l'écoulement dans le tube absorbeur considéré.
- Nous constatons que la contribution du coefficient d'échange dans ce cas s'atténue nettement après une longueur de tube plus de 2m.

ETUDE
TECHNO-ECONOMIQUE

De nos jours, la consommation moyenne de l'eau chaude par personne est de l'ordre de 35 L/jour à des températures de $T = (40 - 50) ^\circ\text{C}$.

Ce besoin correspond par exemple à une énergie récupérée par un panneau solaire thermique ordinaire, d'une surface plane noire de 5m^2 .

La couverture en besoins énergétiques par l'énergie solaire thermique pour une famille de 5 personnes est de l'ordre de 40 à 70 % du besoin global.

Nous avons donc : $\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s} = 0,01 \text{ L/s}$

$$M = 36 \text{ kg/h} = 38 \text{ L/h}$$

$$Q_{\text{moy}} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)$$

Le rendement moyen pour une période de la journée ensoleillée s'étalant entre 10h et 15h est:

$$\eta_{\text{moy}} = 34,5\%$$

Ce rendement correspond aux températures moyennes :

$$T_e = 23 ^\circ\text{C}, T_{s\text{moy}} = 39^\circ\text{C} \text{ et } (T_s - T_e)_{\text{moy}} = 16^\circ\text{C}.$$

Pendant les 5h, cette quantité d'énergie correspond à la consommation moyenne de 05 personnes.

Calcul de l'énergie produite par le concentrateur :

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)$$

avec :

Q = quantité d'énergie utile [kJ] ;

\dot{m} = masse d'eau chauffée en une journée [kg/s] ;

C_p = Chaleur massique de l'eau [kJ/(kg $^\circ\text{C}$)] ;

T_s = température de consigne du ballon [$^\circ\text{C}$] ;

T_e = température d'eau froide [$^\circ\text{C}$] .

Application numérique :

$$\dot{m} = 0,01 \text{ kg/s} ; \quad C_p = 4.185 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{C)} ; \quad T_s = 39 ^\circ\text{C} ; \quad T_e = 23 ^\circ\text{C}.$$

$$Q = 0,01 \cdot 4185 \cdot (39 - 23) = 670 \text{ W} = 0,670 \text{ kW}$$

$$P = 0,670 \cdot 1 = 0,670 \text{ kWh}$$

P : Puissance utile [kWh]

Pendant 5h : $P = 0,670 \times 5 = 3,35 \text{ kWh}$

$CJ = 3,35 \text{ kWh} \times 4,2 \text{ DA} = 14 \text{ DA}$

CJ : Consommation journalière [DA]

Dépense annuelle :

$CA = 14 \text{ DA} \times 365 \text{ jours} = 5110 \text{ DA/an}$

CA : Consommation Annuelle [DA]

En résumant les calculs :

- Energie moyenne stockée par jour : 3,35 kWh ;
- Apport journalier: 14 DA/jour ;
- Profit moyen d'énergie : 1223 kWh/an ;
- Cout du concentrateur cylindroparabolique: 17200 DA ;
- Durée de remboursement : 3 ans et 4 mois.

Conclusion :

L'aspect économique :

- Suite aux calculs réalisés ci-dessus on constate qu'il est plus rentable de produire son eau chaude sanitaire avec de l'énergie solaire plutôt que d'utiliser une résistance électrique.
- On réalise ainsi, grâce au concentrateur, une économie de 5110 DA par an, soit 127750 DA sur 25 ans, pouvant correspondre à la durée de vie de l'installation, par rapport à l'énergie électrique (à prix des énergies constant).

L'aspect écologique :

- Du point de vue écologique, les avantages de l'utilisation de l'énergie solaire correspondent à la diminution de l'émission du CO₂ dans l'atmosphère et donc à une réduction de l'effet de serre, et du réchauffement climatique sur la planète.

- L'énergie solaire est non seulement économique mais elle est gratuite, propre et inépuisable.

LISTE DU MATERIEL ET PRIX

N°	Désignation	Unité	Qtité	P.U (DA)	Montant
1	- Tôle INOX Brillante Dim (0.5*2000*1000) mm	U	1	2350,00	2350,00
Cornières en acier:					
2	- cornière 35*35*0.35 mm Lourde barre de 6m	U	4	780,00	3120,00
3	- Fer T 35*0.30 mm barre de 6m	U	1	900,00	900,00
4	- Tube en acier galvanisé ø 40 mm (axe)	U	2	100,00	200,00
5	- Tube en acier galvanisé ø 35 mm (axe)	U	2	100,00	200,00
Accessoires de travail et de montage					
6	- Mèche pour acier ø 12 mm	U	1	250,00	250,00
7	- Mèche pour acier ø 8 mm	U	2	200,00	400,00
8	- Mèche pour acier ø 6 mm	U	1	90,00	90,00
9	- Baguette de soudure Rutile ø 3.25	U	10	7,00	70,00
10	- Disque pour acier	U	1	80,00	80,00
Peinture :					
11	- Papier verre	U	4	35,00	140,00
12	- Anti rouille (250g)	U	1	175,00	175,00
13	- Peinture argenté en soc (250g)	U	1	200,00	200,00
14	- Peinture argenté en soufflète	U	1	200,00	200,00
15	- Peinture noire non réfléchissante	U	1	200,00	200,00
16	- Pinceau	U	1	70,00	70,00
Boulons, rondelle et écrous :					
17	- Boulons, rondelle et écrou 13	U	20	10,00	200,00
18	- Boulons, rondelle et écrou 10	U	6	8,00	48,00
Plomberie :					
19	- Tube en cuivre ø 12	m	2,3	380,00	874,00
20	- Tube en cuivre ø 6	m	3	173,00	519,00
21	- Tuyau en plastique	m	4	40,00	160,00
22	- Robinet en plastique	U	1	90,00	90,00
23	- Téflon	U	1	25,00	25,00
24	- Collier ø 12 mm	U	4	20,00	80,00
Menuiserie :					
26	- contreplaqué (pour maintenir la forme du miroir)	U	2	300,00	600,00
26	- Main d'œuvre 2 personnes pour 3jrs	jrs	2	3000,00	6000,00
				TOTAL (DA)	17241,00

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Pétrole, gaz, charbon, uranium... épuisés avant 2100, nos ressources sont limitées, notamment celles en énergie et nous perturbons fortement notre environnement.

L'énergie solaire est l'énergie renouvelable par excellence, respectueuse de l'environnement, elle présente de nombreux avantages spécifiques en raison notamment de l'épuisement prévisible des ressources d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) et de la montée des problèmes liés à la dégradation de l'environnement.

L'Algérie est considérée comme le pays le plus vaste de l'Afrique, du monde arabe, en moyenne il y a 3600 heures d'ensoleillement au sud algérien, classant ainsi l'Algérie parmi les pays les plus ensoleillés au monde, et par conséquent l'endroit idéal pour la production de l'énergie solaire.

L'énergie solaire reçue sur terre étant peu dense, pour atteindre des températures exploitables pouvant aller jusqu'à 120 °C, il est nécessaire de concentrer les rayons solaires par des miroirs réfléchissants. Les concentrateurs optiques présentent un des moyens pour résoudre les problèmes posés par la faible densité énergétique du rayonnement solaire incident. Le choix de capteur cylindroparabolique nous permet de diminuer la surface de réception effective et donc de minimiser l'influence des pertes thermiques du récepteur, il correspond donc au meilleur compromis technico-économique pour produire de l'eau chaude domestique.

Le flux solaire reçu par le capteur est d'abord réfléchi par les miroirs du concentrateur, puis il traverse généralement un vitrage destiné à isoler thermiquement le foyer où il est absorbé par la surface de tube en cuivre peinte en noir pour augmenter son absorptivité.

L'absorbeur à son tour s'échauffe et perd de la chaleur vers l'extérieur sous forme essentiellement de rayonnement et de convection. Cette perte peut être caractérisée par un coefficient de pertes thermiques U_{glob} . L'eau refroidit l'absorbeur en emportant la chaleur utile ce qui se traduit par l'augmentation de sa température de sortie T_s . On récupère cette eau pour les différents usages.

La réflexion, l'angle d'incidence, l'orientation du concentrateur, la structure porteuse du miroir se traduisent par des pertes optiques, caractérisées globalement par une efficacité η_{opt} . Dans la concentration cylindroparabolique, seule la composante directe du rayonnement solaire peut être dirigée vers la ligne focale, la composante diffuse ne pouvant être concentrée.

Ce travail constitue une modeste contribution à l'étude de la production de l'eau chaude domestique par l'énergie solaire en utilisant un concentrateur cylindroparabolique,

L'étude que nous avons réalisée sur le prototype du concentrateur cylindroparabolique, nous a permis de connaître le fonctionnement de ce système, de prévoir la température atteinte au niveau de la surface du récepteur.

Nous avons montré que le rendement dépend de plusieurs paramètres, les plus importants sont :

- La puissance solaire directe incidente I (W/m^2) ;
- La surface du capteur A_{ref} (m^2) ;
- La surface de l'absorbeur A_a (m^2) ;
- La température de l'absorbeur T_{abs} ($^{\circ}C$) ;
- La température extérieure T_{ext} ($^{\circ}C$) ;
- La température de l'eau à l'entrée T_e ($^{\circ}C$) ;
- le débit m du fluide caloporteur \dot{m} (kg/s) ;
- Le coefficient de pertes thermiques U_{glob} ($W/(m^2 \cdot K)$) ;
- Le coefficient d'échange à l'intérieur de l'absorbeur ($W/(m^2 \cdot K)$).

Les problèmes rencontrés lors de la réalisation du prototype de concentrateur cylindroparabolique et durant l'expérience se résument comme suit :

- Tenir la courbure exacte du miroir sous la forme parabolique
- Le réglage et l'ajustement sur la meilleure position dans l'orientation Est-Ouest
- La courbure de l'absorbeur et son déplacement de la ligne focale dû à la dilatation et à son poids.
- Le problème de relevé des températures car les valeurs varient rapidement sous l'influence du vent.

Le calcul de l'énergie produite par le concentrateur donne une énergie moyenne de 1223 kWh par an. On réalise ainsi, grâce au concentrateur, une économie de 5110 DA par an, pour une production de l'eau chaude, comparée à son obtention par chauffage électrique. L'énergie solaire est non seulement économique, elle est gratuite, propre et inépuisable.

Les domaines d'application de ce système sont destinés pour le chauffage d'eau sanitaire des habitats, des hôpitaux, les bureaux des entreprises, des universités et des cités universitaires, des super marchés et des hôtels, etc...

Des travaux en perspective peuvent être menés pour améliorer et augmenter le rendement en agissant sur la réduction des pertes sous ces trois formes :

1. Thermiques :

- Isolation de l'absorbeur, soit en fermant la surface supérieure de concentrateur par le verre clair, ou envelopper le tube récepteur par le verre clair afin de réduire les échanges par convection avec l'extérieur surtout en période du froid et du vent.

- Ajouter une plaque en cuivre peinte en noir derrière le tube pour diminuer les pertes optiques concentrées par le miroir et augmenter la surface sur le foyer sans augmenter le diamètre du récepteur le tout enveloppé dans un tube en verre clair pour faire augmenter le rendement.

2. Optiques et géométriques:

- Orientation du concentrateur par un système automatique qui suit les positions du soleil et que les rayons solaires soient toujours perpendiculaires sur la surface d'ouverture.
- Construire une structure porteuse ne créant pas d'ombre sur le miroir réflecteur.

Enfin j'estime que l'expérience peut être considérée comme étant largement positive en ce qui concerne la compréhension du modèle et la connaissance de la méthode de construction des capteurs solaires cylindro-parabolique à moyennes températures.

ANNEXES

ANNEXE A

A.1 Tableau des résultats de calcul des flux théoriques:

TSV	$\omega=$	h=	sin(h)	Eclairc I*= w/m2	Eclairc G w/m2	m=	Er	Ray D w/m2	IDN w/m2
heure	deg	deG							
9,00	-45,00	49,29	0,76	876,17	770,07	1,32	0,09	179,59	720,84
9,17	-42,50	51,27	0,78	884,19	797,64	1,28	0,09	181,58	732,61
9,33	-40,00	53,25	0,80	891,49	824,09	1,25	0,10	183,45	743,46
9,50	-37,50	55,22	0,82	898,13	849,35	1,22	0,10	185,18	753,44
9,67	-35,00	57,17	0,84	904,15	873,33	1,19	0,10	186,78	762,59
9,83	-32,50	59,11	0,86	909,59	895,97	1,16	0,10	188,26	770,95
10,00	-30,00	61,02	0,87	914,49	917,20	1,14	0,10	189,62	778,55
10,17	-27,50	62,89	0,89	918,89	936,97	1,12	0,10	190,86	785,44
10,33	-25,00	64,74	0,90	922,81	955,21	1,10	0,10	191,98	791,63
10,50	-22,50	66,53	0,92	926,28	971,88	1,09	0,10	192,99	797,17
10,67	-20,00	68,26	0,93	929,32	986,92	1,08	0,10	193,89	802,06
10,83	-17,50	69,91	0,94	931,94	1000,30	1,06	0,10	194,68	806,33
11,00	-15,00	71,47	0,95	934,18	1011,97	1,05	0,10	195,36	809,99
11,17	-12,50	72,89	0,96	936,03	1021,90	1,05	0,10	195,94	813,07
11,33	-10,00	74,16	0,96	937,53	1030,07	1,04	0,10	196,40	815,57
11,50	-7,50	75,21	0,97	938,67	1036,45	1,03	0,10	196,77	817,51
11,67	-5,00	76,02	0,97	939,48	1041,01	1,03	0,10	197,03	818,89
11,83	-2,50	76,52	0,97	939,96	1043,76	1,03	0,10	197,18	819,71
12,00	0,00	76,70	0,97	940,12	1044,67	1,03	0,10	197,23	819,99
12,17	2,50	76,52	0,97	939,96	1043,76	1,03	0,10	197,18	819,71
12,33	5,00	76,02	0,97	939,48	1041,01	1,03	0,10	197,03	818,89
12,50	7,50	75,21	0,97	938,67	1036,45	1,03	0,10	196,77	817,51
12,67	10,00	74,16	0,96	937,53	1030,07	1,04	0,10	196,40	815,57
12,83	12,50	72,89	0,96	936,03	1021,90	1,05	0,10	195,94	813,07
13,00	15,00	71,47	0,95	934,18	1011,97	1,05	0,10	195,36	809,99
13,17	17,50	69,91	0,94	931,94	1000,30	1,06	0,10	194,68	806,33
13,33	20,00	68,26	0,93	929,32	986,92	1,08	0,10	193,89	802,06
13,50	22,50	66,53	0,92	926,28	971,88	1,09	0,10	192,99	797,17
13,67	25,00	64,74	0,90	922,81	955,21	1,10	0,10	191,98	791,63
13,83	27,50	62,89	0,89	918,89	936,97	1,12	0,10	190,86	785,44
14,00	30,00	61,02	0,87	914,49	917,20	1,14	0,10	189,62	778,55
14,17	32,50	59,11	0,86	909,59	895,97	1,16	0,10	188,26	770,95
14,33	35,00	57,17	0,84	904,15	873,33	1,19	0,10	186,78	762,59

Avec :

Latitude 35	
$\lambda=$	36,76
Déclinaison	
$\delta=$	23,44
Trouble atm	
TL=	5,1351408
Vapeur d'eau	
Pv=	14,246956

A.2 Tableau des résultats de calcul des puissances:

Heure	TSV	TabS	Te	Ts	Ts-Te	Text	Eclai	Q util	Q ref	Q abs	Qpert	Qprt opt
	heure	°C	°C	°C	°C	°C	w/m2	Watt	Watt	Watt	Watt	
9h:00	9,00	25	23	23	0	24	607	0,00	1056,18	542,42	542,42	295,26
9h:10	9,17	25	23	23	0	24	634	0,00	1103,16	586,01	586,01	297,21
9h:20	9,33	25	23	23	0	24	665	0,00	1157,10	635,34	635,34	299,86
9h:30	9,50	25	23	23	0	24	716	0,00	1245,84	706,54	706,54	309,94
9h:40	9,67	25	23	23	0	24	734	0,00	1277,16	747,50	747,50	304,40
9h:50	9,83	25	23	23	0	24	772	0,00	1343,28	810,66	810,66	306,10
10h:00	10,00	46	23	24	1	24	791	41,80	1376,34	855,63	813,83	299,26
10h:10	10,17	59	23	27	4	24	840	167,20	1461,60	935,03	767,83	302,62
10h:20	10,33	61	23	28	5	24	859	209,00	1494,66	982,83	773,83	294,15
10h:30	10,50	66	23	28	5	24	860	209,00	1496,40	1010,13	801,13	279,47
10h:40	10,67	70	23	28	5	25	879	209,00	1529,46	1058,42	849,42	270,71
10h:50	10,83	69	23	29	6	25	897	250,80	1560,78	1105,60	854,80	261,60
11h:00	11,00	66	23	28	5	25	915	209,00	1592,10	1152,52	943,52	252,63
11h:10	11,17	67	23	28	5	26	926	209,00	1611,24	1189,83	980,83	242,19
11h:20	11,33	68	23	29	6	26	941	250,80	1637,34	1231,05	980,25	233,50
11h:30	11,50	69	23	30	7	26	951	292,60	1654,74	1264,10	971,50	224,51
11h:40	11,67	70	23	30	7	26	966	292,60	1680,84	1301,80	1009,20	217,84
11h:50	11,83	72	23	31	8	26	974	334,40	1694,76	1327,65	993,25	210,98
12h:00	12,00	71	23	31	8	26	982	334,40	1708,68	1350,66	1016,26	205,76
12h:10	12,17	68	23	33	10	26	986	418,00	1715,64	1365,00	947,00	201,52
12h:20	12,33	69	23	38	15	26	992	627,00	1726,08	1378,71	751,71	199,64
12h:30	12,50	71	23	40	17	26	997	710,60	1734,78	1387,48	676,88	199,60
12h:40	12,67	70	23	42	19	27	1002	794,20	1743,48	1392,61	598,41	201,65
12h:50	12,83	69	23	43	20	27	999	836,00	1738,26	1383,00	547,00	204,17
13h:00	13,00	73	23	44	21	27	1003	877,80	1745,22	1379,55	501,75	210,16
13h:10	13,17	78	23	44	21	27	996	877,80	1733,04	1357,64	479,84	215,75
13h:20	13,33	70	23	43	20	27	995	836,00	1731,30	1340,88	504,88	224,38
13h:30	13,50	71	23	43	20	27	990	836,00	1722,60	1315,94	479,94	233,71
13h:40	13,67	70	23	42	19	28	986	794,20	1715,64	1289,92	495,72	244,67
13h:50	13,83	69	23	42	19	28	984	794,20	1712,16	1264,35	470,15	257,36
14h:00	14,00	68	23	40	17	28	967	710,60	1682,58	1218,01	507,41	266,99
14h:10	14,17	70	23	39	16	28	959	668,80	1668,66	1182,01	513,21	279,68
14h:20	14,33	66	23	39	16	28	947	668,80	1647,78	1140,30	471,50	291,66

A.3 Tableau des résultats de calcul des rendements:

Heure	TSV	Tab _s	T _s -T _e	Eclair	Q util	(T _s -T _e)/G	η th	Omb R	θ	Af	η opt
	heure	°C	°C	w/m ²	Watt	°C/watt		cm	deg		
9h:00	9,00	25	0	607	0,00	0,0000	0,0000	21,00	44,33	0,105	0,5136
9h:10	9,17	25	0	634	0,00	0,0000	0,0000	20,00	42,93	0,100	0,5312
9h:20	9,33	25	0	665	0,00	0,0000	0,0000	19,00	41,47	0,095	0,5491
9h:30	9,50	25	0	716	0,00	0,0000	0,0000	18,00	39,94	0,090	0,5671
9h:40	9,67	25	0	734	0,00	0,0000	0,0000	17,00	38,33	0,085	0,5853
9h:50	9,83	25	0	772	0,00	0,0000	0,0000	16,00	36,66	0,080	0,6035
10h:00	10,00	46	1	791	41,80	0,0013	0,0304	15,00	34,90	0,075	0,6217
10h:10	10,17	59	4	840	167,20	0,0048	0,1144	14,00	33,07	0,070	0,6397
10h:20	10,33	61	5	859	209,00	0,0058	0,1398	13,00	31,16	0,065	0,6576
10h:30	10,50	66	5	860	209,00	0,0058	0,1397	12,00	29,17	0,060	0,6750
10h:40	10,67	70	5	879	209,00	0,0057	0,1366	11,00	27,10	0,055	0,6920
10h:50	10,83	69	6	897	250,80	0,0067	0,1607	10,00	24,94	0,050	0,7084
11h:00	11,00	66	5	915	209,00	0,0055	0,1313	9,00	22,71	0,045	0,7239
11h:10	11,17	67	5	926	209,00	0,0054	0,1297	8,00	20,41	0,040	0,7385
11h:20	11,33	68	6	941	250,80	0,0064	0,1532	7,00	18,03	0,035	0,7519
11h:30	11,50	69	7	951	292,60	0,0074	0,1768	6,00	15,59	0,030	0,7639
11h:40	11,67	70	7	966	292,60	0,0072	0,1741	5,00	13,09	0,025	0,7745
11h:50	11,83	72	8	974	334,40	0,0082	0,1973	4,00	10,54	0,020	0,7834
12h:00	12,00	71	8	982	334,40	0,0081	0,1957	3,00	7,94	0,015	0,7905
12h:10	12,17	68	10	986	418,00	0,0101	0,2436	2,00	5,31	0,010	0,7956
12h:20	12,33	69	15	992	627,00	0,0151	0,3633	1,00	2,66	0,005	0,7988
12h:30	12,50	71	17	997	710,60	0,0171	0,4096	0,00	0,00	0,000	0,7998
12h:40	12,67	70	19	1002	794,20	0,0190	0,4555	1,00	2,66	0,005	0,7988
12h:50	12,83	69	20	999	836,00	0,0200	0,4809	2,00	5,31	0,010	0,7956
13h:00	13,00	73	21	1003	877,80	0,0209	0,5030	3,00	7,94	0,015	0,7905
13h:10	13,17	78	21	996	877,80	0,0211	0,5065	4,00	10,54	0,020	0,7834
13h:20	13,33	70	20	995	836,00	0,0201	0,4829	5,00	13,09	0,025	0,7745
13h:30	13,50	71	20	990	836,00	0,0202	0,4853	6,00	15,59	0,030	0,7639
13h:40	13,67	70	19	986	794,20	0,0193	0,4629	7,00	18,03	0,035	0,7519
13h:50	13,83	69	19	984	794,20	0,0193	0,4639	8,00	20,41	0,040	0,7385
14h:00	14,00	68	17	967	710,60	0,0176	0,4223	9,00	22,71	0,045	0,7239
14h:10	14,17	70	16	959	668,80	0,0167	0,4008	10,00	24,94	0,050	0,7084
14h:20	14,33	66	16	947	668,80	0,0169	0,4059	11,00	27,10	0,055	0,6920

ANNEXE B

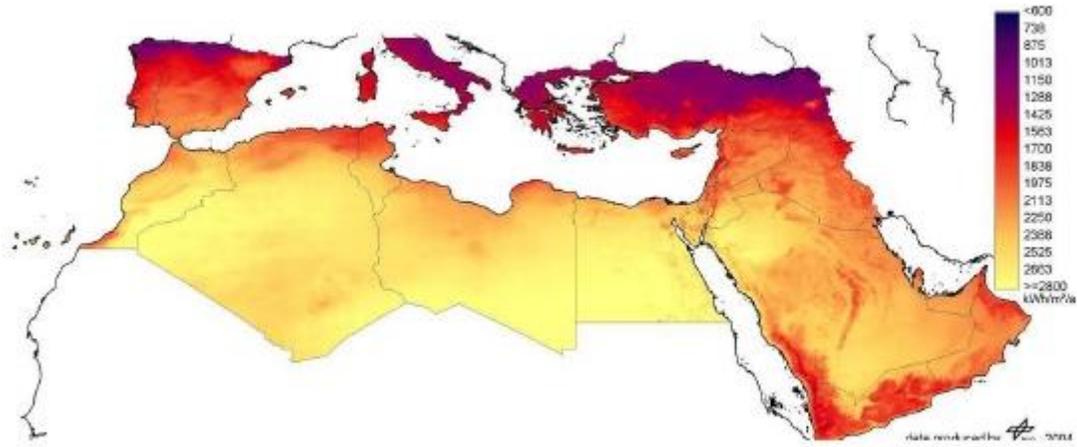


FIGURE B.1 : L'énergie solaire annuelle en kWh/(m².an)

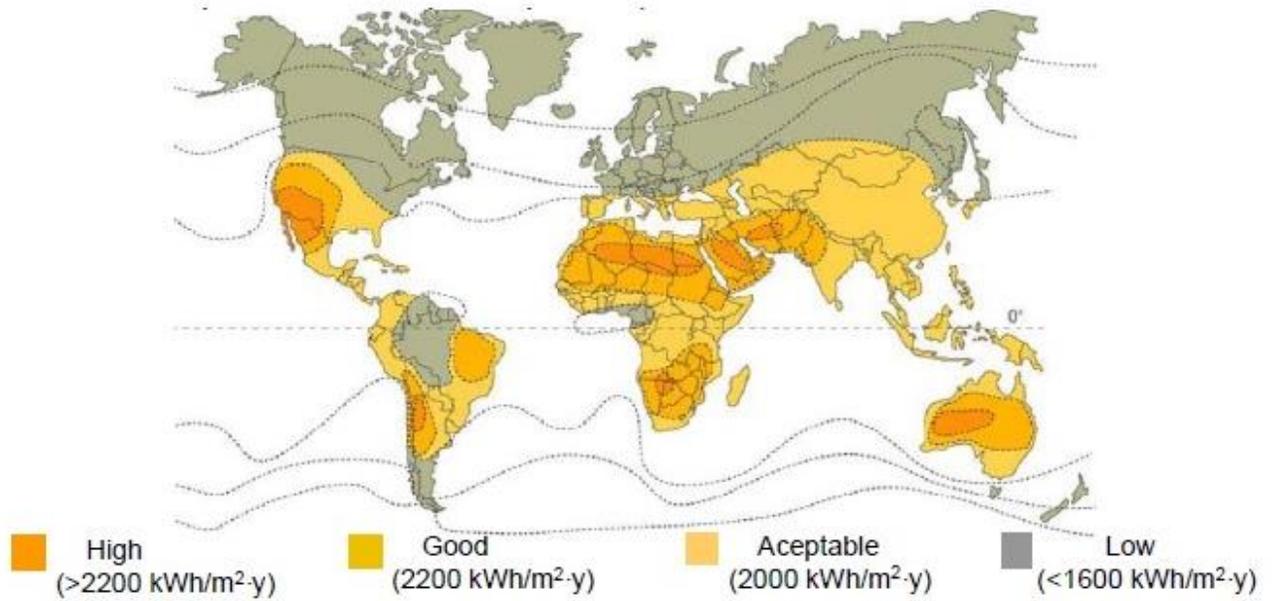


FIGURE B.2 : Le gisement solaire mondial

B.1 Les propriétés physiques de l'eau et de l'air :

Propriétés de l'eau à saturation							Propriétés de l'air à 1 atm						
θ	ρ	c_p	λ	$\frac{10^4}{\mu}$	$10^7 \cdot a$	Pr	θ	ρ	c_p	λ	$\frac{10^5}{\mu}$	$10^5 \cdot a$	Pr
$^{\circ}\text{C}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$		$^{\circ}\text{C}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	
0	1002	4218	0,552	17,90	1,31	13,06	0	1,292	1006	0,0242	1,72	1,86	0,72
20	1001	4182	0,597	10,10	1,43	7,02	20	1,204	1006	0,0257	1,81	2,12	0,71
40	995	4178	0,628	6,55	1,51	4,34	40	1,127	1007	0,0272	1,90	2,40	0,70
60	985	4184	0,651	4,71	1,55	3,02	60	1,059	1008	0,0287	1,99	2,69	0,70
80	974	4196	0,668	3,55	1,64	2,22	80	0,999	1010	0,0302	2,09	3,00	0,70
100	960	4216	0,680	2,82	1,68	1,74	100	0,946	1012	0,0318	2,18	3,32	0,69
120	945	4250	0,685	2,33	1,71	1,45	120	0,898	1014	0,0333	2,27	3,66	0,69
140	928	4283	0,684	1,99	1,72	1,24	140	0,854	1016	0,0345	2,34	3,98	0,69
160	910	4342	0,680	1,73	1,73	1,10	160	0,815	1019	0,0359	2,42	4,32	0,69
180	889	4417	0,675	1,54	1,72	1,00	180	0,779	1022	0,0372	2,50	4,67	0,69
200	867	4505	0,665	1,39	1,71	0,94	200	0,746	1025	0,0386	2,57	5,05	0,68
220	842	4610	0,652	1,26	1,68	0,89	220	0,700	1028	0,0399	2,64	5,43	0,68
240	816	4756	0,635	1,17	1,64	0,88	240	0,688	1032	0,0412	2,72	5,80	0,68
260	786	4949	0,611	1,08	1,58	0,87	260	0,662	1036	0,0425	2,79	6,20	0,68
280	753	5208	0,580	1,02	1,48	0,91	280	0,638	1040	0,0437	2,86	6,59	0,68
300	714	5728	0,540	0,96	1,32	1,02	300	0,616	1045	0,0450	2,93	6,99	0,68

B.2 Corrélations entre 0 et 100 °C

(θ : température en °C, T température en K)

Pour l'air

- $\rho = \frac{353}{(\theta + 273)}$ kg m⁻³
- $c_p = 1008$ J kg⁻¹ °C⁻¹
- $\lambda = 7,57 \cdot 10^{-5} \theta + 0,0242$ W m⁻¹ °C⁻¹
- $\mu = 10^{-5} (0,0046 \theta + 1,7176)$ Pa s
- $\alpha = 10^{-5} (0,0146 \theta + 1,8343)$ m² s⁻¹
- $Pr = -2,54 \cdot 10^{-4} \theta + 0,7147$
- $\beta \approx \frac{1}{T}$ K⁻¹

Pour l'eau

- $\rho = -0,00380 \theta^2 - 0,0505 \theta + 1002,6$ kg m⁻³
- $c_p = 4180$ J kg⁻¹ °C⁻¹
- $\lambda = -9,87 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 2,238 \cdot 10^{-3} \theta + 0,5536$ W m⁻¹ °C⁻¹
- $\mu = 10^{-4} \frac{17,9 - 0,07377 \theta + 0,0003354 \theta^2}{1 + 0,03032 \theta + 8,765 \cdot 10^{-5} \theta^2}$ Pa.s
- $a = 10^{-7} (-0,00360 \theta + 1,340)$ m² s⁻¹
- $Pr = \frac{13,06 + 1,387 \theta - 0,0037 \theta^2}{1 + 0,12407 \theta + 0,005297 \theta^2}$
- $\frac{g \beta \rho^2 c_p}{\mu \lambda} = (0,0105 \theta^2 + 0,477 \theta - 0,0363) 10^9$ °C⁻¹ m³
- $\log_{10} [p_{s,at}(T)] = 20,3182 - \frac{2795}{T} - 3,868 \log_{10}(T)$ mmHg -50°C < θ > 200°C

ANNEXE C

C.1 Nombre de Nusselt

La combinaison du coefficient d'échange de chaleur par convection, de la longueur caractéristique et de la conductivité thermique du fluide est appelée module ou nombre de Nusselt.

C'est le rapport du gradient de température dans le fluide en contact immédiat avec la surface au gradient de température de référence. Il caractérise l'intensité de l'échange de chaleur sur la limite fluide-surface.

$$Nu = \frac{h L}{\lambda_f}$$

h : Coefficient de convection thermique [W/m² °C]

L : Longueur caractéristique [m].

λ_f : Coefficient de conductivité thermique du fluide [W/ m °C].

C.2 Nombre de Prandtl

Ce nombre représente le rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique; il caractérise les propriétés physiques du fluide.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda_f} = \frac{\nu}{\alpha}$$

C_p : La chaleur spécifique à pression constante. [J/(kg.°C)]

λ_f : La conductivité thermique du fluide. [W/(m .°C)]

α : La diffusivité thermique. [m²/s]

ν : Viscosité cinématique. [m²/s]

Plus la viscosité est grande plus l'énergie dépensée nécessaire pour véhiculer le fluide est élevée et plus la diffusivité est grande plus le fluide extrait facilement la chaleur de la paroi.

C.3 Nombre de Reynolds :

Ce nombre est une mesure de la grandeur relative des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité dans l'écoulement.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu}$$

V : est la vitesse caractéristique du fluide [m/s]

L : La dimension linéaire caractéristique du corps [m]

μ : La viscosité dynamique [kg/ (m.s)]

ν : La viscosité cinématique [m²/s]

ρ : La masse volumique du fluide [kg/m³]

ANNEXE D

D.1 Quelques photographies requises de la manipulation



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **J.F. Sacadura**, Initiation aux transferts thermiques, Technique et Documentation. Paris 1982.
- [2] **M. Daguonet**, Les séchoirs solaires, théorie et pratique Unesco, Paris 1985.
- [3] **R. Giblin**, Transmission de la chaleur par convection naturelle, Saint-germain Paris 1974.
- [4] **R. Marchal**, Transmission de la chaleur par convection dans les tubes, Saint-germain Paris 1974.
- [5] **A. Gouffe**, Transmission de la chaleur par rayonnement, Saint-germain Paris 1978.
- [6] **Y. Jannot**, Thermique solaire, cours libre 2003.
- [7] **J.A. Duffie, and J.W.Beckman**, Solar Engineering of Thermal Processes, 2ed, Inc, 1991.
- [8] **M. Iqbal**, An Introduction to solar Radiation, Academic Press, Toronto (1983).
- [9] **M.Geyer, and , W.B.Stine**, Power From the Sun (Powerfromthesun.net). J.T. Lyle Center,2001.
- [10] **R.Donald**, Solar Energy. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1981.
- [11] **Y.Jannot**, Cours de Transferts thermiques, Thermique solaire, Octobre 2003.
- [12] **C.P.de Brichaumbot et C.Vauge**, Le gisement solaire, Ed. Tech. & Doc., Paris, 1982.
- [13] **J. Bernard**, Energie solaire Calculs et optimisation. Edition ellipses, 2004.
- [14] <http://www.promes.cnrs.fr/MOYENS/Station/pyranometre.htm>
- [15] <http://www.promes.cnrs.fr/MOYENS/Station/pyrheliometre.htm>
- [16] **A. Mefti, M.Y. Bouroubi et A. Khellaf**, Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie, Rev. Energ. Ren. Vol. 2 (1999) 69-85.
- [17] **M. Capderou**, Atlas Solaire de l'Algérie, Tome1, Vol 1 et 2 : Modèles théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [18] **R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz**, Le rayonnement solaire conversion thermique et Applications. Edition Tec-Doc, 1980.
- [19] Concentration du rayonnement solaire, Cahiers de l'AFEDES, n°3 novembre 1973, S.A Editions Européennes de Thermique et industrie, Paris.
- [20] **R. Peyturaux**, L'énergie solaire, 3ème édition 1978, P.U.F, Paris.
- [21] **R. Winston**, Solar Energy, 16, 89, 1974.
- [22] **J.J. O'Gallagher**, Nonimaging Optics in Solar Energy, A Publication in the Morgan and Claypool Publishers series, 2008.
- [23] **Retscreen**, Analyse de projets de chauffage solaire de l'eau, Resources Canada (2004)
- [24] **Y.Shuai, X.L.Xia, H.P.Tan**, Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems, Solar Energy 82 (2008) 13–21.
- [25] **M.Audibert** , la concentration du rayonnement solaire. *International centre for theoretical physics ' 3 séminaire sur l'énergie solaire , 6-17 Septembre 1982.*

- [26] **Jacques Pereebois**, Energie solaires, perspectives économiques, *Edition du centre National de la recherche scientifique*, 1975.
- [27] **Paul De Neyer**, Energie solaire thermique, Guide des Energies Renouvelables, mai 2003.
- [28] **Alain Ferriere et Gilles Flamant**, Captation, Transformation et conversion de l'énergie Solaire par la technologies à concentration. Thème7, Solaire thermique 2002.
- [29] **U.H.Kurzweg, J.P.Benson**, 'Iso-Intensity absorber Configurations For parabolic Concentrators', *Solar energy*. Vol.29, No.2, pp167-174, 1982.
- [30] **Dan dye, Byard Wood**, 'Non-imaging devices for uniform irradiation on Planar Surface For parabolic Concentrators', Semi-Annual Technical Progress Report August 2002-April 2003. Nevada. Report 41164R03.
- [31] **M.Srinivasan, L.V.Kulkarni**, A simple technique of fabrication of parabolic concentrators. *Solar energy, volume 22, pp 463-465*. Novembre 1978.
- [32] **B.Stine, Michael Geyer**, Power from the sun, Lyle centre for regenerative studie 2001.
- [33] **Vudichai Neeranartvong**, Etude d'un concentrateur solaire a simple réflexion. Thèse de Docteur-Ingenieur, Institut national polytechnique de Toulouse. juillet 1983.
- [34] **Ari.Rabl**, Comparison of Solar Concentrators, *Solar Energy*. Vol18, pp93-111. Pergamon press 1967.
- [35] **H.Naito, Y.Kohsaka, D.Cooke**, The development of solar receiver for high efficient thermionic/thermoelectric conversion system. *Encyclopedia of physical science et technology*. 1995
- [36] **D.Kedwards, L.Marlot**, Capteurs Solaires, *Edition S C M, Paris* 1979.
- [37] Concentrating Solar Thermal Power, Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy,
- [38] **Soteris A. Kalogirou**, Solar Energy Engineering Processes and Systems, Edition 2009 Elsevier
- [39] **N.M. Bahadori**, Design of solar autoclave. *Solar Energy*, Vol.18, pp. 489- 496. Pergamon press 1976.
- [40] **B. Hafner, C. Faber**, Methods for design and thermal characterisation of solar cookers, Solar cookers test procedure ECSCR, Version 2, 1993.
- [41] **S. Bonned et A. Alaphillipe**, Conversion thermodynamique de l'énergie solaire dans des Installations de faible et moyenne puissance. *Energ. Ren : 11ème journées internationales de thermique*. pp. 73-80. 2003.
- [42] **M. B. Habeebullah**, A. M. Khalifa, and I. Olw, The oven receiver an approach toward the revival of concentrating solar cookers, *Solar Energy*, Vol. 54, No. 4, pp. 227-237, 1995.
- [43] **F.Kreith**, Principals of heat transfer, (3eme edition).
- [44] **D. Kedwards, L. Marlot**, Capteurs Solaires, Edition SCM, Paris 1979.
- [45] **S. Bonned et A. Alaphillipe**, Conversion thermodynamique de l'énergie solaire dans des

Installations de faible et moyenne puissance. Energ. Ren : 11ème journées internationales de thermique. pp. 73-80. 2003.

[46] **A. Rabl**, Optical and thermal Properties of compound Parabolic concentrators, Solar Energy. Vol 18, pp 497-511. Pergamon press 1976.

[47] **D. Faiman**, Solar thermal Collectors. Introduction to solar energy. Lecture 5 version 3 .1.2003.

[48] **O. C. Jorgensen**, Collector heat capacity effect on solar system performance, Solar Energy. Vol29. No.2. pp 175-176, Printed in Great Britain. 1982.

[49] **J.E. Braun et J.C. Mitchell**, Solar geometry for fixed and tracking surface. Solar Energy. vol. 31, no5, pp. 439-444, 1983.

[50]**S.J. Harrison**, Q. Lin and L.C.S. Mesquita, Integral stagnation temperature control for Solar. SESCI 2004 Conference University of Waterloo Waterloo, Ontario, Canada August 21st–25th, 2004.

Résumé

Le présent mémoire propose une étude et réalisation pratique d'un concentrateur cylindroparabolique pour la conversion d'énergie solaire en énergie thermique dans le récepteur placé sur la ligne focale du concentrateur exposé aux flux solaire.

L'expérience a été effectuée sur un prototype de concentrateur cylindroparabolique d'une ouverture de $(0,87 \times 2) \text{ m}^2$, réalisé au niveau de la faculté des hydrocarbures et de la chimie (F.H.C) de l'université M'hamed Bougara Boumerdès. Après une étude théorique du thème nous avons établi un dimensionnement de la courbure du miroir, de sa largeur d'ouverture et de la longueur, pour un tube en cuivre de diamètre 12 mm placé sur la ligne focale du miroir concentrateur pour collecter l'énergie solaire réfléchi. Ensuite nous avons procédé à la réalisation et au montage des différents éléments du concentrateur : la structure porteuse, les pieds, le miroir et le tube absorbeur.

Nous avons établi le bilan thermique pour obtenir des paramètres externes et internes sur l'évolution de la température de l'eau à la sortie et de rendement du concentrateur cylindroparabolique.

Les équations obtenues sont résolues à l'aide de logiciel EES. Nous avons réalisé des calculs sur Excel ensuite tracé les graphes par Origine 6.0. Des calculs théoriques ont été faits et les résultats trouvés sont présentés, analysés et commentés.

Le domaine de température considéré est celui donnant une différence entre l'entrée et la sortie de 20°C , avec un débit optimal d'eau chaude répondant au besoin d'une habitation de cinq personnes, qui correspond à 180 l/jour.

Cette installation peut être préconisée pour utilisation dans les habitations, les hôpitaux, les hôtels, etc... .

Mots clés : Energie solaire, réflecteur, concentrateur solaire, capteur solaire, solaire thermique, cylindroparabolique, rayonnement solaire, absorbeur/récepteur.

Abstract

In this work, a cylindroparabolic concentrator used for solar thermal energy conversion is studied and realized practically; the receiver is placed on the concentrator focal line exposed to solar flux.

The experiment is applied on a cylindroparabolic concentrator prototype, with an opening of $(0,87 \times 2) \text{ m}^2$, realized in the faculty of hydrocarbons and chemistry (FHC). Of m'hamed Bougara boumerdes university

After a theoretical study of the subject, we established the mirror curve dimensioning; its opening width and length. For a copper tube with 12mm diameter, placed on the focal line of concentrator mirror to collect the reflected solar energy. Then we proceed to do the realization and mounting of different concentrator components: handling structure, mirror and absorbing tube.

We have established thermal balance in order to obtain external and internal parameters of output water temperature evolution and the efficiency of cylindricoparabolic concentrator.

The obtained equations are solved using EES software computation on Excel were realized then curves are drawn by Origine.6.0. Theoretical computations were done and obtained results were presented, analyzed and commented.

The considered temperature range is the one gives 20°C between the input and the output, with an optimal flux satisfies the need of five persons in a house; which corresponds to 180 liters per a day. This installation may be used for residential, hospital or hotels use, etc.....

Key words: solar energy, reflector, solar concentrator, solar sensor, thermal solar, cylidroparabolic, solar rays, absorber/receiver.

ملخص

هذه الرسالة تعرض دراسة وإنجاز عملي لمركز شمسي أسطواناني قطع مكافئ لتحويل الطاقة الشمسية الى طاقة حرارية في الأنبوب الماص الذي يقع على طول المنطقة البؤرية للمركز الموجه للإشعاع الشمسي.

التجارب تمت على نموذج من مركز شمسي أسطواناني قطع مكافئ ذو مساحة إستقبال $(2 * 0.87) \text{ م}^2$ منجز في جامعة محمد بوقرة – بومرداس. بعد دراسة نظرية للموضوع قمنا بتحديد أبعاد انحناء العاكس، عرض الانفتاح، والطول لأنبوب من النحاس قطره 10 ملم، موضوع على الطول البؤري للمرآة المركزية لجمع الطاقة الشمسية المنعكسة. بعدها قمنا بإنجاز وتركيب مختلف مركبات المركز، الهيكل الحامل، أرجل الإسناد المرآة، والأنبوب الماص.

قمنا بإنجاز حوصلة حرارية للحصول على العوامل الداخلية والخارجية المؤثرة في تغير درجة حرارة الماء في المخرج ومردودية المركز الشمسي. المعادلات المتحصل عليها تم حللناها باستخدام برنامج EES، وقمنا بالحساب باستخدام برنامج EXCEL، ورسمنا المنحنيات ببرنامج ORIGINE 6.0، ولتأكيد النتائج النظرية قارناها بالنتائج العملية. إهتمامنا كان حول فرق درجة حرارة المدخل والمخرج للماء الذي هو في حدود 20°C مع معدل تدفق الماء 0.01 ل/ثا (36 ل/سا).

الطاقة الشمسية المستعملة في الأنبوب الماص تقوم بتسخين الماء للإستعمال في المنازل، المساحات التجارية، المستشفيات، المكاتب، الجامعات، والفنادق.

الكلمات المفاتيح: الطاقة الشمسية، العاكس، المركز الشمسي، اللاقط الشمسي، الطاقة الشمسية الحرارية.