

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES EXACTES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° de série :

N° d'ordre :

MEMOIRE
PRESENTE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE MAGISTER EN
PHSIQUE

SPECIALITE
ENERGIES RENOUVELABLES

THEME

CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN
CONCENTRATEUR SPHÉRIQUE

PAR :
MAHDI KHALED

Soutenu le : 08/03/2008

Devant le jury :

Président :	A. CHAKER	Pr	Université Mentouri	Constantine
Rapporteur :	N. BELLEL	M.C	Université Mentouri	Constantine
Examineur :	MS. AÏDA	Pr	Université Mentouri	Constantine
Examineur :	M. DJEZZAR	M.C	Université Mentouri	Constantine

Remerciement

Avant tout développement sur cette expérience, il apparaît opportun de commencer ce mémoire de magistère par des remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de cette formation, et même à ceux qui ont eu la gentillesse de faire de cette formation un moment très profitable.

Le présent travail a été réalisé dans le cadre de l'école doctorale des énergies renouvelables d'un mémoire de magister au sein de la faculté des sciences exactes, Département de physique de l'Université Mentouri de Constantine et avec le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER).

Je remercie toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail que je cite en particulier :

Mon encadreur monsieur N. BELLEL, Maître de conférence au département de physique université Mentouri de Constantine, mon maître de mémoire qui m'a accompagné tout au long de ce mémoire de magistère avec beaucoup de patience et de pédagogie.

Je remercie Madame A. CHAKER, Professeur au département de physique et directrice au niveau de laboratoire de recherche de physique énergétique et énergies renouvelables.

Je remercie Mr M.S AÏDA Professeur au département de physique université Mentouri de Constantine, en acceptant de faire parti de ce jury.

Mr M.DJEZZAR Maître de conférence au département de physique université Mentouri de Constantine et je le remercie d'avoir bien voulu accepter de juger ce travail.

J'adresse mes meilleurs remerciements à Mr M. BELHAMEL Directeur du Centre de développement des Energies Renouvelables d'avoir accepté de réaliser ce travail au niveau de CDER.

Comme je remercie aussi Mr N. SAID, chargé d'étude au centre de développement des énergies renouvelables et mon maître de stage qui m'a accompagné tout au long de cette expérience professionnelle avec beaucoup de patience et de pédagogie.

Ainsi Mr M.O IBERRAKEN Responsable à l'Office National de la Météorologie pour son encouragement.

*À ma Mère,
À mon Père,
À mes soeurs et frères.*

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre.I GISEMENT SOLAIRE	
I.1 Introduction	3
I.2 Le rayonnement solaire	3
I.2.1 Généralités sur le Soleil	3
I.2.2 Constante Solaire	5
I.2.3 Translation et rotation de la terre	6
I.2.4 Le spectre solaire	7
I.2.5 Rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère	8
I.3 La position du soleil	9
I.3.1 Les coordonnées géographiques terrestres	10
I.3.2 Déclinaison δ	11
I.3.3 l'équation du temps ET	11
I.3.4 Le temps solaire vrai et l'angle horaire du soleil	12
I.3.5 Durée du jour	14
I.3.6 Hauteur angulaire du soleil h	14
I.3.7 Azimut du soleil a	15
I.3.8 Décalage horaires	16
I.3.9 Fuseau horaire	16
I.4 Eclairage d'un récepteur plan	17
I.4.1 Eclairage global	18
I.4.2 Rayonnement diffus	18
I.4.3 Instrument de mesure d'Eclairage solaire	19
I.4.3.1 Mesures effectuées par un Pyranomètre	19
I.4.3.2 Pyréliomètre et rayonnement Direct	21
I.4.4 L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire	23
I.4.5 Energie reçue par une surface horizontale située à L'extérieur de l'atmosphère	23
I.5 Estimation l'éclairage solaire	24
I.5.1 Définition	24
I.5.2 La variation de l'éclairage solaire direct normal selon les conditions climatiques	24
I.5.3 Masse d'air	25
I.5.4 Trouble atmosphérique	25
I.6 Estimation solaire instantané	26
I.6.1 Calcul le rayonnement solaire Direct normal	26
I.6.2 Calcul le rayonnement solaire diffus	28

I.6.3 Calcul le rayonnement solaire global	28
I.7 Conclusion	31
Chapitre.II CONCENTRATEURS SOLAIRES	
II.1 Introduction	32
II.2 Principes	33
II.2.1 lois de Descartes relative à la réflexion	33
II.2.2 Stigmatisme	33
II.2.3 Définition de la concentration	33
II.2.3.1 Concentration idéale (Gauss)	34
II.2.3.2 Concentration géométrique	34
II.2.3.3 Concentration optique (Energétique)	34
II.3 Description le principe d'un concentrateur	34
II.4 Formules de calcul des différentes concentrations	36
II.5 L'importance de la concentration solaire	37
II.6 Etudes générales de quelques différents concentrateurs	39
II.6.1 Paraboloïde	39
II.6.1.1 Propriétés	39
II.6.1.2 Concentration idéale	39
II.6.1.3 Concentration géométrique	40
II.6.1.4 Concentration optique	42
II.6.2 Cylindro-Parabolique	42
II.6.2.1 Propriétés	42
II.6.2.2 Concentration idéale	42
II.6.2.3 Concentration géométrique	43
II.6.2.4 Concentration optique	44
II.6.2.5 Montage	44
II.6.3 Centrales à tour	45
II.6.3.1 Description de système	45
II.6.3.2 Le rendement thermique	45
II.7 Conclusion	48
Chapitre.III DEVELOPPEMNET DE CONCENTRATEUR SPHERIQUE	
III.1 Introduction	49
III.2 Définitions	49
III.2.1 La Surface Sphérique	49
III.2.2 Concentration sphérique idéale	49
III.2.3 Concentration géométrique	50
III.2.4 Aberration de sphéricité pour un point d'un axe	51

III.3 Les aberrations d'ouverture	52
III.3.1 Aberration longitudinale principale δ_l	53
III.3.2 Aberration transversale principale δ_t	54
III.4 Etude et application sur l'optique de concentrateur	54
III.4.1 L'équation paramétrique de la caustique	54
III.4.2 Calcul le rayon de moindre diffusion	55
III.4.3 Comparaison entre concentrateur sphérique et Parabolique	58
III. 5 Conclusion	60
 Chapitre.IV BILAN ENEGETIQUE	
IV.1 Introduction	61
IV.2 Absorbeur/Récepteur	61
IV.3 Surface sélective	63
IV.4 L'équation d'équilibre thermique	63
IV.5 Pertes thermiques	64
IV.5.1 Pertes thermiques par conduction	64
IV.5.2 Pertes thermiques par convection	64
IV.5.3 Pertes thermiques par rayonnement	65
IV.6 Expression de température de l'absorbeur	66
IV.7 Efficacité du concentrateur	67
IV.8 Distribution de la température au niveau de l'absorbeur	68
IV.9 Résolution du système d'équation	69
IV.9.1 Schéma implicite	69
IV.10 Température de stagnation	71
IV.11 La différence de température au niveau de l'absorbeur d'un fluide en Circulation	71
IV.12 Conclusion	73
 Chapitre.V REALISATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS	
V.1 Introduction	74
V.2 Description générale du montage réalisé	74
V.3 Conception du concentrateur	75
V.2.1 Le réflecteur	80
V.2.2 L'absorbeur	80
V.2.3 L'expérience	81
V.2.4 Problèmes rencontrés durant l'expérience	82
V.3 Interprétation des Résultats	83
V.3.1 Comparaison entre l'éclairement théorique et mesuré	83
V.3.2 L'influence de diamètre du réflecteur	84

V.3.3 Evolution des puissances journalière	84
V.3.4 Evolution théorique de la température de l'absorbeur	86
V.3.5 Évolution des flux thermiques	87
V.3.6 Évolution des pertes thermiques	88
V.3.7 L'influence du vent sur les pertes thermiques	89
V.3.8 Efficacité thermique du concentrateur.....	90
V.3.9 Comparaison de la distribution de la température Théorique et expérimentale	91
V.3.10 L'influence de la sélectivité	92
V.3.11 Comparaison entre température mesurée et estimée	95
V.4 Conclusion	98
CONCLUSION GENERALE.....	100
REFERENCES	102
ANNEXES	104
RESUMÉES	

Nomenclature

Lettres latines

A_{ref}	Surface du réflecteur sphérique	[m ²]
A_{abs}	Surface d'absorbeur	
TSV	temps solaire vrai	
TSM	temps solaire moyen	[heure]
TU	temps universel	[heure]
ET	Equation du temps	[minute]
h	Hauteur angulaire solaire	[degré]
a	Azimut	[degré]
E_{λ}	Emittance monochromatique	[W/m ² /μm ⁻¹]
E	Emittance	[W/m ²]
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]
T_L	Facteur de Linke	
P_{atm}	Pression atmosphérique de l'altitude z	[Pa]
\overline{HR}	Humidité relative	[%]
P_{vs}	Pression de la vapeur saturante	[Pa]
P_v	Pression partielle de vapeur d'eau	[Pa]
m	Masse d'aire optique relative	
E_R	Epaisseur optique de Rayleigh	
T_{abs}	Température d'absorbeur	[°C]
T_{amb}	Température ambiante	[°C]
T_{ciel}	Température du ciel	[°C]
\dot{Q}_{ref}	Puissance solaire reçu par le miroir	[W/m ²]
\dot{Q}_{abs}	Puissance solaire reçu par l'absorbeur	[W/m ²]
\dot{Q}_{pert}	Puissance des pertes thermique de l'absorbeur	[W/m ²]
\dot{Q}_{util}	Puissance utile de l'absorbeur	[W/m ²]
h_{cond}	Coefficient d'échange de chaleur par conduction	[W/mK]
h_{con}	Coefficient d'échange de chaleur par convection	[W/mK]
h_{ray}	Coefficient d'échange de chaleur par rayonnement	[W/mK]

U_{glob}	Coefficient d'échange global	[W/mK]
C_f	Chaleur massique de l'eau	[J/KgK]
C_{abs}	Chaleur massique de l'absorbeur	
C_g	Concentration géométrique	
C_o	Concentration optique (énergétique)	
C_G	Concentration idéale (Gauss)	
Δt	Pas du temps	[s]
Δz	Pas spatial	[m]
\dot{m}	Débit massique	[Kg/s]
C_P	Capacité calorifique à pression constante	[J/KgK]
Re	Nombre de Reynolds	
Pr	Nombre de Prandtl	
Nu	Nombre de Nusselt	
d_{terre}	Diamètre de la terre	[m]
d_{soleil}	Diamètre de soleil	[m]
T_E	Température d'entrée	[°C]
T_S	Température de sortie	[°C]

Lettres grecques

ϕ	Latitudes	[degré]
λ	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 du récepteur	
ρ_{ref}	Facteur de réflexion du miroir sphérique	
ε_{abs}	Facteur d'émissivité d'absorbeur	
τ_{abs}	Facteur de transmission d'absorbeur	
ε	Diamètre apparent du soleil (32')	[rad]
Θ	Angle d'ouverture du miroir	[degré]

η	Rendement thermique	[%]
η_{ch}	Rendement de la chaudière	[%]
η_c	Rendement de Carnot	[%]
η_{opt}	Rendement optique	[%]
Γ	Rapport de la captation	
ρ_f	Masse volumique de l'eau	[Kg/m ³]
λ_f	Conductivité thermique de l'eau	[W/m ² K]
α_f	Diffusivité thermique de l'eau	[m ² /s]
σ	Constante de Stefan Boltzmann = 5,67 .10 ⁻⁸	[W/m ² K ⁴]
ν_{air}	Viscosité cinématique de l'air	[m ² /s]
β	Coefficient de trouble atmosphérique	

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)

Introduction générale

La crise pétrolière de 1973 a, par l'augmentation brutale du prix du pétrole, conduit l'homme à s'intéresser à d'autres sources d'énergie renouvelable, au premier rang desquelles figure l'énergie solaire.

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 inépuisable pour l'homme. Elles sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi 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.

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. Quatre catégories d'applications se dégagent en fonction de la température [1] :

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

Les miroirs sphériques présentent un certain nombre d'avantages dans la réalisation de concentrateurs du rayonnement solaire, et notamment dans un large domaine de la conversion photothermique. Pour améliorer la conception de tels capteurs, et optimiser leur adaptation au

type de conversion projeté, on a étudié l'influence des différents paramètres intervenant dans cette réalisation : dimensions du réflecteur, positionnement sur le support, effets des erreurs de position et du dépointage. Un programme de calcul a été mis au point et les résultats des simulations réalisées à l'aide de cet outil sont présentés et commentés, notamment pour le paramètre température (moyenne et haute) après conversion du rayonnement solaire en chaleur.

Grâce à divers procédés, l'énergie solaire peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou la chaleur obtenue à partir de cette dernière.

Notre travail porte essentiellement sur une étude expérimentale de la production de l'énergie thermique due à la concentration solaire. Cette étude comporte les chapitres suivants :

- **Le premier chapitre** est consacré à l'étude préliminaire du gisement solaire.
- **Le deuxième chapitre** porte sur une étude bibliographique de la concentration solaire, ainsi que les différents types de concentrateurs solaires.
- **Le troisième chapitre** porte sur une étude particulière du concentrateur sphérique, notamment ses caractéristiques optiques et énergétiques.
- **Le quatrième chapitre** consiste à étudier le bilan énergétique au niveau du récepteur/absorbeur ainsi que la résolution numérique du système d'équations.
- **Le cinquième chapitre** est consacré à la réalisation concrète du concentrateur sphérique et l'interprétation des résultats obtenus.

La partie annexe comprend notamment, les propriétés thermophysiques de l'eau et de l'air, la méthode de résolution numérique du système par la méthode de différence finis avec la méthode de thomas.

On finira notre étude par une conclusion qui se rapporte à l'étude et aux applications purement thermiques de l'énergie solaire, telles que la production d'électricité, la production de force mécanique, la production de froid, ... etc.

I.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.

I.2 Le rayonnement solaire

I.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 [2]. 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 [2].

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 I.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 densité 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 densité d'environ 10⁻⁵ kg/m³ [2].

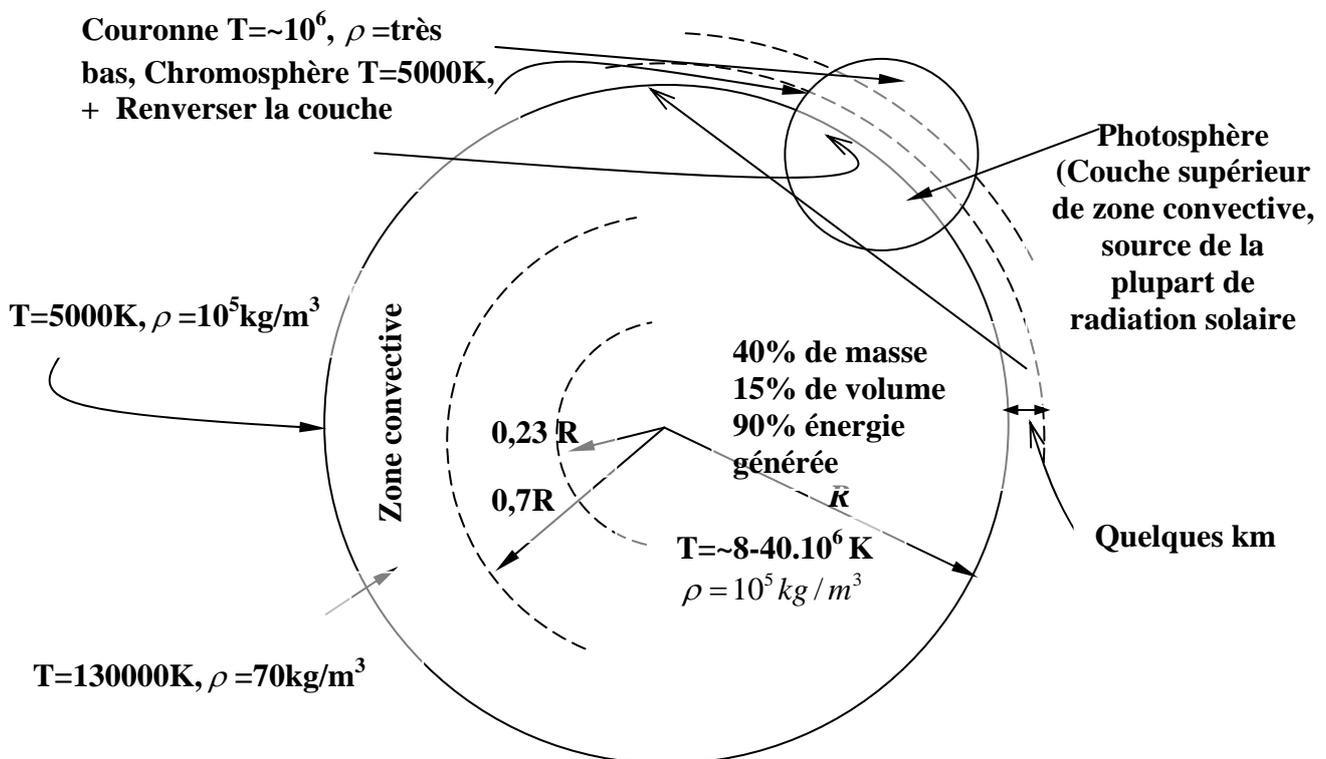


Fig. I.1 La structure du soleil [2]

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 :



I.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 (149 597 870.10³m 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% [2]. 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) [3]. La représentation schématique du système Soleil-Terre est indiquée dans la figure **I.2** [4].

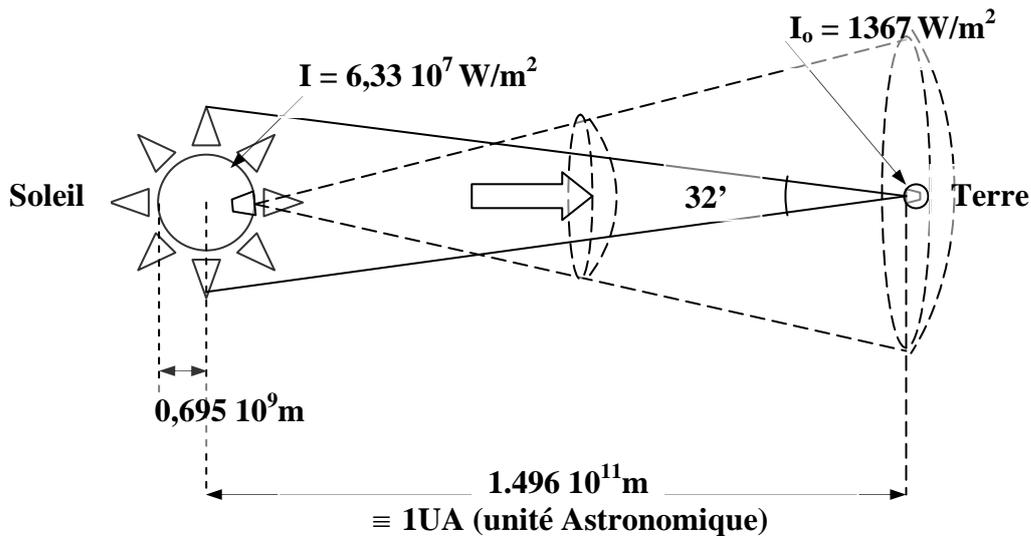


Fig.1.2 La divergence de l'énergie du soleil vers la terre [4]

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 $\pm 1,7 \%$ [2].

I.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) [5].

- **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 [5].

- **Révolution de la terre**

La terre effectue un 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) [5]. Les mouvements de la

terre autour de son axe et autour du soleil sont illustrés dans la figure I.3, alors que le tableau (I.1) montre la durée des saisons conséquentes à ce mouvement :

Tableau. I.1 Durée des saisons [4]

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

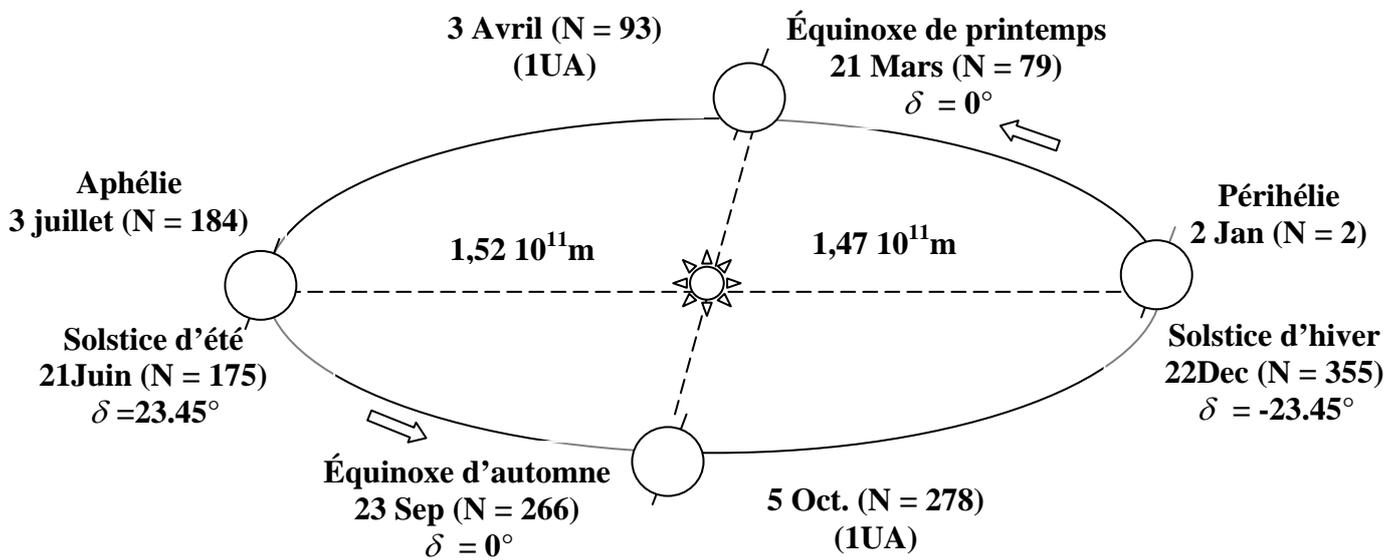


Fig. I.3 Schématisation du mouvement de la terre autour du Soleil [4]

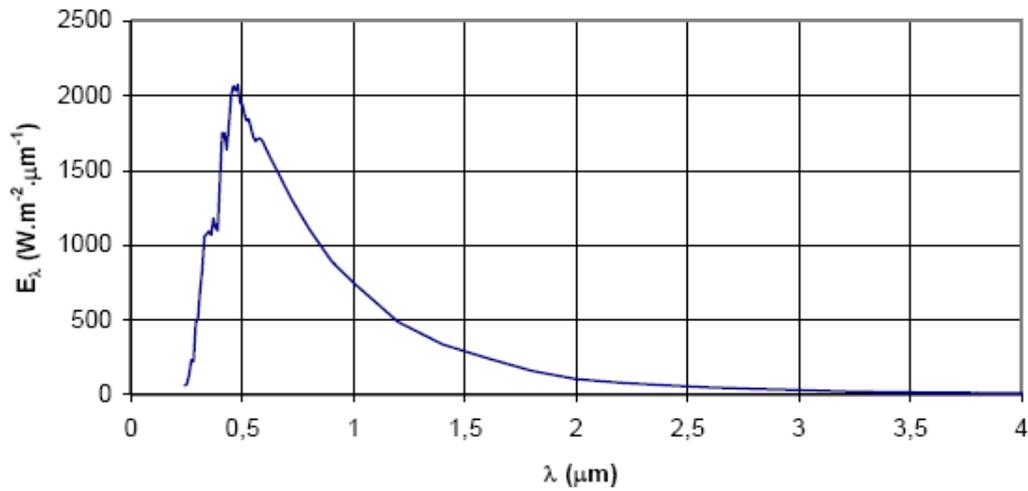
I.2.4 Le spectre solaire

On appelle 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 [6] :

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \tag{I-1}$$

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

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda \quad (\text{I} - 2)$$



FigI.4 Spectre du soleil à la limite de l'atmosphère terrestre [6]

On observe dans la figure I.4 que 98% du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'ondes inférieures à $4 \mu\text{m}$. En première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5777 K [5].

I.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/m^2 [3] dans un plan perpendiculaire au rayonnement, qui varie de $\pm 3,4\%$ [5] environ au cours de l'année.

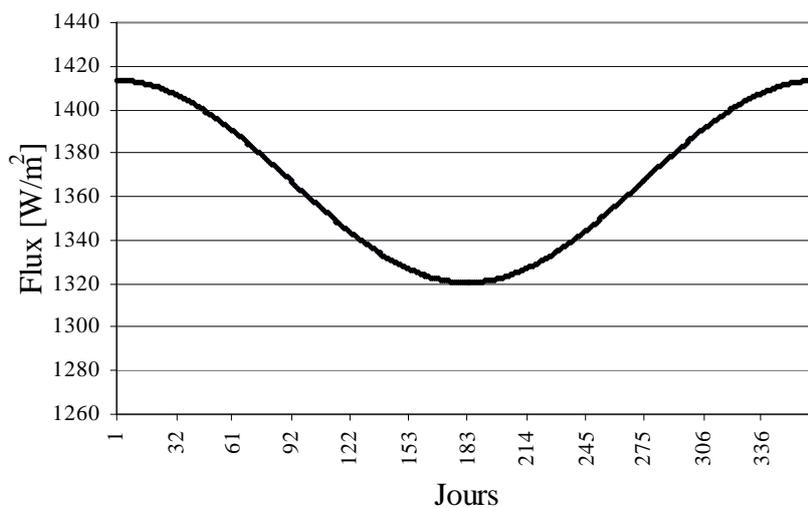


Fig. I.5 Variation annuelle du rayonnement solaire extraterrestre dans un plan perpendiculaire aux rayons

Le calcul du rayonnement extraterrestre peut être effectué par la formule approximative (Duffie and Beckmann, 1991) [2] suivante :

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

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) [2]

$$I = I_{cs} \left(\begin{array}{l} 1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B \\ + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B \end{array} \right) \quad (\text{I} - 4)$$

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

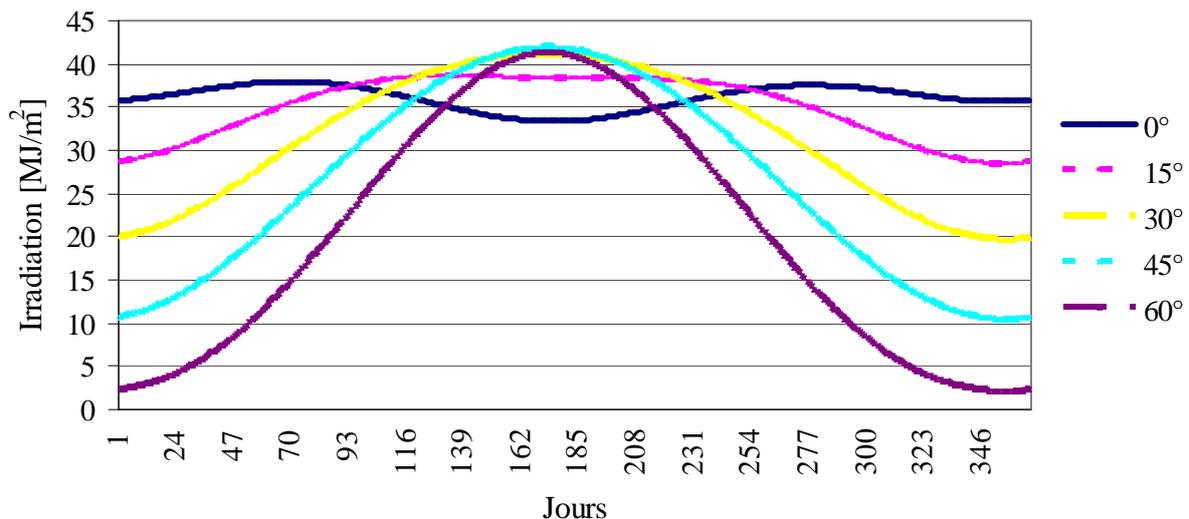


Fig. I.6 Variations annuelles de l'irradiation quotidienne d'une surface réceptrice horizontale située hors atmosphère avec différentes latitudes

I.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.

I.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 [7].

- **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 du méridien origine [7].

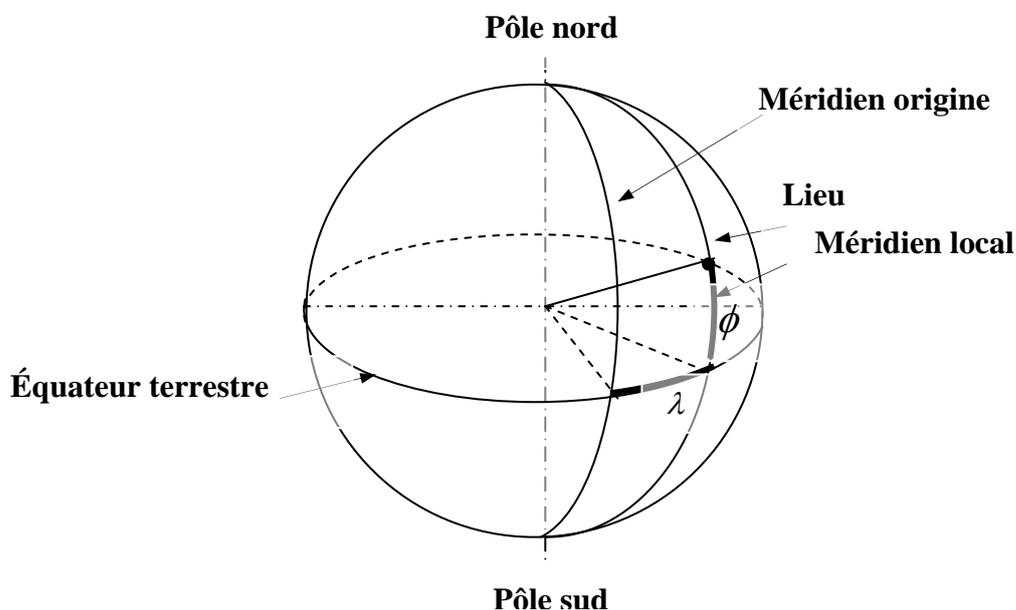


Fig. I.7 Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné [8]

- **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 [7].

I.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) [4].

La variation journalière de la déclinaison est d'environ de $0,5^\circ$. Elle est calculée par une équation simple approximative [2]:

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

Ou par une série de Fourier [2] :

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

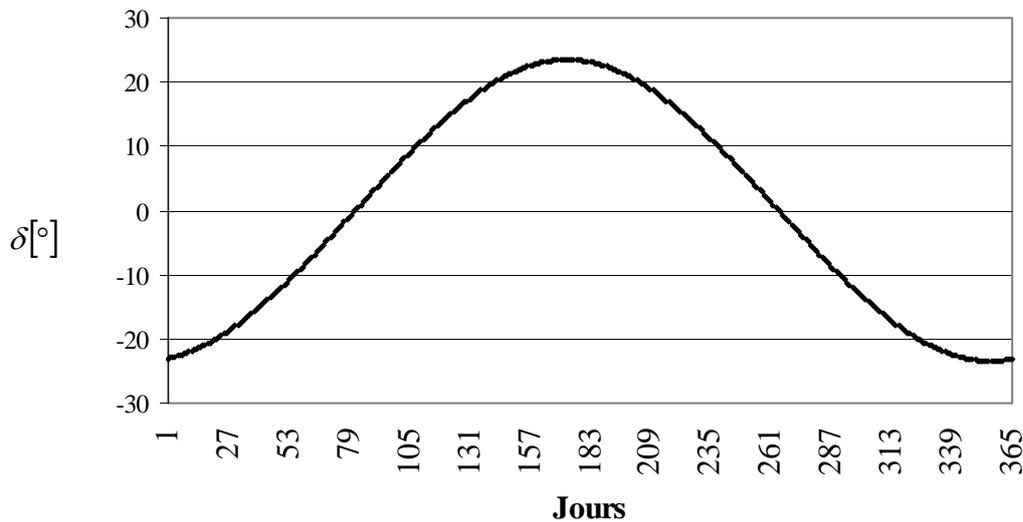


FIG.I.8 Variation annuelle de la déclinaison solaire

I.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 [6]

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

La figure **I.9** montre la variation de *ET* durant l'année donnée par la formule suivante [2]:

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

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 $n=1$.

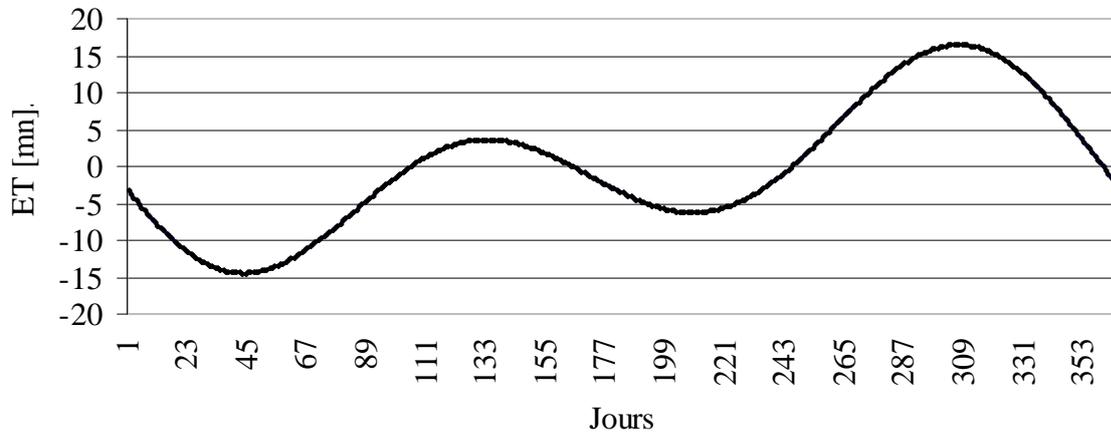


Fig.1.9 Variations annuelles de l'équation du temps

I.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 ω , 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) [6].

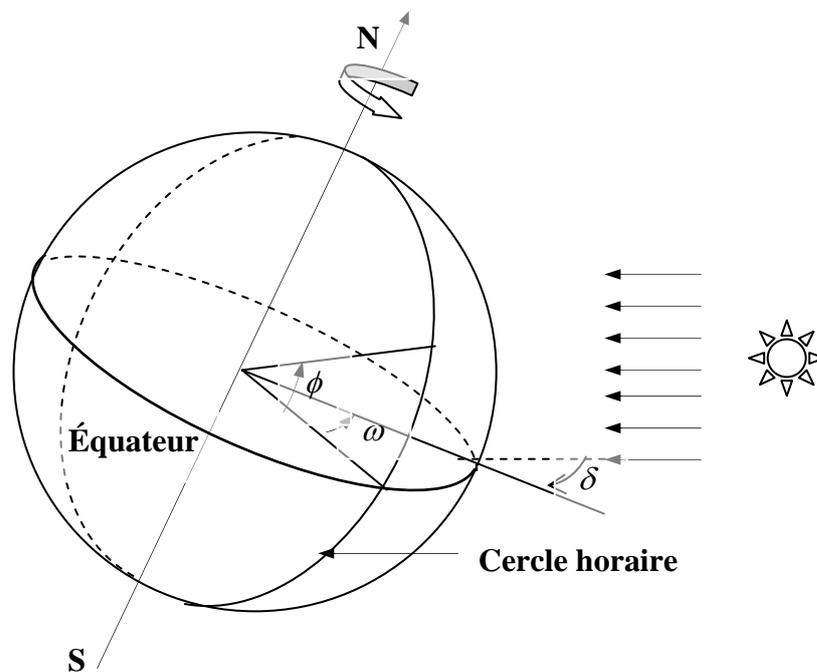


Fig. I.10 L'angle horaire et la déclinaison [4]

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

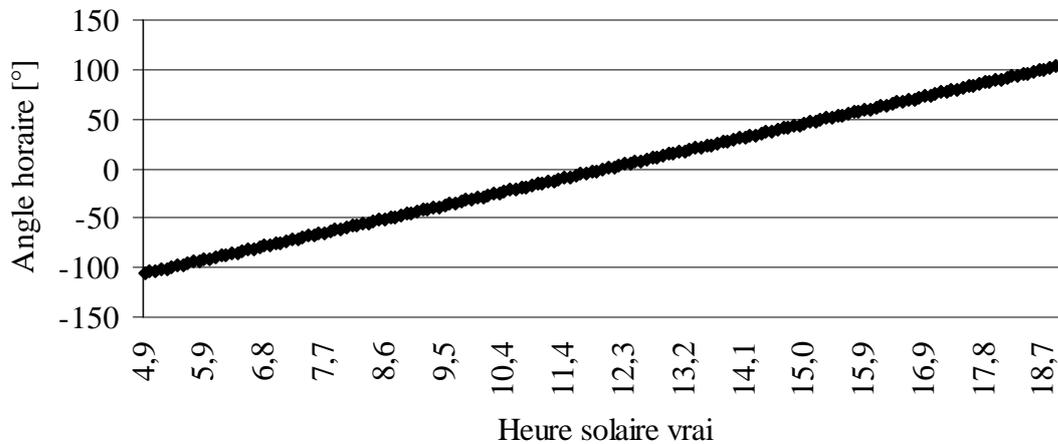


Fig. I.11 Variation journalière de l'angle horaire

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

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

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*).

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

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

On en déduit :

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

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

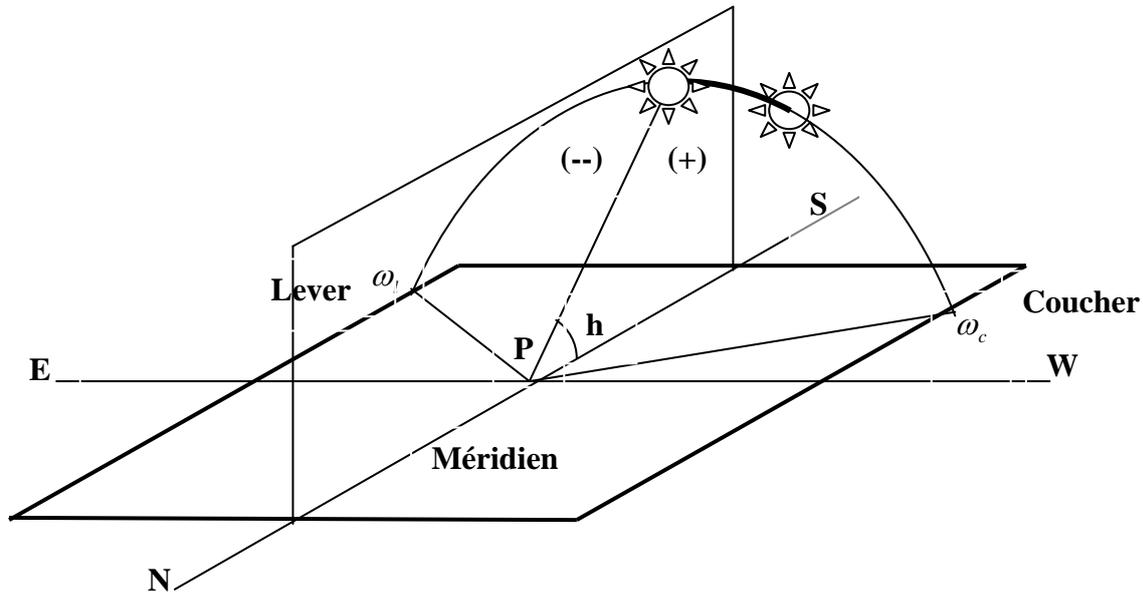


Fig. I.12 Angles solaires [7]

I.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 :

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

Où ϕ : Latitude du lieu

δ : La déclinaison du soleil

ω : L'angle horaire du soleil

I.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 $a = +90^\circ$.

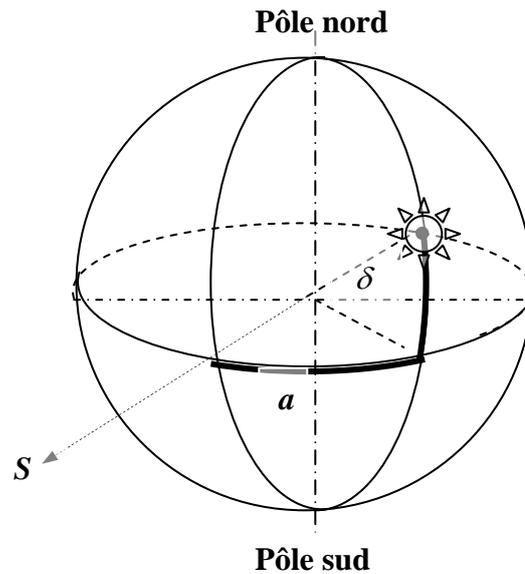


Fig. I.13 Représentation de la déclinaison et de l'azimut et la déclinaison [8].

L'azimut a est défini par les relations suivantes :

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

Où

$$\cos a = \frac{\sin \phi \sinh - \sin \delta}{\cos \phi \cosh} \quad (\text{I} - 15)$$

Ou bien

$$\cos a = \frac{\sin \phi \cos \delta \cos \omega - \cos \phi \sin \delta}{\cosh} \quad (\text{I} - 16)$$

I.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 $\sinh = 0$ (soleil à l'horizon) dans l'équation I-15. Ce qui donne :

$$\cos \omega_l = -\tan \phi \tan \delta \quad (\text{I} - 17)$$

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 :

$$dj = \omega_c - \omega_l \quad (\text{I} - 18)$$

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

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

I.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 [6] :

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

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.

I.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 [4].

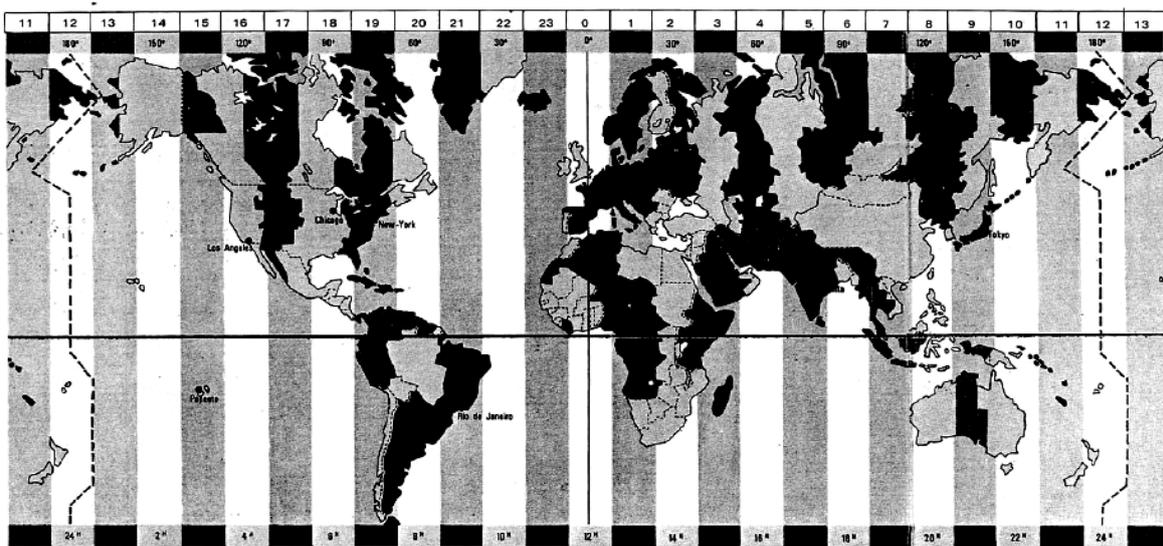


Fig.1.14 Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich [6]

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.

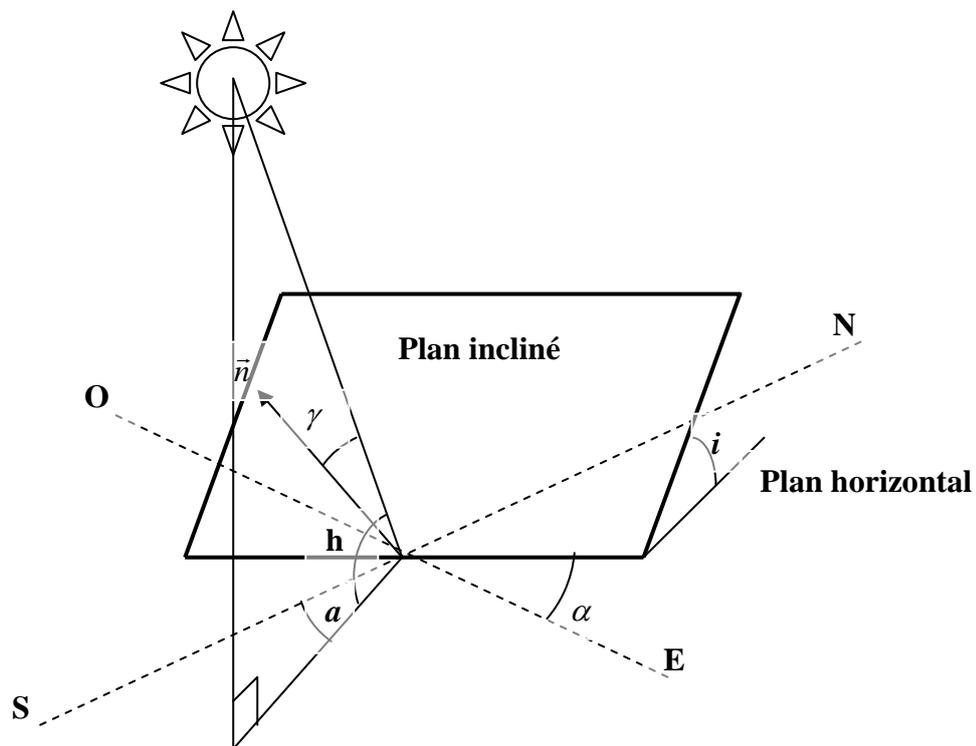


Fig. I.15 Inclinaison et orientation d'une surface réceptrice [7]

L'inclinaison sur l'horizontale est désignée par l'angle i 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'éclairement 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 [7] :

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

L'angle d'incidence γ est défini par les variables a , h , α et i et peut être calculé par [6] :

$$\cos \gamma = \cosh \sin i \cos(a - \alpha) + \sinh \cos i \quad (\text{I} - 22)$$

I.4.1 Eclairage Global

Eclairage énergétique solaire reçu par une surface horizontale à partir d'un angle solide de 2π sr. Symbole : G .

I.4.2 Rayonnement diffus

Eclairage 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 .

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

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

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

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

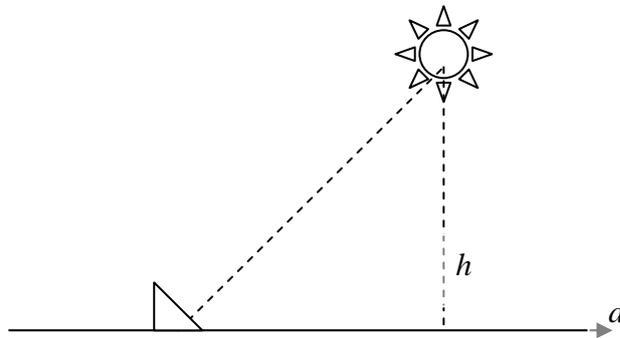


Fig.I.16 Représentation dans le plan azimutale des coordonnées (a, h) du soleil dans le cas d'un capteur situé dans l'hémisphère nord [7]

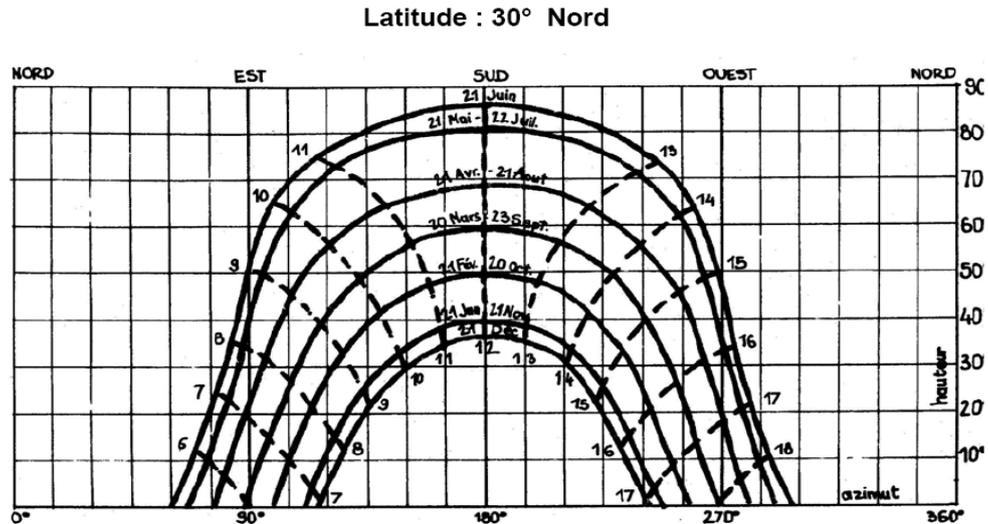


Fig. I.17 Diagramme solaire [6]

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.

I.4.3 Instrument de mesure d'éclairement

I.4.3.1 Mesures effectuées par un Pyranomètre [9]

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 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.

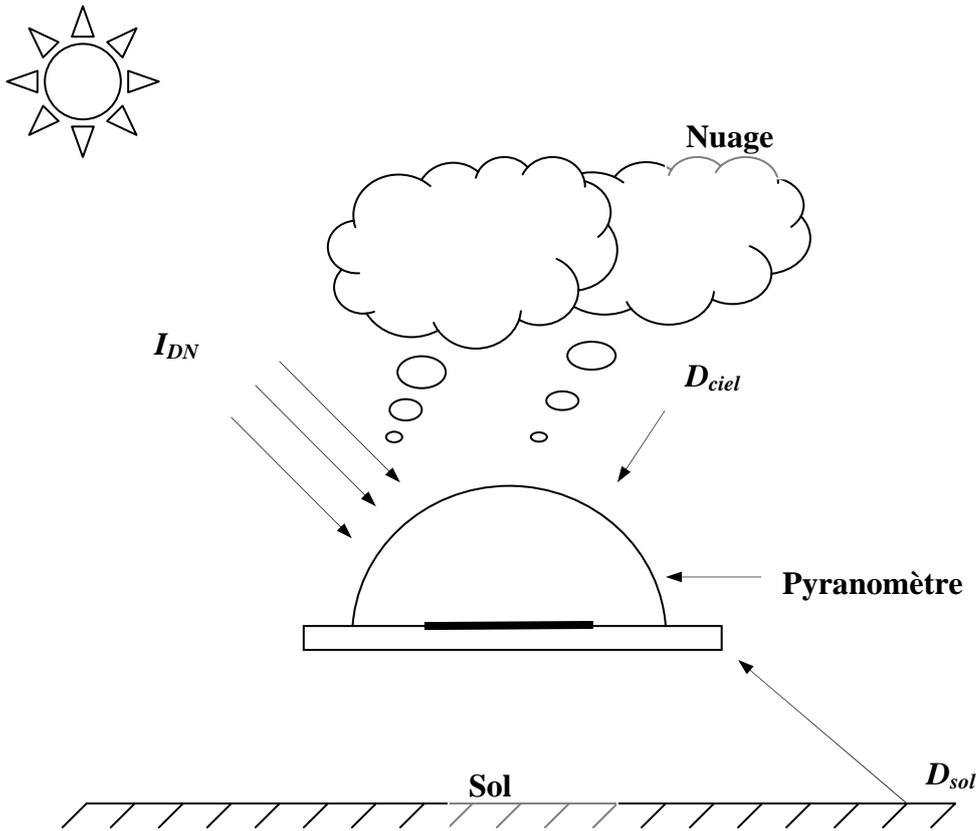


Fig. I.18 Mesure du rayonnement Global G

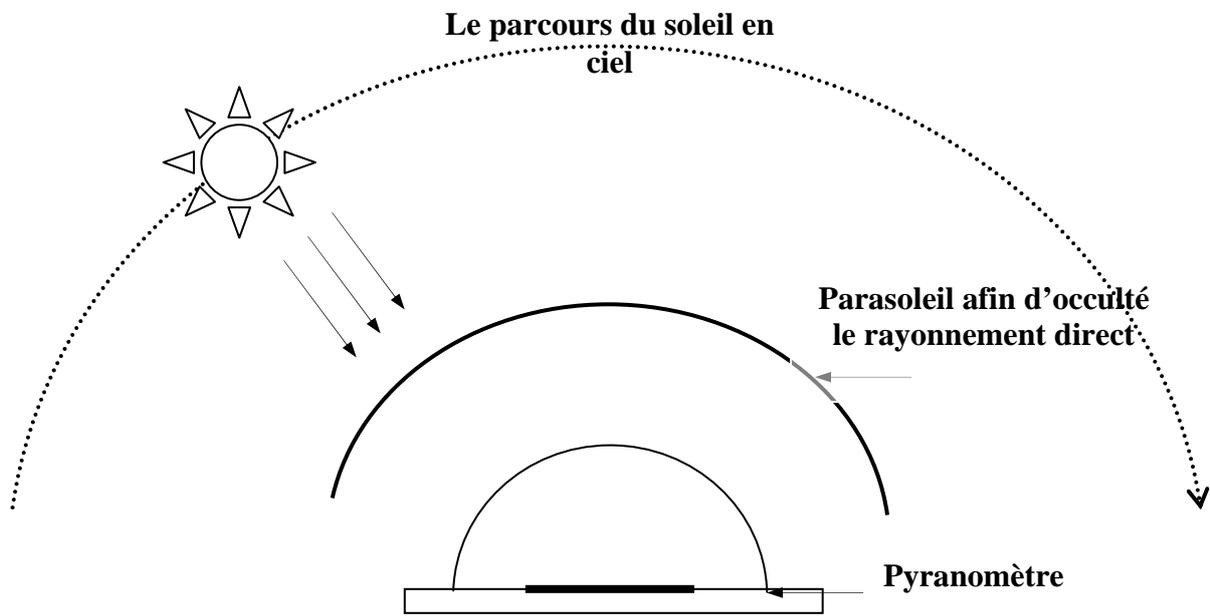


Fig. I.19 Mesure du rayonnement Diffus D

- **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.

I.4.3.2 Pyrhéliomètre et rayonnement Direct [10]

- **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 circumsolaire.

- **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.

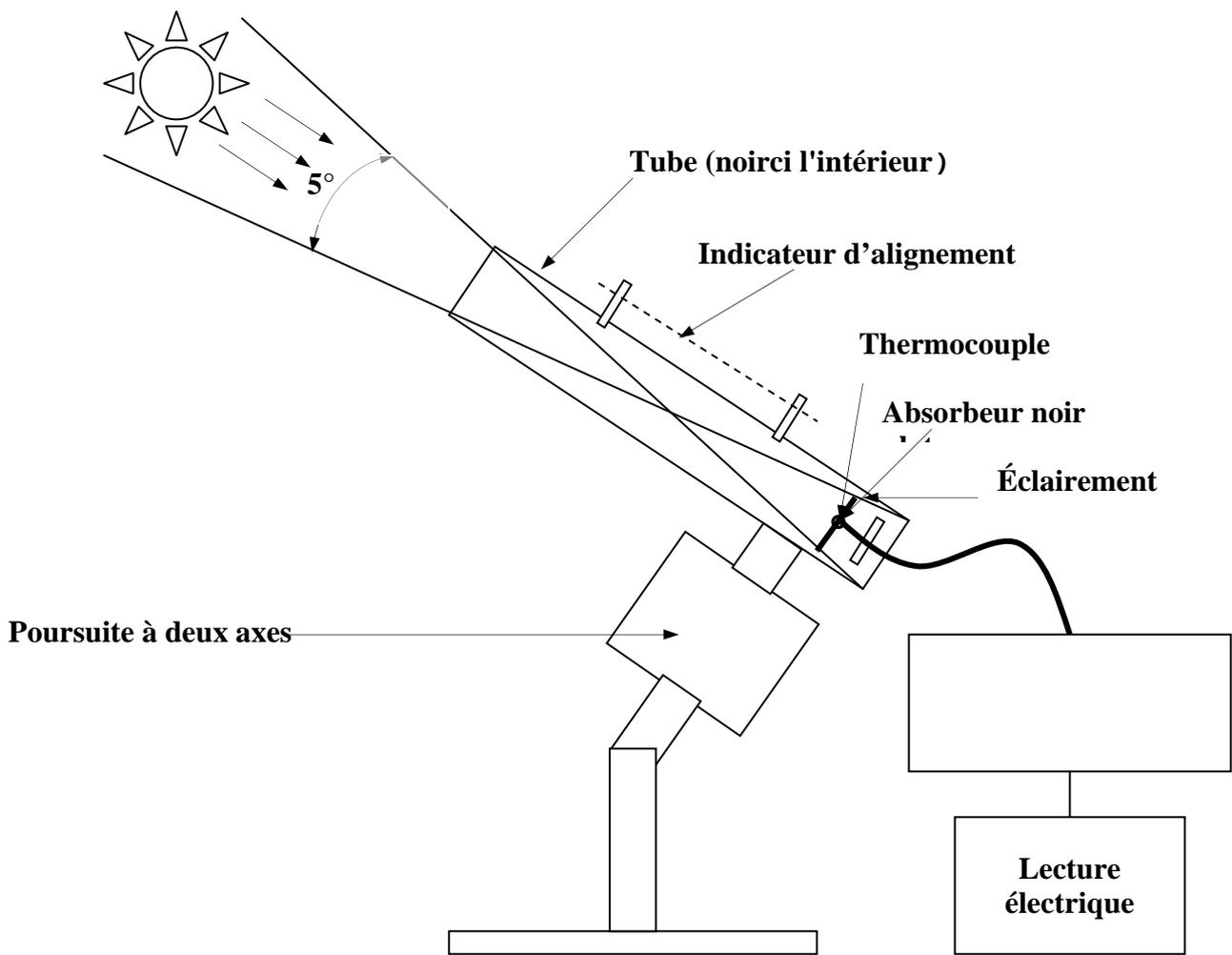


Fig. I.20 Une incidence normale de Pyrhéliomètre (NIP) utilisé pour mesurer la composante du rayonnement solaire direct [2].

- 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.

I.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.

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

L'intégration de la formule (I – 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 [7] :

$$I_o = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left[\frac{\pi}{180} \omega_l \sin \phi \sin \delta + \sin \omega_l \cos \phi \cos \delta \right] \quad (\text{I} - 26)$$

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

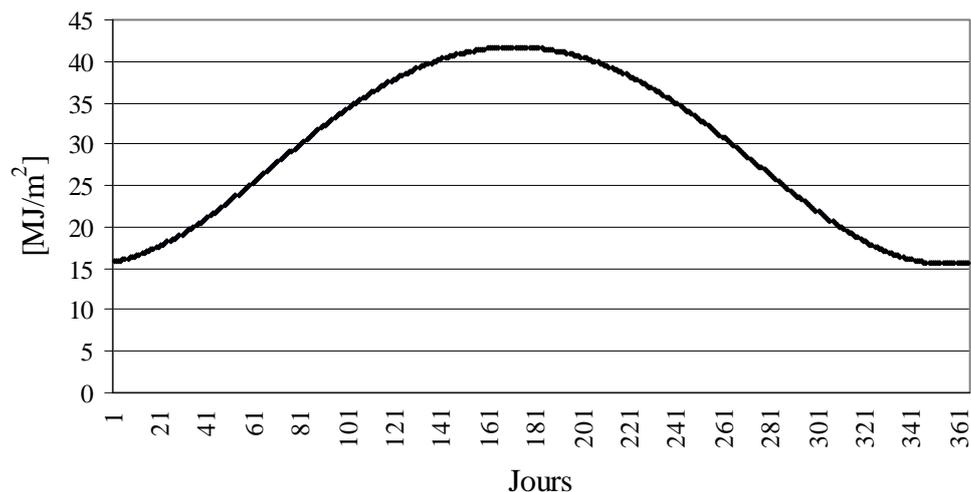


Fig.I.21 Variation de l'énergie extraterrestre reçue par une surface horizontale

I.5 Estimation de l'éclairement solaire

I.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).

I.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 $100W/m^2$ 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) :

Tableau.I.2 Expressions empiriques des éclairagements solaires par, ciel clair mais pour trois Conditions de troubles en fonction la hauteur solaire [7].

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

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

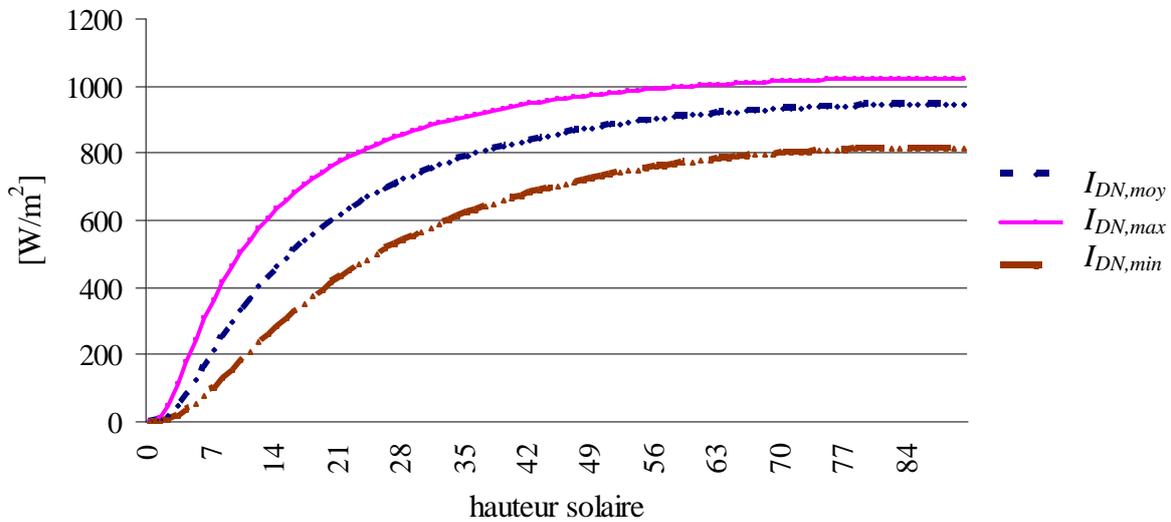


Fig. I.22 Valeurs du rayonnement direct I_{DN} en fonction de la hauteur du soleil pour conditions moyennes et extrêmes de trouble [7].

I.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 [11] a trouvé une formule dérivée de l'équation :

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

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.

I.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 (O₂, CO₂, gaz rares, ...)

Le facteur de trouble Linke T_L permet une évaluation de l'extinction atmosphérique par les gaz et l'aérosol selon la formule suivante [7] :

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

I.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 Cylindro-Parabolique par exemple),
- miroir sphérique fixe.

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

I.6.1 Calcul le 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 [11]

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

z : Altitude en mètre.

- Définition de la pression de la vapeur saturante P_{vs} [11], le taux moyen d'humidité relative HR et la pression partielle de vapeur d'eau P_v

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

$$P_{vs} = 611 \exp \left(\frac{T_{amb}}{0,059T_{amb} + 13,706} \right) \quad (I - 31)$$

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

$$P_v = P_{vs} HR \quad (I - 32)$$

T_{amb} : Température de l'air en °C.

- La masse d'aire optique relative m d'où en découle l'épaisseur optique de Rayleigh E_R qui détermine l'atténuation due à la diffusion, la solution de l'équation (I - 27) a été faite par Kasten [11]

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

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

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

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

Où h est la hauteur du soleil en degré.

- Le facteur de trouble de Linke :

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

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

β : 0,02 pour un lieu en montagne ;

β : 0,05 pour un lieu rural ;

β : 0,10 pour un lieu urbain ;

β : 0,20 pour un lieu industriel (atmosphère polluée).

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

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

En simplifier l'obtention

$$I_{DN} = I_{sc} \exp\left(-\frac{T_L}{0,9 + 9,4 \sinh}\right) \quad (\text{I} - 38)$$

1.6.2 Calcul le 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 [7].

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

Ou par l'utilisation de la corrélation suivante en l'absence de toute mesure [7] :

$$D = 54,8 \sqrt{\sin(h)} [TL - 0,5 - \sqrt{\sin(h)}] \quad (\text{I} - 40)$$

1.6.3 Calcul le rayonnement solaire global

La somme de deux rayonnements représente le rayonnement global [6] :

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

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

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

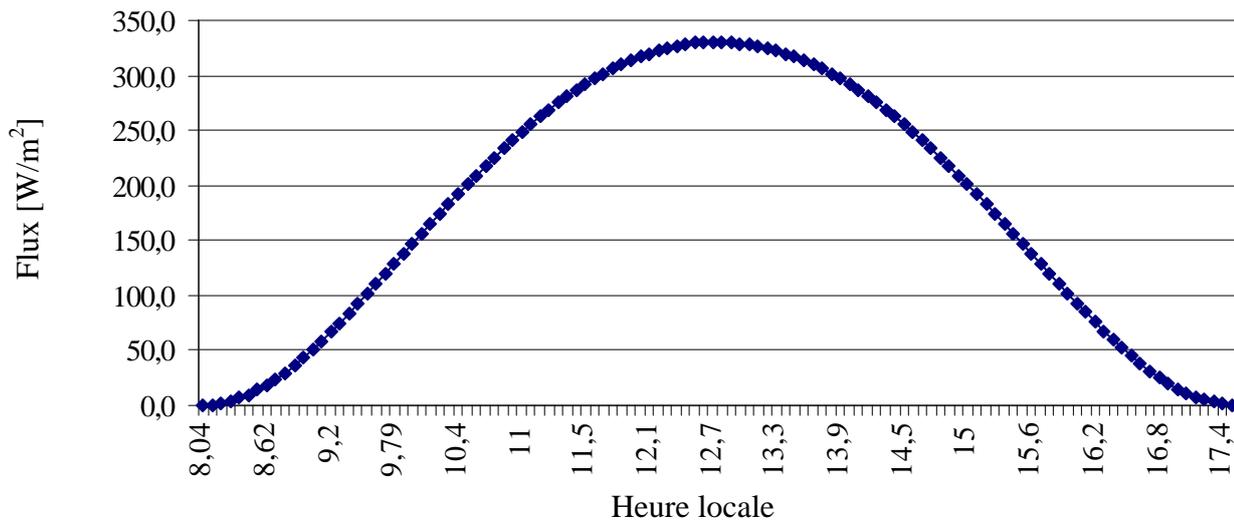


Fig. I.23 La variation de l'éclairement direct au cours de la journée du 22/12/04 à latitude de 36,78, longitude de 3,03 sur un plan horizontal.

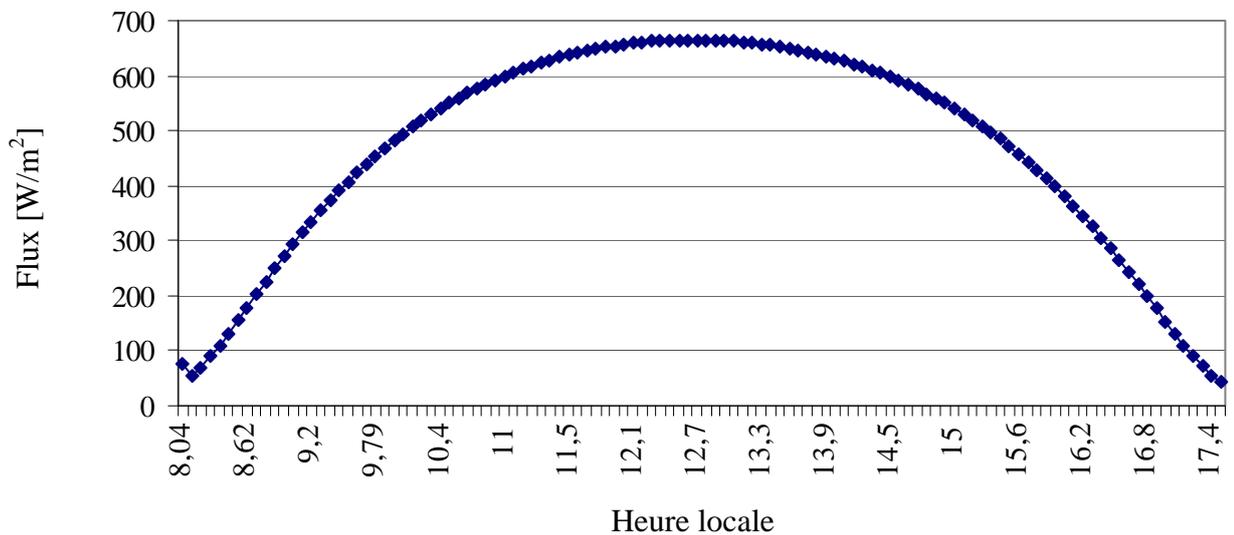


Fig. I.24 La variation de l'éclairement direct perpendiculaire a la surface au cours de la journée du 22/12/04 à latitude de 36,78, longitude de 3,03.

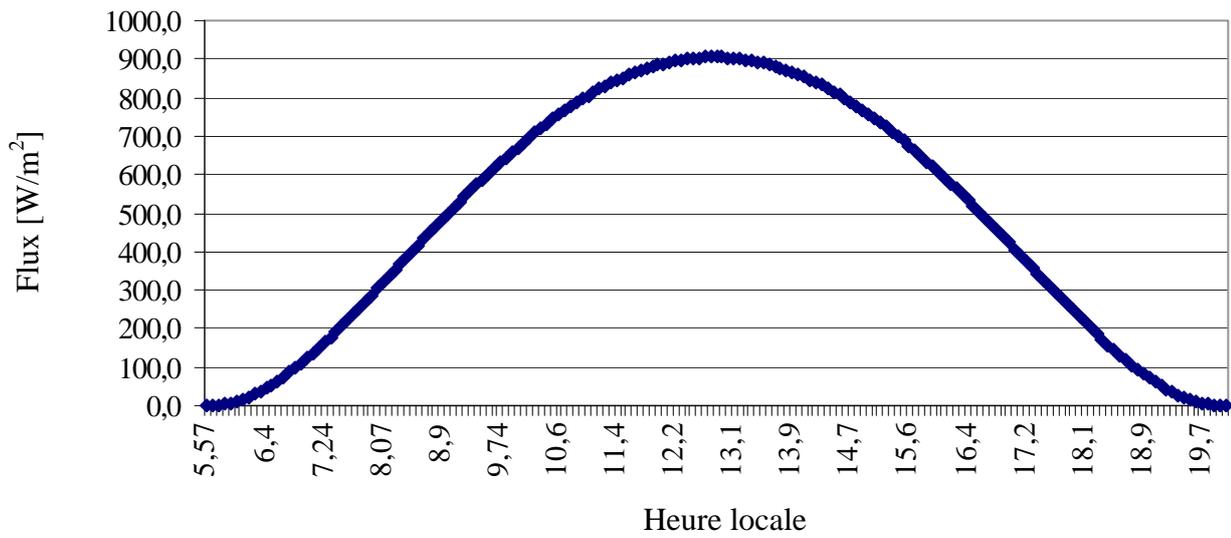


Fig. I.25 La variation de l'éclairement direct au cours de la journée du 22/06/04 à latitude de 36,78, longitude de 3,03 sur un plan horizontal.

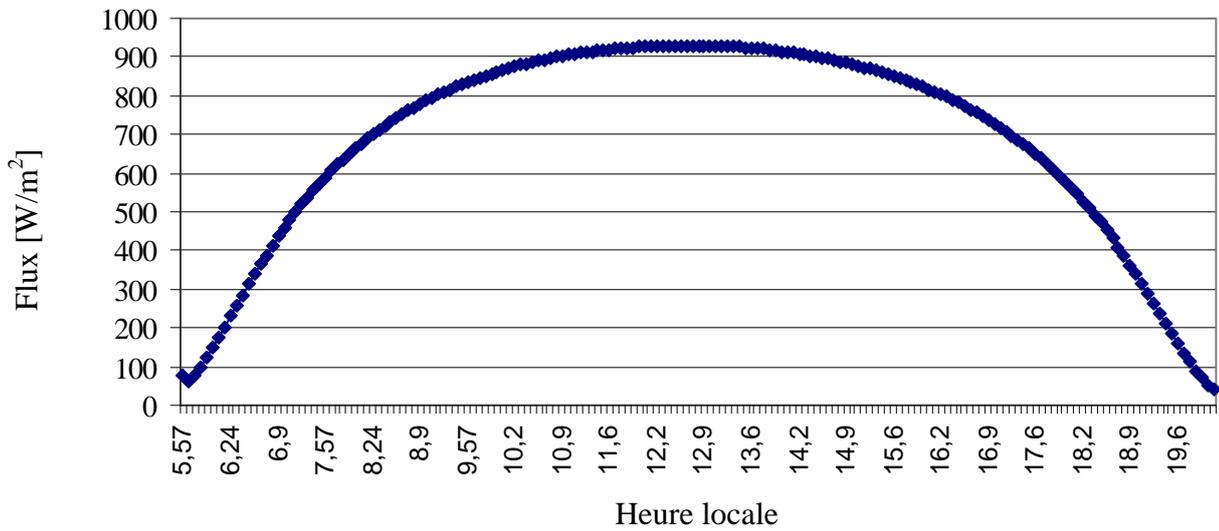


Fig. I.26 La variation de l'éclairement direct perpendiculaire a la surface au cours de la journée du 22/06/04 à latitude de 36,78, longitude de 3,03.

I.7 Conclusion

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

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 [7] pour estimé 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 voire les figures (**I.23, I.24, I.25, I.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.

II.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 Cylindro-parabolique, 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 paraboliques et meilleurs par rapport aux concentrateurs cylindro-Parabolique [13].

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.

II.2 Principes

II.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.

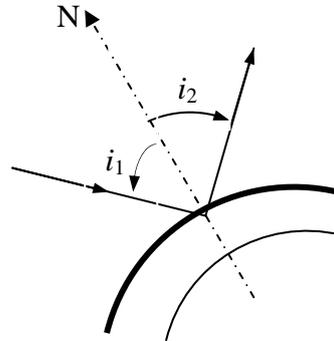


Fig.II.1 Réflexion d'un rayon lumineux

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

II.2.2 Stigmatisme [13]

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 **II.2**.

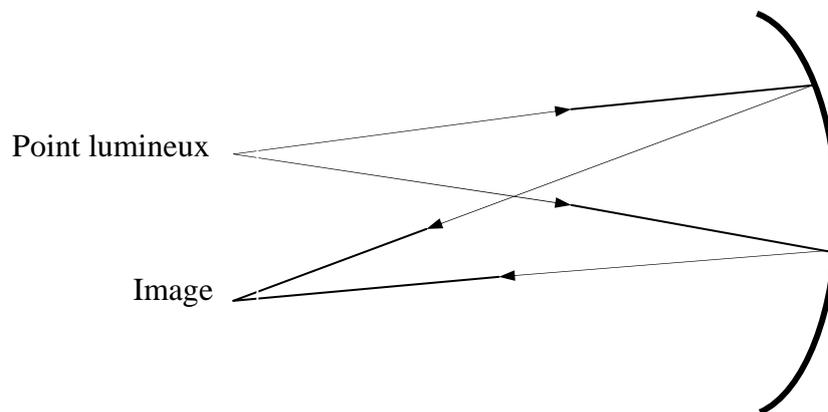


Fig.II.2 Stigmatisme

II.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 [17] :

1. Concentration idéale (Gauss)

2. Concentration géométrique
3. Concentration optique (énergétique)

II.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 [17].

$$C_{idéal} = \frac{A_{ref}}{A_G} \quad (\text{II} - 1)$$

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

II.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 :

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

II.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 [17]:

$$C_o = \frac{\frac{1}{A_{abs}} \int I_{abs} dA_{abs}}{I_{ref}} \quad (\text{II} - 3)$$

II.3 Description le principe d'un concentrateur

La figure II.3 définit les différentes grandeurs géométriques d'un capteur à concentration :

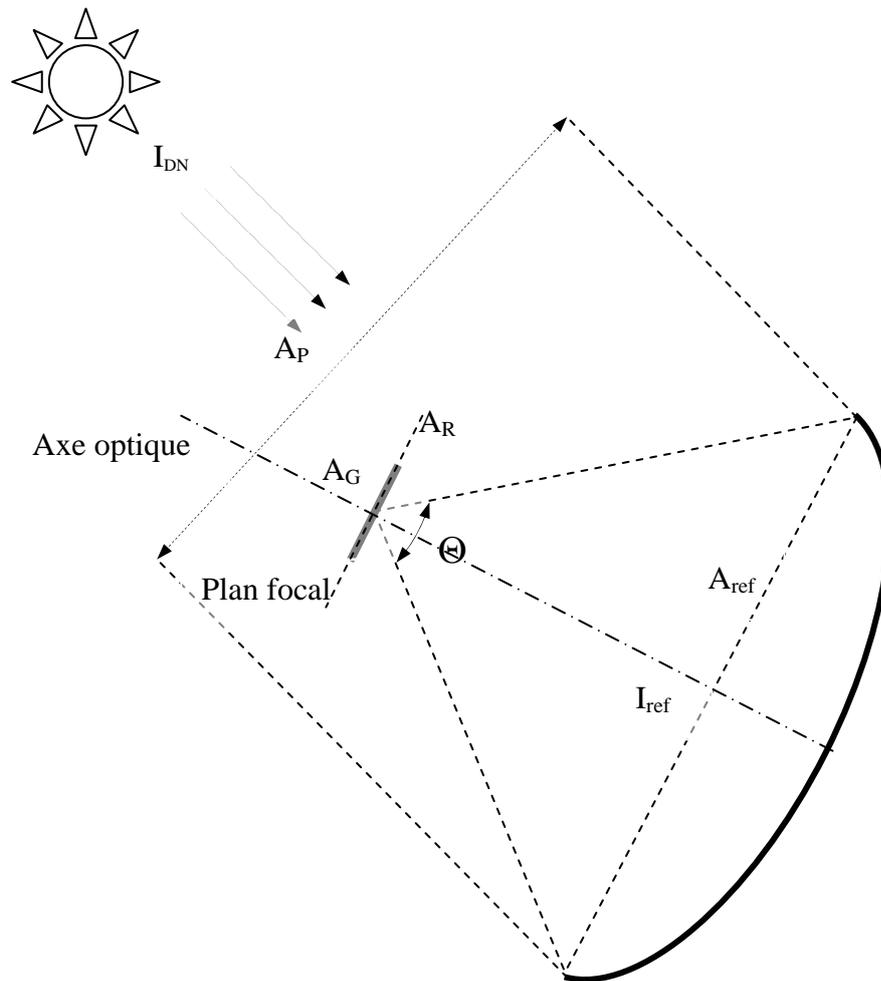


Fig.II.3 Schéma d'un capteur solaire à concentration [8]

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 Θ [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.

II.4 Formules de calcul des différentes concentrations

On utilise les formules suivantes pour caractériser les différents types de concentrations [13] :

$$1. \text{ Concentration idéale: } C_{\text{idéal}} = \frac{A_{\text{ref}}}{A_G} = \frac{\text{section de réflecteur}}{\text{surface de Gauss}} \quad (\text{II} - 4)$$

$$2. \text{ Concentration géométrique : } C_g = \frac{A_{\text{ref}}}{A_R} = \frac{\text{section de réflecteur}}{\text{surface image réelle du soleil}} \quad (\text{II} - 5)$$

$$3. \text{ Concentration énergétique : } C_o = \frac{I_G}{I_{\text{ref}}} = \frac{\text{flux moyen en Gauss}}{\text{flux direct en section de réflecteur}} \quad (\text{II} - 6)$$

$$4. \text{ Efficacité d'un concentrateur : } \eta_{\text{con}} = \frac{C_o}{C_{\text{idéal}}} = \frac{\text{concentration optique}}{\text{concentration idéal}} \quad (\text{II} - 7)$$

$$5. \text{ Facteur de four : } FF = \frac{C_{o,\text{effective}}}{C_o} = \frac{\text{concentration optique effective}}{\text{concentration optique}} \quad (\text{II} - 8)$$

Avec $C_{o,\text{effective}}$ la concentration énergétique réelle d'un système elle tient compte des pertes dues aux réflexions, aux irrégularités géométriques et la présence des masques [13].

II.5 L'importance de la concentration solaire [14, 15, 16]

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

Avantages	Inconvénients
<p>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 à concentration.</p> <p>2- L'aire d'absorption d'un système à concentration est plus faible que celle d'un capteur plan pour la même surface collectrice Du rayonnement solaire (surface spécifique plus faible)</p> <p>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.</p> <p>4- À cause de la moindre surface spécifique de l'absorbeur, on peut utiliser des surfaces à absorption sélective ou même une isolation par le vide pour réduire les pertes thermiques et augmenter le rendement de manière économique.</p> <p>5- les systèmes à concentration peuvent être utilisés à la production d'énergie électrique. Le nombre d'heures annuel de fonctionnement est plus élevé que celui d'un</p>	<p>1- On collecte peu ou pas du tout de rayonnement diffus.</p> <p>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.</p> <p>3- Dans les systèmes à poursuite à 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.</p> <p>4- Le pouvoir réflecteur des miroirs décroît dans le temps et il faut les réargenté ou le repolir.</p> <p>5- Il existe encore peu de réalisations de grande puissance à réflecteur stationnaire à haute concentration et des recherches supplémentaires sont nécessaires pour étudier</p>

<p>collecteur plan. Le surcoût de l'installation peut s'amortir en un temps plus court par un gain supplémentaire en énergie.</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>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.</p>	la fiabilité et la maintenance de tels systèmes.
--	--

II.6 Études générales de quelques différents concentrateurs

II. 6.1 Paraboloïde

II.6.1.1 Propriétés

Un paraboloïde de révolution illustré par la figure II.4 s'obtient par rotation d'une parabole autour de son axe. Rappelons ici quelques propriétés de cette courbe [13].

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 : $FM = MM'$

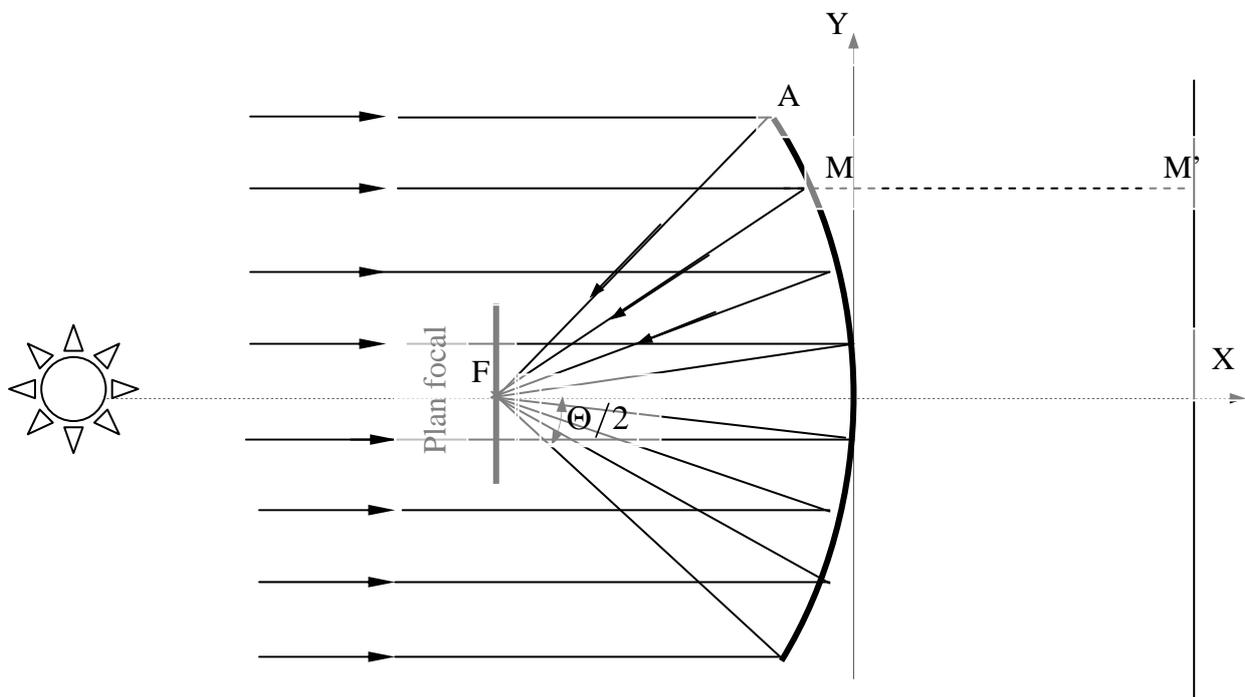


Fig.II.4 Coupe d'un paraboloïde de révolution [13].

II.6.1.2 Concentration idéale

La concentration idéale est calculée par :

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

et que

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

de plus :

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

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

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

II.6.1.3 Concentration géométrique

Par définition :

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

En se référant à la figure II.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 : C'est l'angle sous lequel on voit le soleil à partir de la terre, comme illustré dans la figure II.5.

$$\varepsilon = 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ rad.}$$

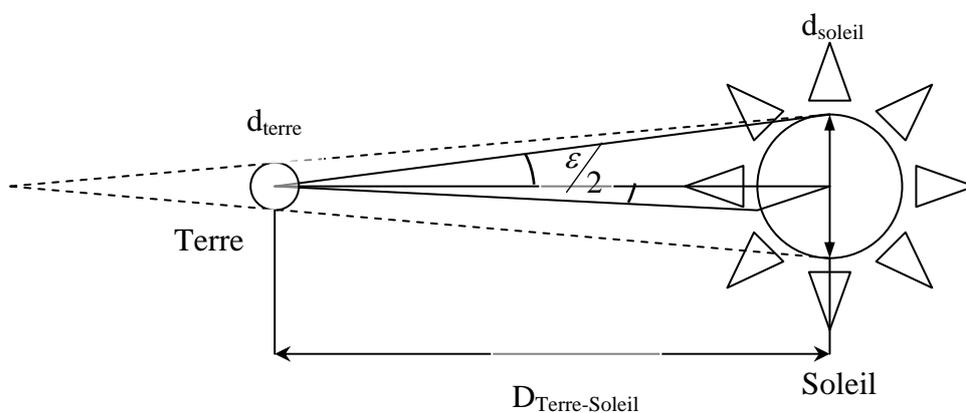


Fig.II.5 Le diamètre apparent du soleil est $\varepsilon = 32'$ [18]

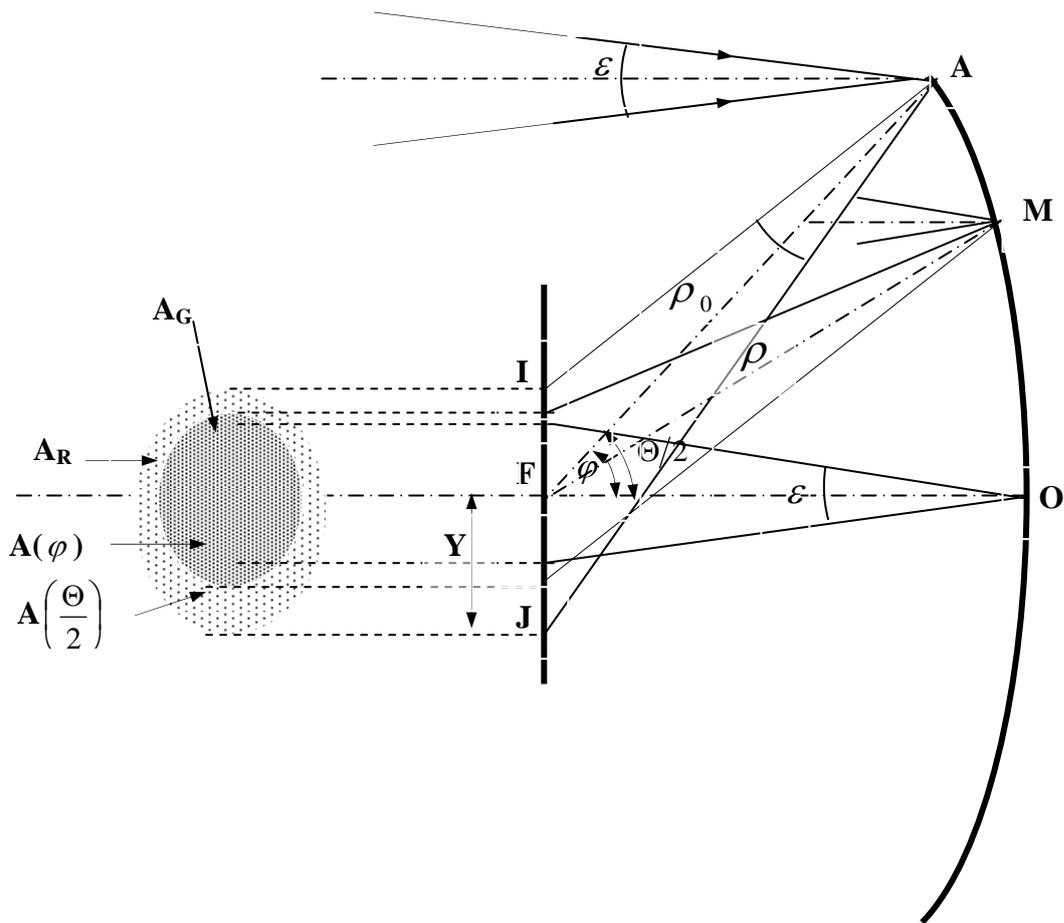


Fig. II.6 Coupe d'un parabolôide de révolution montrant les projections dans le plan focal de l'image du soleil [8]

L'image du soleil dans le plan focal montré par la figure II.7 a pour surface :

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

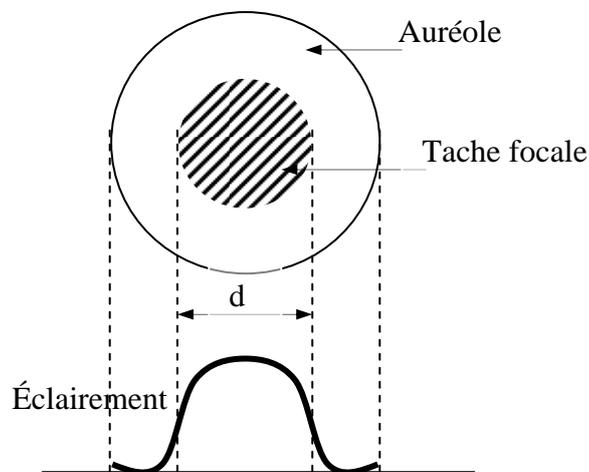


Fig.II.7 Image de Gauss d'un miroir Parabolôide [13]

II.6.1.4 Concentration optique

Par définition [13] :

$$C_o = \left(\frac{2}{\varepsilon} \sin \frac{\Theta}{2} \right)^2 \quad (\text{II} - 15)$$

L'efficacité du paraboloïde comme concentrateur des rayons solaires s'écrit [8] :

$$\eta = \frac{C_o}{C_{id\acute{e}ale}} = \cos^4 \left(\frac{\Theta}{4} \right) \quad (\text{II} - 16)$$

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

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

II.6.2 Cylindro Parabolique

II.6.2.1 Propriétés

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

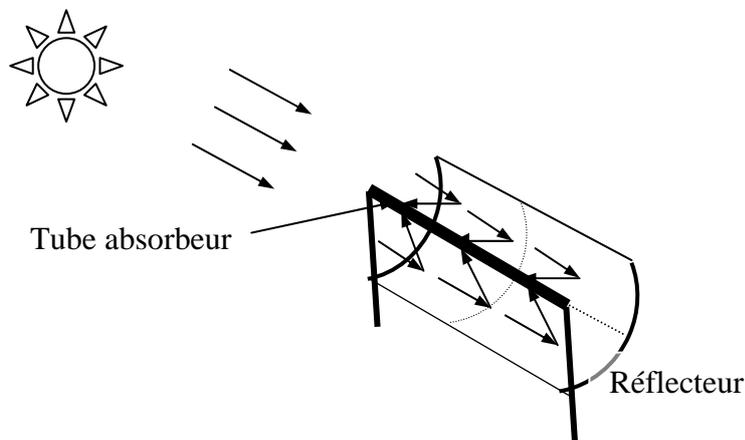


Fig.II.8 Capteur Cylindro Parabolique

II.6.2.2 Concentration idéale

En appelant L la longueur du concentrateur, la section d'ouverture s'écrit:

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

L'image de Gausse a pour surface :

$$A_G = f\varepsilon \tag{II - 18}$$

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

$$C_{idéal} = \frac{4}{\varepsilon} \tan \frac{\Theta}{4} \tag{II - 19}$$

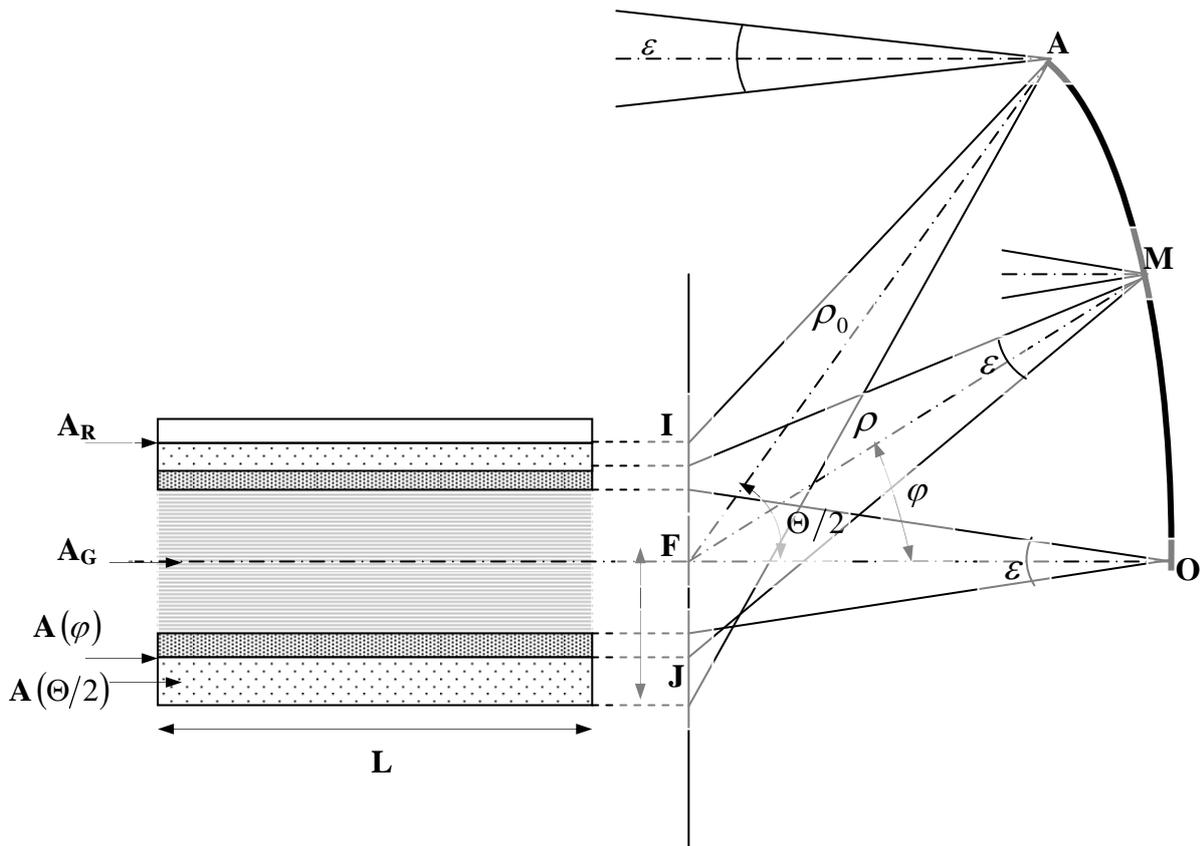


Fig.II.9 Coupe méridienne d'un demi Concentrateur Cylindro Parabolique [13]

II.6.2.3 Concentration géométrique

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

On a
$$Y \approx \frac{\rho_0 \varepsilon}{2 \cos\left(\frac{\Theta}{2}\right)}, A_R = 2 Y L$$

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

On trouve :

$$C_g = \frac{\sin \Theta}{\varepsilon} \tag{II - 20}$$

II.6.2.4 Concentration optique

$$C_o = \frac{2}{\varepsilon} \sin \frac{\Theta}{2} \quad (\text{II} - 21)$$

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

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

II.6.2.5 Montage

Il existe deux types de montage d'un capteur cylindro-parabolique :

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.

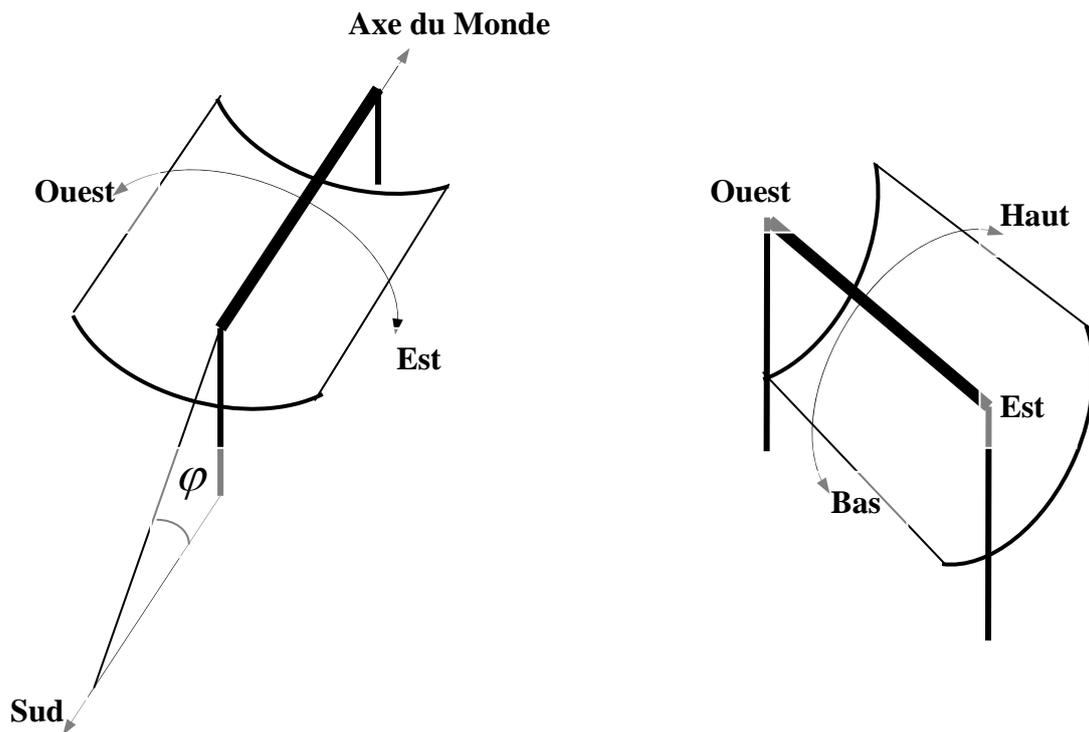


Fig.II.10 Montage d'un capteur cylindro-parabolique, -(à gauche)-suivant le monde, -(à droite)-suivant la direction Est-Ouest [13]

II.6.3 Central à tour [8]

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.

II.6.3.1 Description de système

La concentration du rayonnement solaire peut être réalisée au moyen de récepteur cylindro paraboliques 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. Le schéma de principe d'une telle centrale avec des héliostats plans est représenté à la Figure II.11.

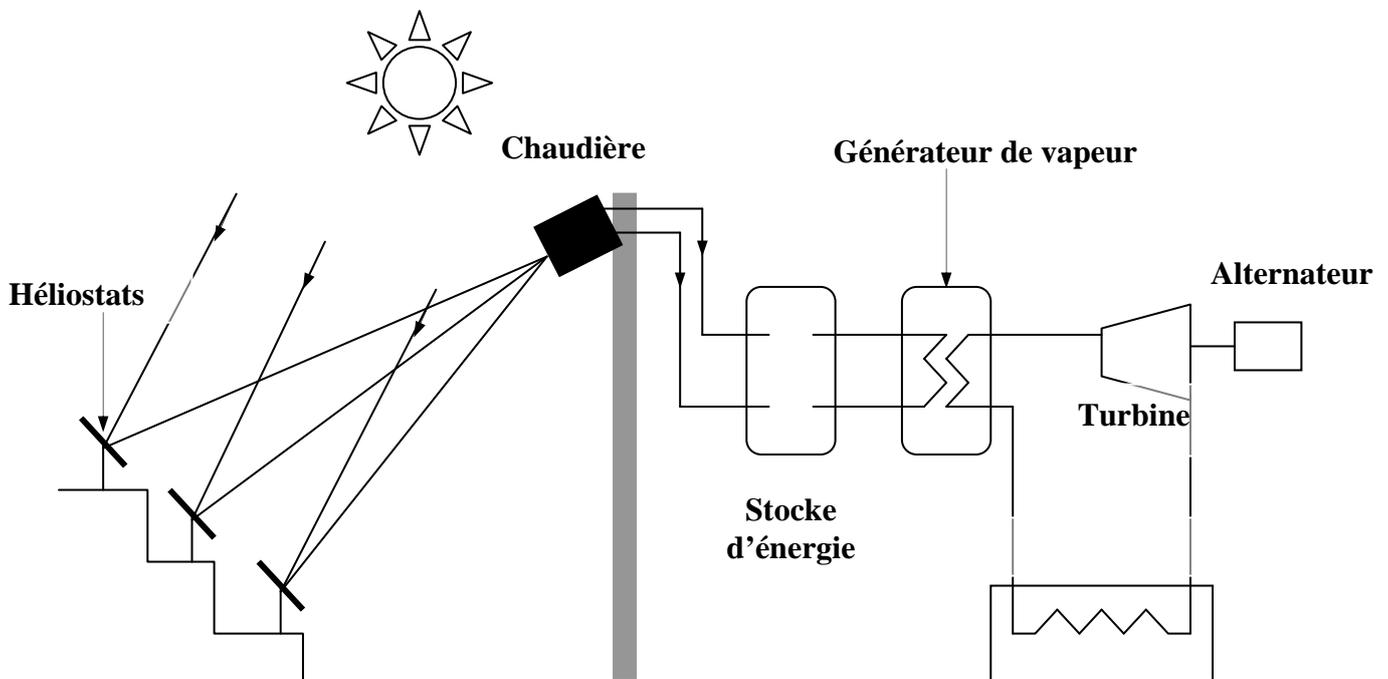


Fig. II.11 Schéma de principe d'une centrale à tour [8]

II.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 :

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

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

$$\eta_{ch} = \frac{P_{ch}}{\dot{Q}_{abs} S_P} = \alpha_{abs} - \frac{\varepsilon_{abs} \sigma (T_{abs}^4 - T_{amb}^4)}{\dot{Q}_{abs}} \quad (\text{II} - 23)$$

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 :

$$\dot{Q}_{abs} = C_{o,effective} I_{DN} \quad (\text{II} - 24)$$

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 :

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

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

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

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

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

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 :

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

La figure **II.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 $C_{o,effective}$. On voit donc que la température de la chaudière doit être adaptée à la concentration effective pour espérer atteindre le rendement maximal.

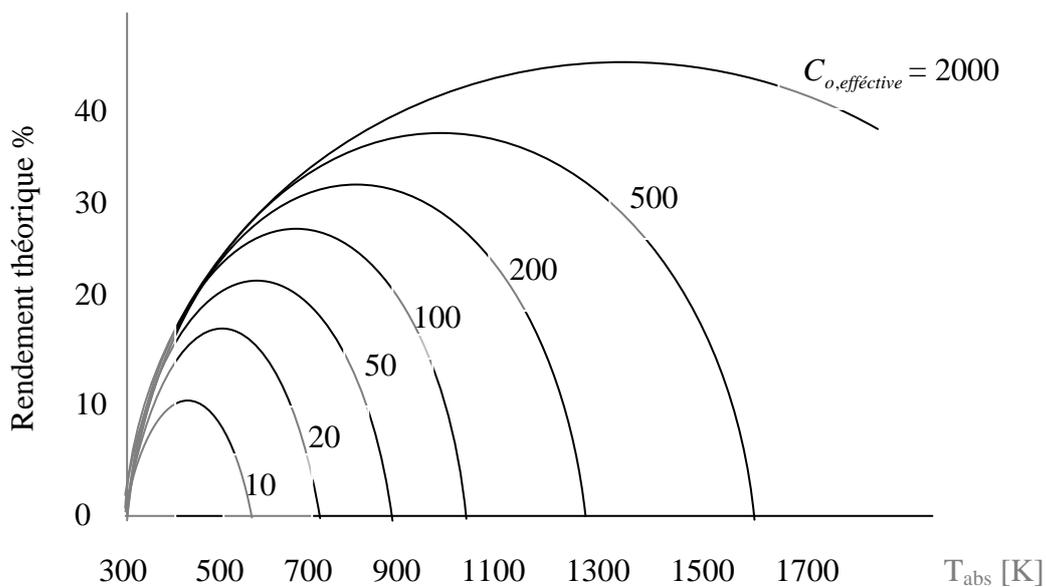


Fig.II.12 Température de l'absorbeur (chaudière) [13]

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 $T_{amb} = 300 \text{ K}$

II.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).

III.1 Introduction

Ce chapitre présente l'étude d'un capteur à concentration sphérique du rayonnement solaire. Le miroir concentrateur est une calotte sphérique suit la course du soleil et l'entrée du convertisseur d'énergie est un disque dont on détermine le rayon et la position exacte. Une relation permettant l'optimisation du capteur a été établie entre le taux de concentration géométrique et l'angle d'ouverture du miroir.

Une comparaison est en dernier lieu effectuée avec le capteur solaire utilisant un miroir parabolique.

III.2 Définitions

III.2.1 la Surface Sphérique

Le réflecteur est un miroir de surface sphérique, concave, possédant une propriété réfléchissante grâce à un dépôt métallique. Retenons une propriété importante de ces miroirs : quand un faisceau lumineux arrive parallèlement à l'axe, tous les rayons réfléchis convergent en un point unique F situé sur l'axe appelé foyer du miroir. Cette propriété n'est valable que pour **des faibles ouvertures** (approximation de Gauss).

III.2.2 Concentration idéale

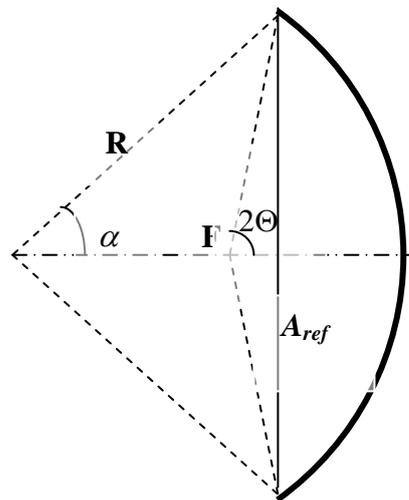


Fig. III .1 Coupe d'un miroir sphérique [8]

Avec :

$$A_{ref} = \pi R^2 \sin^2 \alpha \quad (\text{III} - 1)$$

et :

$$A_G = \pi f^2 \left(\frac{\varepsilon}{2} \right)^2 \quad (\text{III} - 2)$$

D'où :

$$C_{idéale} = \left(\frac{4}{\varepsilon} \sin \alpha \right)^2 \quad (\text{III} - 3)$$

Cette surface est astigmatique : les rayons incidents, parallèle à l'axe optique, ne convergent pas tous, après réflexion, en un même point. Ils sont tangents à une surface de révolution appelée caustique d'aberration sphérique.

Un miroir sphérique n'est stigmatique de façon approchée que dans les conditions de Gauss (faible ouverture et faibles champs). Si l'on écarte le foyer F de sa place, des aberrations apparaissent.

III.2.3 Concentration géométrique

Le plan (P) correspond au disque de moindre diffusion. C'est dans ce plan, que l'on aura intérêt à placer le récepteur si on veut obtenir des températures élevées.

Concernant la surface du disque de moindre diffusion, la concentration géométrique est donnée par la formule approximative généralisée suivante [13] :

$$C_g = \left[\frac{\sin 2\Theta}{\sin \Theta \sin^2 \frac{\Theta}{4} + \varepsilon} \right]^2 \quad (\text{III} - 4)$$

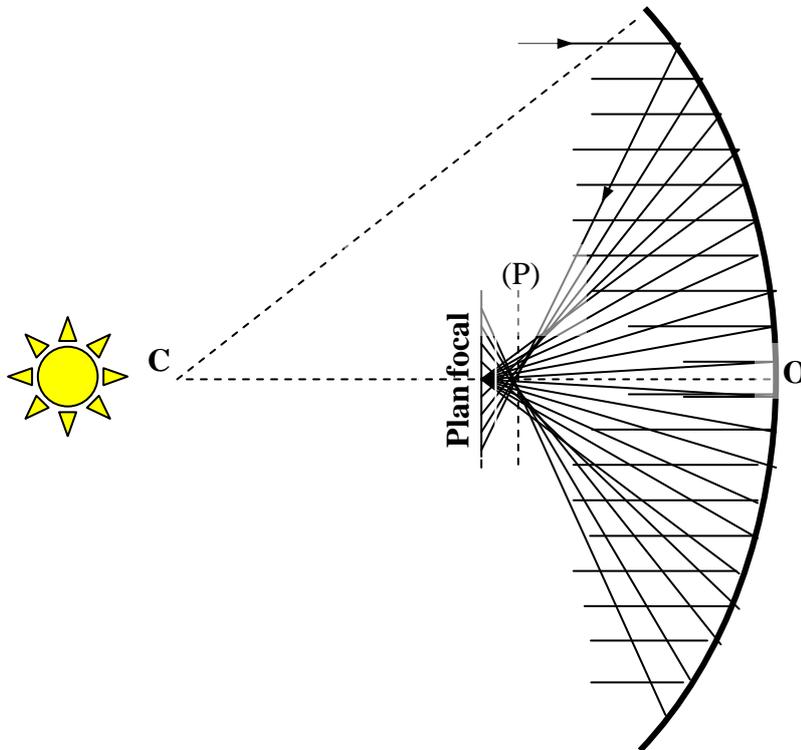


Fig.III.2 Schéma caractérise le plan (P) de moindre diffusion d'un capteur sphérique.

III.2.4 Aberration de sphéricité pour un point d'un axe:

Coupons le faisceau réfléchi par un écran perpendiculaire à l'axe principal. Donnons successivement à l'écran les positions 1, 2, 3, 4, 5 en partant du miroir. Les apparences observées sont indiquées par la figure III.3; les traits forts correspondent aux régions où il y a accumulation de lumière : ce sont les sections par l'écran des nappes de la caustique. Le disque de rayon minimum par lequel passent tous les rayons réfléchis sur le miroir s'appelle disque de moindre diffusion : il correspond à la position 3 de l'écran. La disposition de l'éclairement sur ce cercle est assez compliquée et présente trois maximums. Par contre, dans la position 5, on a un maximum d'éclairement très aigu correspondant au foyer F [13].

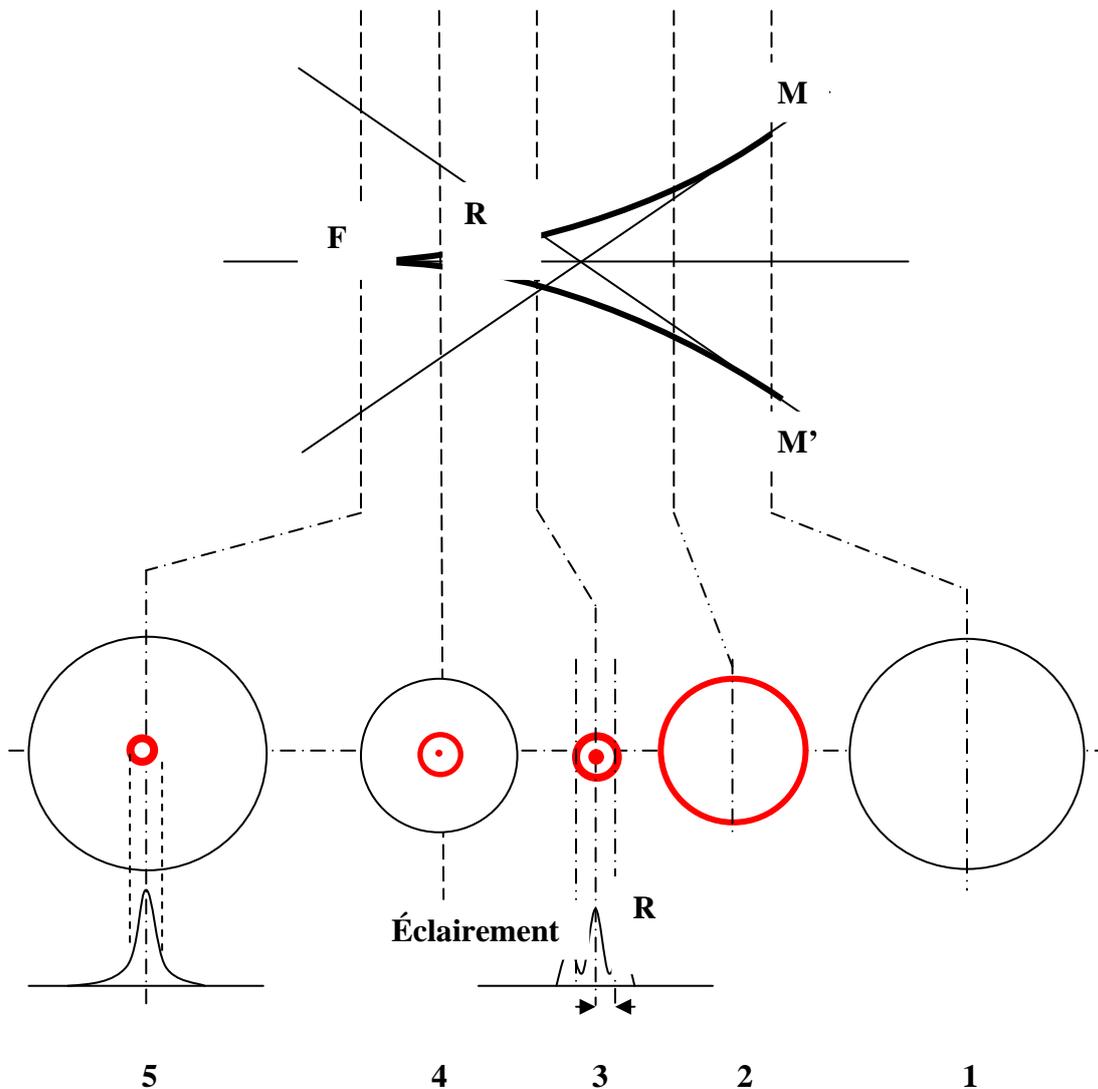


Fig. III.3 Distribution de l'éclairement dans un plan perpendiculaire à l'axe (les zones rouges correspondent aux régions de fort éclairement) [13].

Les zones de concentration de la lumière dans un faisceau donnent la surface caustique à deux nappes, la nappe tangentielle et la nappe sagittale qui dans ce cas est dégénérée en une portion de l'axe optique.

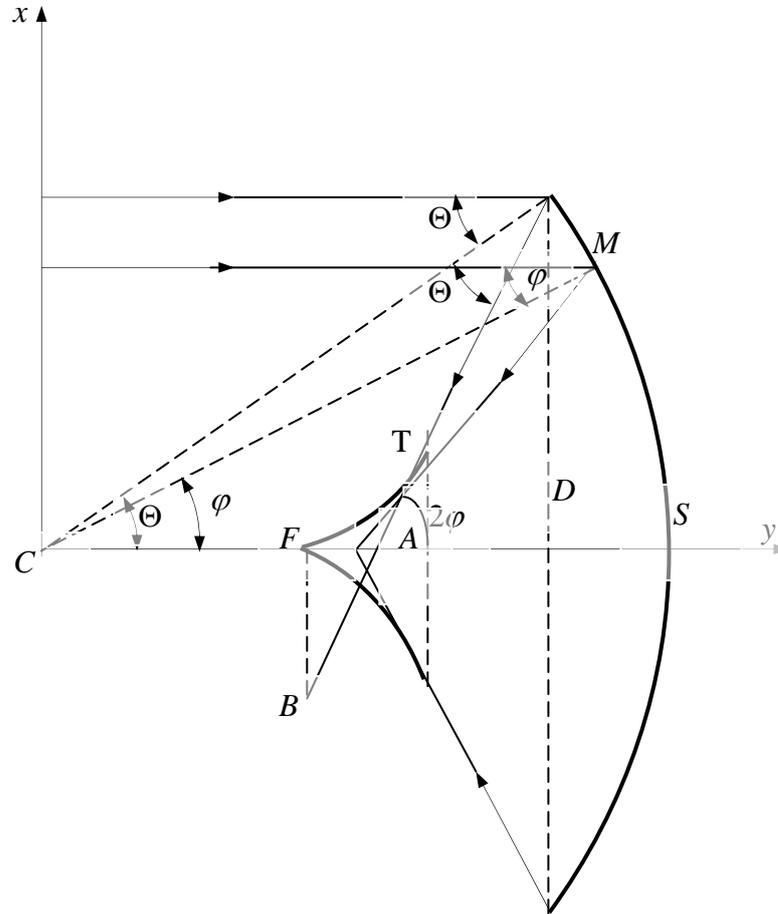


Fig.III.4 Caustique d'un miroir sphérique

III.3 Les aberrations d'ouverture

Lorsque l'ouverture d'un miroir sphérique est grande, l'image d'un point situé à l'infini sur l'axe du miroir ne peut être assimilée à un point.

Les rayons réfléchis sont tangents à une même surface de révolution puis recourent l'axe entre le foyer du miroir F et sont sommet S montré par la figure **III.2**.

La lumière s'accumule donc sur cette surface (appelée nappe tangentielle) et sur la portion de l'axe (nappe sagittale). L'ensemble des points constitue la caustique du miroir.

La coupe de faisceau réfléchi par un écran perpendiculaire à l'axe, on observe une tâche lumineuse dont l'éclairement n'est pas uniforme montré dans la figure III.3 Le rayon de cette tâche passe par un minimum, c'est le cercle de moindre diffusion.

On utilise deux grandeurs d'aberrations:

III.3.1 Aberration longitudinale principale δ_l

$$\delta_l \equiv FA = CA - CE$$

D'où :

$$\delta_l = \frac{R}{2} \left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right) \quad (\text{III} - 5)$$

La figure III.5 montre la variation de l'aberration longitudinale δ_l en fonction Θ

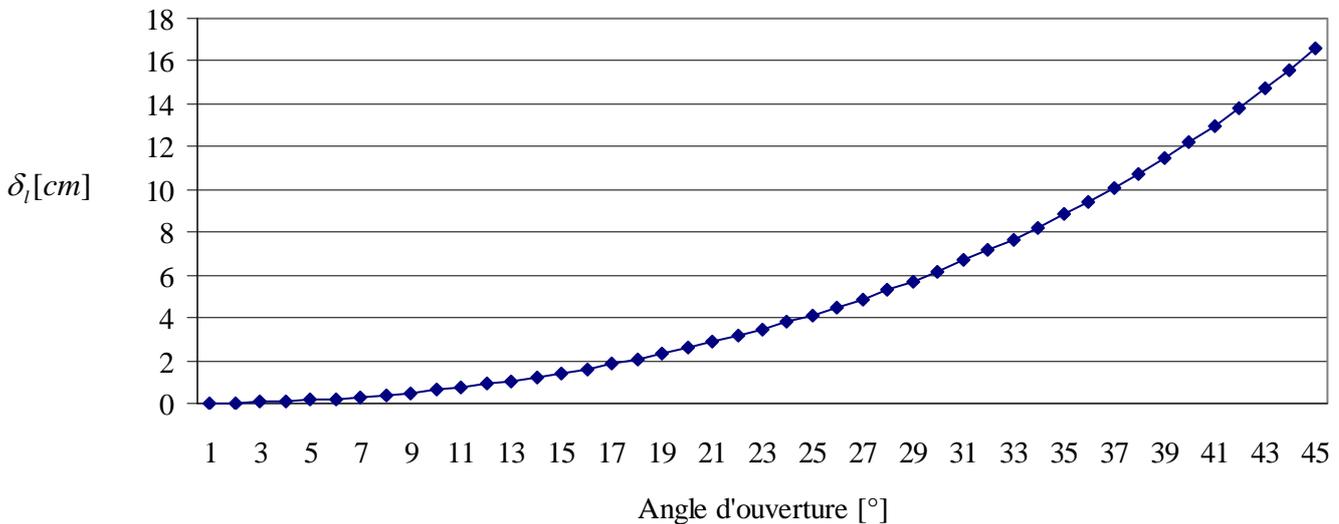


Fig.III.5 Variation de l'aberration longitudinale en fonction d'angle d'ouverture

Si l'ouverture est faible ($\varphi \ll 1$), on obtient :

$$\delta_l \approx \frac{R}{2} \frac{\varphi^2}{2} \approx \frac{x^2}{4R} \quad (\text{III} - 6)$$

Pour $\Theta = 60^\circ$, le rayon réfléchi coupe l'axe en S ($\delta_l = R/2$). Lorsque φ est supérieur à 60° , le rayon subit une seconde réflexion avant de couper l'axe ;

III.3.2 Aberration transversale principale δ_t

$$\begin{aligned}\delta_t &= FB = \delta_l \tan 2\varphi \\ \delta_t &= \frac{R}{2} \left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right) \tan 2\varphi\end{aligned}\quad (\text{III} - 7)$$

Pour un miroir de faible ouverture ($\varphi \ll 1$), on a :

$$\delta_t \approx \frac{R}{2} \varphi^3 = \frac{x^3}{2R^2} \quad (\text{III} - 8)$$

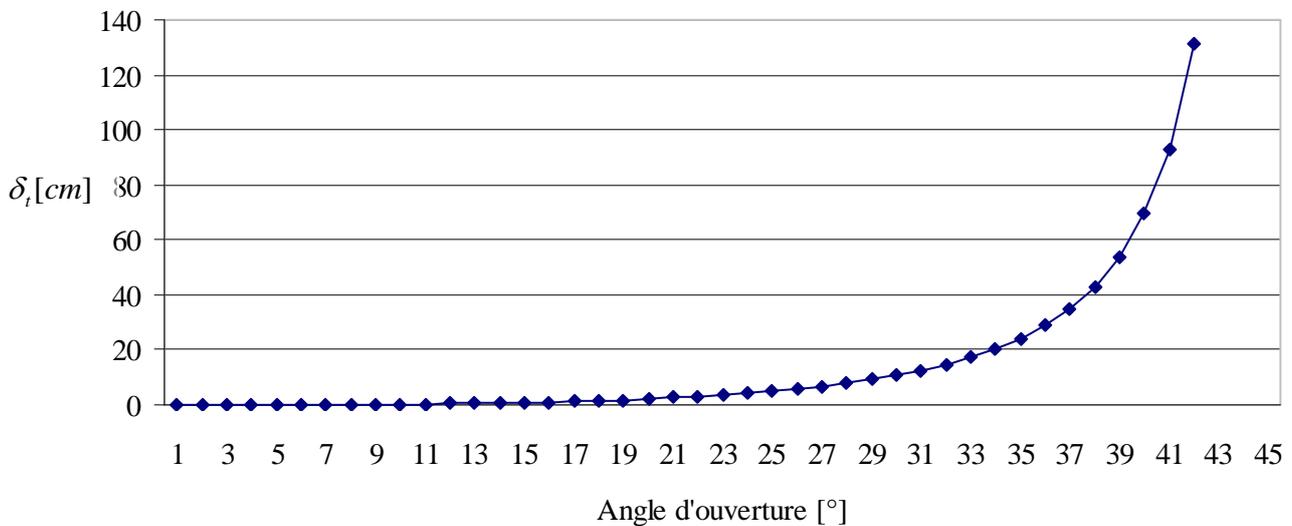


Fig.II.6 Variation de l'aberration transversale en fonction d'angle d'ouverture

L'aberration transversale croît donc plus vite avec l'ouverture que l'aberration longitudinale. Lorsque φ tend vers 45° ; l'aberration transversale tend vers l'infini : la tache lumineuse s'étale dans tous le plan focale.

Pour $\varphi \geq 45^\circ$, le rayon subit une seconde réflexion avant de couper le plan focal.

III.4 Etude et application sur l'optique de concentrateur

III.4.1 L'équation paramétrique de la caustique

L'équation paramétrique de la caustique en fonction du paramètre φ .

Les coordonnées de A :

$$\begin{aligned}X_A &= 0 \\ Y_A &= R/2 \cos \varphi\end{aligned}$$

Les coordonnées de M

$$X_M = R \sin \varphi$$

$$Y_M = R \cos \varphi$$

L'équation de la droite AM est donc :

$$\frac{X - X_M}{X_A - X_M} = \frac{Y - Y_M}{Y_A - Y_M}$$

Soit :

$$2Y \cos 2\varphi - X \cos 2\varphi - R \cos \varphi = 0. \quad (\text{III} - 9)$$

L'enveloppe de MA lorsque Θ varie peut être obtenue en recherchant les coordonnées X et Y du point d'intersection T entre $MA(\varphi)$ et $MA(\varphi + d\varphi)$. L'équation de cette dernière droite est :

$$2Y \cos 2\varphi + 2X \sin 2\varphi - R \cos \varphi = 0.$$

Il vient :

$$\begin{aligned} X &= R \sin^3 \varphi \\ Y &= \frac{R}{2} \cos \varphi (1 + 2 \sin^2 \varphi) \end{aligned} \quad (\text{III} - 10)$$

C'est l'équation de Néphroïde (**Fig.III.7**) Cette courbe est également engendrée par le roulement d'un cercle sans frottement d'un cercle de rayon $R/4$ sur un cercle de rayon $R/2$.

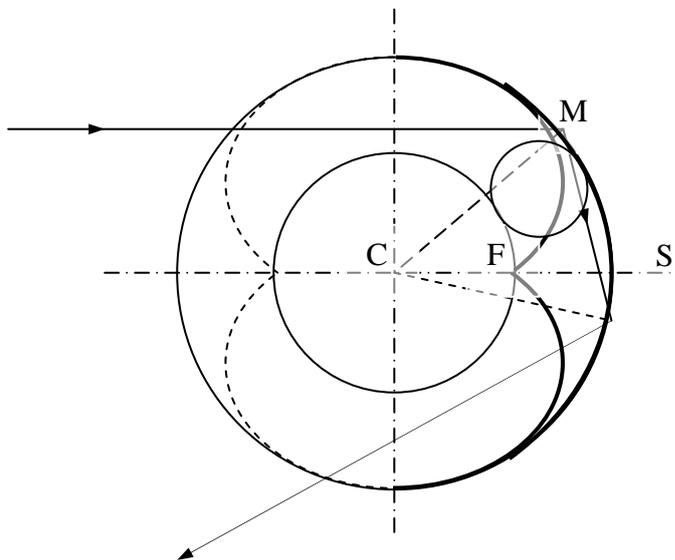


Fig.III.7 Néphroïde

III.4.2 Calcul le rayon de moindre diffusion

Nous avons un miroir d'angle d'ouverture de $\Theta = 30^\circ$, Le rayon du disque de moindre diffusion est égal à l'abscisse du point d'intersection de la caustique et du rayon $MA(\Theta)$.

Pour obtenir, il faut remplacer dans l'équation de cette droite les valeurs de X et de Y on trouve :

$$\frac{1}{2} \cos \varphi (1 + 2 \sin^2 \varphi) \sin 2\Theta - \sin^3 \varphi \cos 2\Theta - \sin 2\Theta = 0.$$

Cette équation est une racine double pour $\varphi = \Theta$ est en divisant par $(\sin \varphi - \sin \Theta)^2$ on obtient une équation du 4^o degré en $\sin \Theta$ dont il faut prendre la plus petite racine :

$$\sin^4 \Theta + 2 \sin^3 \varphi \sin \Theta + 3 \sin^2 \varphi \sin^2 \Theta + 2 \sin \varphi \sin \Theta + \sin^2 \Theta = 0. \quad (\text{III} - 11)$$

Pour $\Theta = 30^\circ$, cette équation s'écrit :

$$\sin^4 \varphi + 3 \sin^3 \varphi + \frac{3}{4} \sin^2 \varphi + \sin \varphi + \frac{1}{4} = 0. \quad (\text{III} - 12)$$

Cette équation a une racine évidente :

$$\sin \varphi = -1. \quad (\text{III} - 13)$$

En éliminant, on obtient

$$4 \sin^3 \varphi + 3 \sin \varphi + 1 = 0, \quad (\text{III} - 14)$$

Equation dont la solution réelle est :

$$\sin \varphi = -0,2985$$

D'où :

$$\frac{x}{R} = |\sin^3 \varphi|^3 = 2,66.10^{-2}$$

$\varphi = -17,37^\circ$. Le rayon du disque de moindre diffusion est :

$R|\sin^3 \varphi|$: Le rayon d'ouverture du miroir étant $R \sin \Theta$, le facteur moyen de concentration (car l'image n'est pas uniformément éclairé), égal au rapport des aires respectives, est

$$C_g = \frac{\sin^2 \Theta}{\sin^6 \varphi}. \text{ Pour } \Theta = 30^\circ, C_g = \frac{1}{4(0,2985)^6} = 353$$

Ce résultat n'est qu'approché car on n'a pas tenu compte du diamètre apparent ε du soleil qui produit un élargissement de la caustique.

Si $R = 80$ cm, le miroir à un diamètre d'ouverture de 90 cm, la surface du disque de moindre diffusion est $\pi R^2 \sin^6 \varphi = 0,0014m^2 = 14cm^2$.

L'aberration longitudinale de sphéricité vaut :

$$\delta_i = \frac{0,8}{2} \left(\frac{1}{\frac{\sqrt{3}}{2}} - 1 \right) = 6,18 \text{ cm}$$

L'aberration transversale est $\delta_i = 6,18 \text{ tg } 60^\circ = 10,70 \text{ cm}$. ces aberrations deviennent vite très faibles si Θ est assez petit

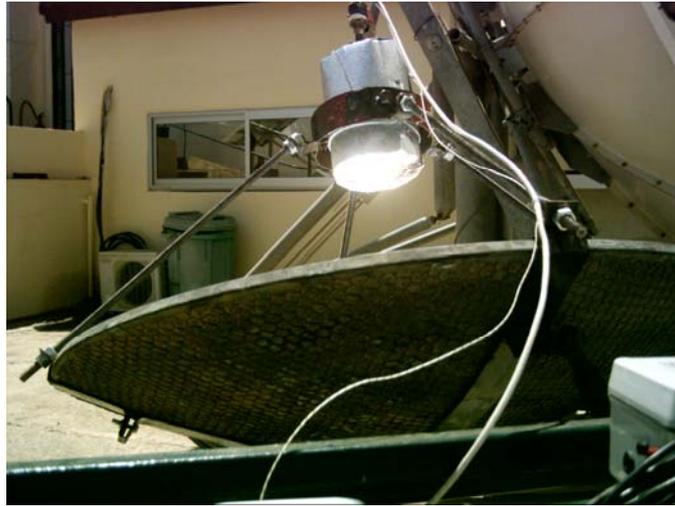


Fig.III.8 Le disque de moindre diffusion

Le graphe de la figure **III.8** d'après la formule (III - 2), la variation de C_g en fonction de l'angle Θ pour $\varepsilon = 0,01$ radians. (Pas défaut au niveau de la surface de miroir). Ces résultats mettent en évidence l'existence de valeur optimale de l'angle Θ , égale à environ de 22° ($C_g = 3000$) [16,17, 29].

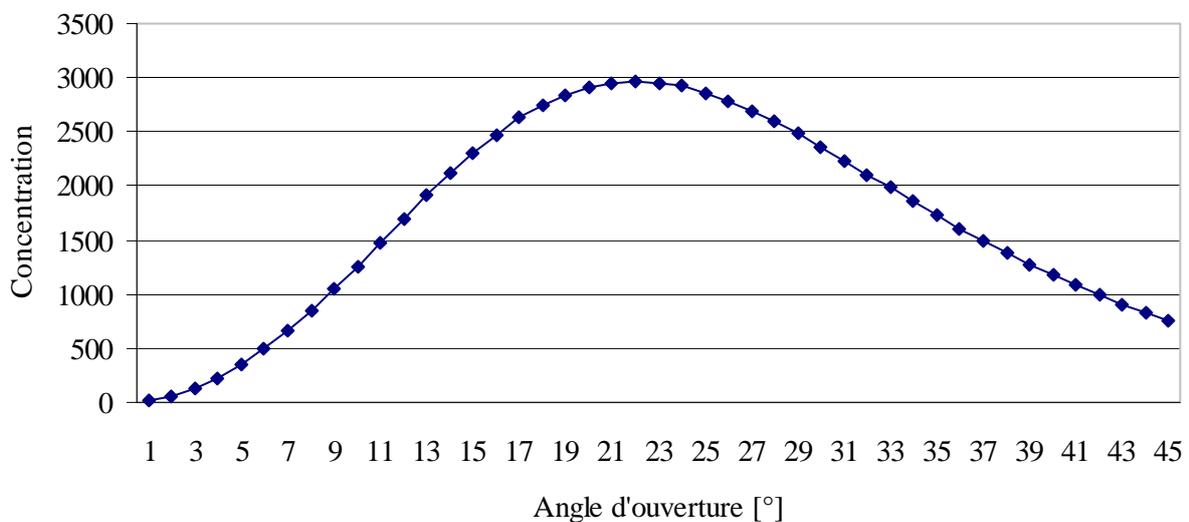


Fig.III.10 Variation de la concentration géométrique en fonction de l'angle d'ouverture

III.4.3 Comparaison entre concentrateur sphérique et parabolique

Dans la figure III.11 la différence entre le capteur paranoïde et le capteur sphérique, le dernier est facile à le réalise par rapport au paraboloïde qui besoin de plus de technique pur rendre plus parfait, le moindre défaut affect sur la performance du capteur.

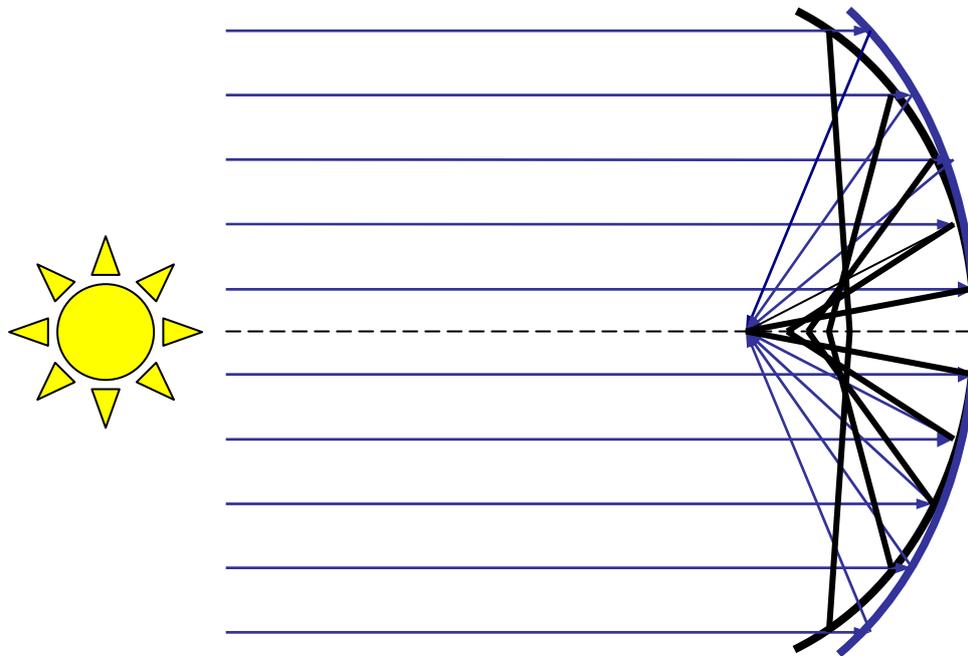


Fig.III.11 Comparaison entre concentration sphérique et concentration parabolique
- en Noire Sphérique, - en Bleu paraboloïde

La concentration du capteur paraboloïde est très supérieur a la concentration sphérique, la concentration d'un paraboloïde augment avec l'angle d'ouverture du capteur, par contre le capteur sphérique est plus performant dans l'angle d'ouverture de 22° où la concentration est maximale [17, 29].

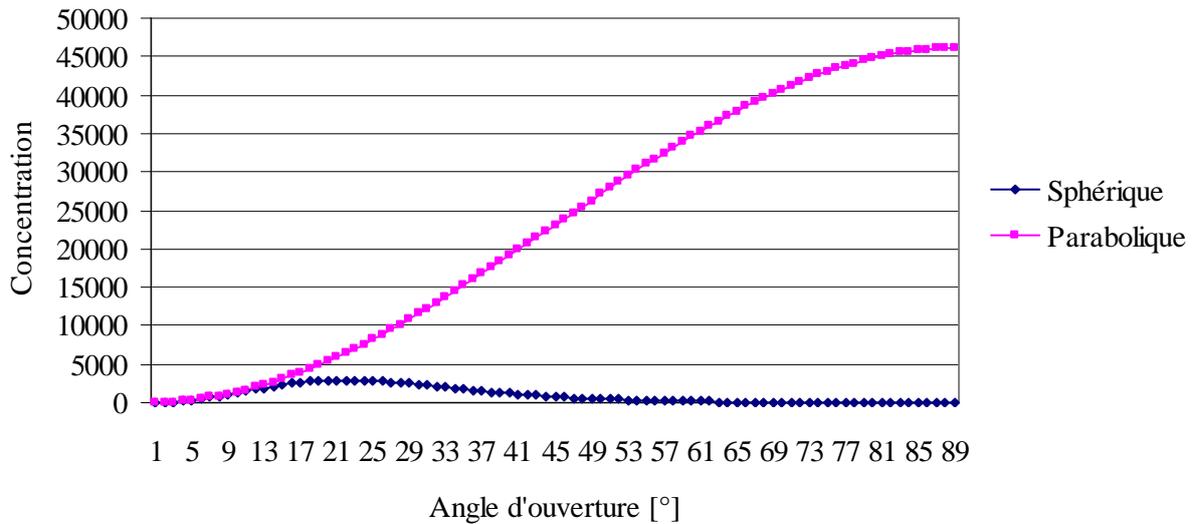


Fig.III.12 Le concentrateur sphérique comporte comme un concentrateur parabolique a fiable l'angle d'ouverture.

La figure III.11 montre l'étude du rapport (C_p/C_s), C_p concentration géométrique d'un miroir parabolique s'ouverture 30° , sur C_s concentration du miroir sphérique, en fonction d'angle d'ouverture Θ . Pour des valeurs importantes de cet angle. Le miroir sphérique lui préférable du fait de sa grande simplicité de réalisation. Le transfert thermique au fluide caloporteur est par ailleurs facilité par une répartition énergétique plus uniforme au niveau de surface d'échange [17].

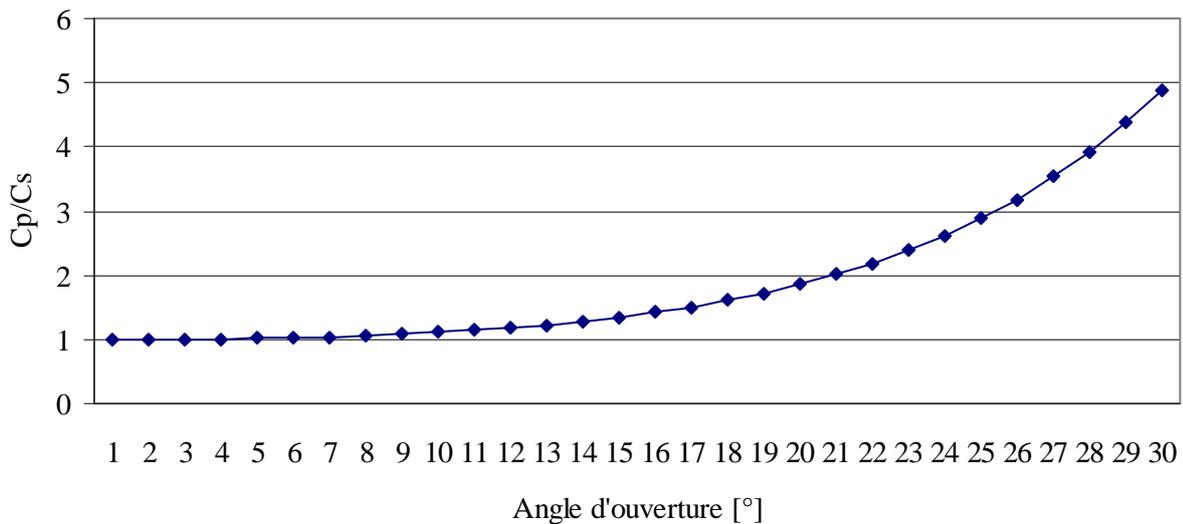


Fig. III.13 Variation du rapport de concentration entre concentrateur sphérique et parabolique

La concentration pour un capteur parabolique est plus élevée que pour un concentrateur sphérique dans les angles d'ouverture dépasse 20° .

Cependant la fabrication d'un concentrateur parabolique demande des moyens plus coûteux que le concentrateur sphérique.

III.5 Conclusion

Pour un miroir sphérique, la surface enveloppe, appelée caustique, de tout les rayons lumineux réfléchis a une section droite circulaire ; la petite de ces droites interceptant tous les rayons lumineux réfléchis. Le cercle de moindre diffusion [8, 13]. Les calculs de sa position et de rayon sont nécessaires à la détermination de la concentration géométrique maximale d'un capteur solaire sphérique. Dont l'entrée d'un absorbeur d'énergie serait confondue avec le cercle de moindre diffusion.

IV.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. Ce sont les pertes optiques. Une autre part de l'énergie thermique produite par l'absorption des photons incidents est perdue par transfert vers l'environnement du 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 sphérique, où nous avons établi un bilan thermique respectivement sur le fluide dans l'absorbeur et nous avons résolu le système d'équations obtenues par la méthode de différences finies (schémas implicite).

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

Ainsi que, on examine la distribution de la température du fluide dans le récepteur, l'effet de la vitesse du vent, le débit massique du fluide caloporteur,

IV.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). Ses principales qualités seront donc [13] :

- 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 D_{abs} ,
- Une inertie thermique,
- Une bonne résistance chimique vis-à-vis du fluide qui le baigne.

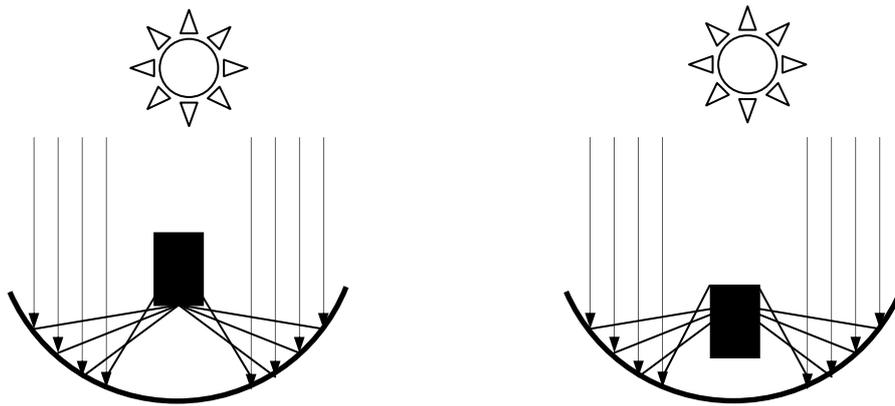
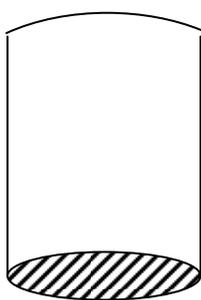
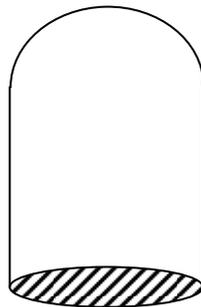


Fig.IV. 1 - à droite surface externe,
- à gauche surface cavité.

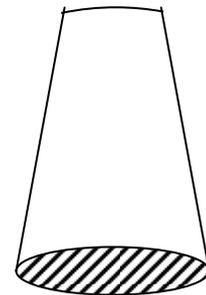
La forme géométrique de l'absorbeur montré dans la figure **IV. 2** exige le choix du bilan thermique adapté qui nous avons suivit.



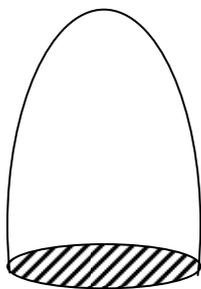
Cylindrique



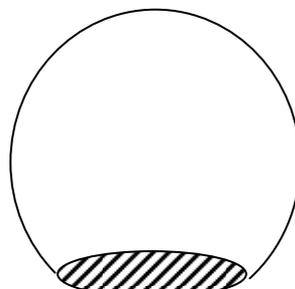
Dôme



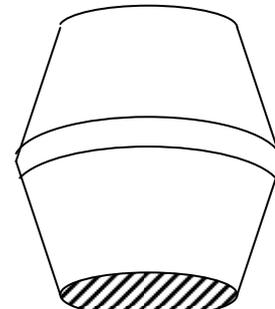
Conique



Ecliptique



Sphérique



Hétéro conique

Fig.IV. 2 Différents types d'absorbeur [18]

IV.3 Surface sélective

La surface absorbante son rôle est transformer le rayonnement de courte longueur d'onde en chaleur. La part du rayonnement solaire incident qui absorbée par le capteur est appelée facteur d'absorption solaire α_{abs} de la surface. Le facteur complémentaire à 1 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. L'absorbeur, en chauffant.

On appelle sélectivité le rapport du facteur d'absorption solaire α_{abs} sur le facteur d'émission infrarouge ε_{abs} [1, 19].

IV.4 L'équation d'équilibre thermique

Pour réaliser un bilan énergétique sur un absorbeur solaire sous forme cylindrique, pour cela 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 forme [20] :

$$\dot{Q}_{util} = (m_{abs}c_{abs} + m_f c_f) \frac{dT_{abs}}{dt} \quad (IV - 1)$$

\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 le rapport d'énergie thermique laissant l'absorbeur, en généralement décrit le rapport d'énergie étant ajoutée à un fluide par un transfert thermique passant par le récepteur ou le convertisseur [21], c'est-à-dire :

Avec:

$$\dot{Q}_{util} = \dot{Q}_{abs} - \dot{Q}_{pert} \quad (IV - 2)$$

\dot{Q}_{abs} : L'énergie optique qui atteint la surface plane de l'absorbeur, est donnée par [22] :

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

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

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

Le rendement optique [23] :

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

Γ : Rapport de captation (fraction de l'énergie reflétée par le réflecteur) [4]

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

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

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

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

IV.5 Pertes thermiques

Une fois que les rayons solaires ont fait leurs chemins vers le récepteur au-dessus de la température ambiante, ce qui produit un processus des pertes de chaleur à partir du récepteur. Ces modes des pertes sont la convection, le rayonnement et la conduction, qui sont dépendants de la différence dans la température entre le récepteur et l'environnement et de la géométrie du récepteur et celle du concentrateur. La formule est donnée sous la forme suivante [24, 25] :

$$\dot{Q}_{pert} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{ray} \quad (IV - 7)$$

IV.5.1 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.

$$\dot{Q}_{cond} = \lambda_{abs} A_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) \Delta z \quad (IV - 8)$$

A_{abs} : Surface de l'absorbeur

Δz : Epaisseur de l'absorbeur

T_{abs} : Température de l'absorbeur

T_{amb} : Température ambiante

IV.5.2 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 [26] donnée par la formule :

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} A_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (IV - 9)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donné par la formule suivante [27] :

$$h_{conv} = \frac{Nu \lambda_{air}}{d} \quad (IV - 10)$$

d : Diamètre du récepteur.

λ_{air} : Conductivité thermique de l'air

Le nombre de Nusselt Nu est donné par :

$$Nu = 0,664(Re)^{1/2} (Pr)^{1/3} \quad (IV - 11)$$

Le calcul du nombre de Reynolds Re par la formule :

$$Re = \frac{Vd}{\nu_{air}} \quad (IV - 12)$$

V : Vitesse du vent

ν_{air} : Viscosité cinématique de l'air

IV.5.3 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 schéma 5,2 illustre cette transition pour une surface verticale noire en air immobile. Le taux de perte de chaleur de rayonnement est proportionnel à l'émissivité de la surface et à la différence dans la température à la puissance quatre. L'équation décrite sous la forme, nous avons [25]:

$$\dot{Q}_{ray} = \varepsilon_{abs} \sigma A_{abs} (T_{abs}^4 - T_{ciel}^4) \quad (IV - 13)$$

Où :

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 l'humidité relative est haute où 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 [13], donné par la formule de Whillier (1967) :

$$T_{ciel} = T_{amb} - 6 \quad (IV - 14)$$

Et par la formule de Swinbank (1963) :

$$T_{ciel} = 0,0552T_{amb}^{1,5} \quad (IV - 15)$$

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 (IV - 12) par la forme suivante [28] :

$$\dot{Q}_{ray} = A_{abs} h_{ray} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (IV - 16)$$

$$h_{ray} = \varepsilon_{abs} \sigma \frac{T_{abs}^4 - T_{ciel}^4}{T_{abs} - T_{amb}} \quad (IV - 17)$$

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

IV.6 Expression de la température de l'absorbeur

On calcul la température de la surface captive de l'absorbeur à partir de l'équation (IV - 1) après les calculs précédents, l'équation devient [29].

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

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

$$\dot{Q}_{util} = \eta_{opt} I_{DN} A_{abs} - U_{glob} (T_{abs} - T_{amb}) A_{ref} \quad (IV - 17)$$

Où U_{glob} est le coefficient global des pertes de chaleur données par :

$$U_{glob} = h_{conv} + h_{ray} + h_{cond} \quad (IV - 18)$$

On remplace :

$$P_{opt} = \eta_{opt} I_{DN} C_g \quad (IV - 19)$$

Ainsi :

$$mc = m_{abs} c_{abs} + m_f c_f \quad (IV - 20)$$

L'équation devient :

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

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 :

$$T_{abs}(t) = T_{amb} + \frac{P_{opt}}{U_{glob}} - \left(\frac{P_{opt}}{U_{glob}} - T(t_0) + T_{amb} \right) \exp \left[-\frac{U_{glob} A_{abs}}{mc} (t - t_0) \right] \quad (\text{IV} - 21)$$

IV.7 Efficacité du concentrateur

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 [30, 31].

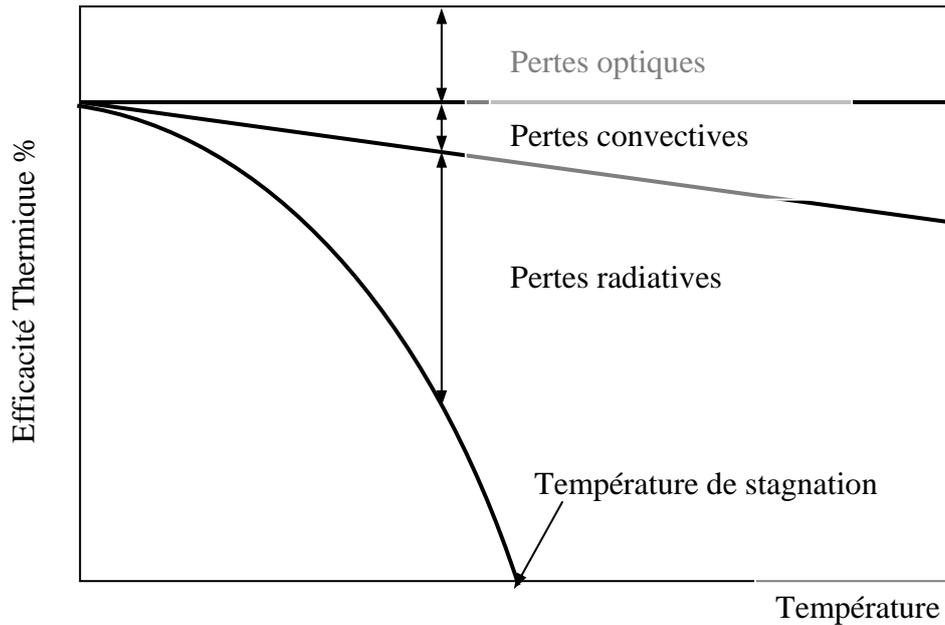
$$\eta = \frac{\dot{Q}_{util}}{I_{DN} A_{ref}} \quad (\text{IV} - 22)$$

$$\eta = \frac{\eta_{opt} I_{DN} A_{ref} - A_{abs} U_{glob} (T_{abs} - T_{amb})}{I_{DN} A_{ref}} \quad (\text{IV} - 23)$$

$$\eta = \eta_{opt} - \frac{A_{abs} U_{glob} (T_{abs} - T_{amb})}{I_{DN} A_{ref}} \quad (\text{IV} - 24)$$

Ou bien :

$$\eta = \eta_{opt} - \frac{U_{glob} (T_{abs} - T_{amb})}{C_g I_{DN}} \quad (\text{IV} - 25)$$



**Fig.IV. 3 Évaluation des pertes d'un capteur (concentrateur)
En fonction de la température [1].**

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

IV.8 Distribution de la température au niveau de l'absorbeur

On suppose que l'absorbeur a une forme cylindrique, la température ne dépend que de l'axe z (la variation radiale et azimutale sont négligeable devant la variation axiale), le transfert de chaleur se fait uniquement par conduction. La variation de la température en fonction du temps est l'axe Oz (Unidirectionnel, voir la figure IV.4)

L'équation de transfert de chaleur par conduction est donnée par la formule suivante :

$$\rho_f c_f \frac{\partial T_{abs}(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_f \frac{\partial T_{abs}(z,t)}{\partial z} \right) \quad (\text{IV} - 26)$$

Le cylindre illustré à la figure IV.4, initialement isotherme de température T_0 (température de l'eau).

Au temps $t = 0$, on impose la température T_{amb} sur la surface captatrice, ou l'absence de rayonnement concentré au niveau de cette surface, on a la condition initial $T(z,t=0) = T_0$ ainsi

que au condition au $T(0, t) = T_{\text{abs}}$, $\lambda_f = \lambda_f(T)$, $\rho_f = \rho_f(T)$ et $c_p = c_p(T)$ en fonction de la température du fluide (eau).

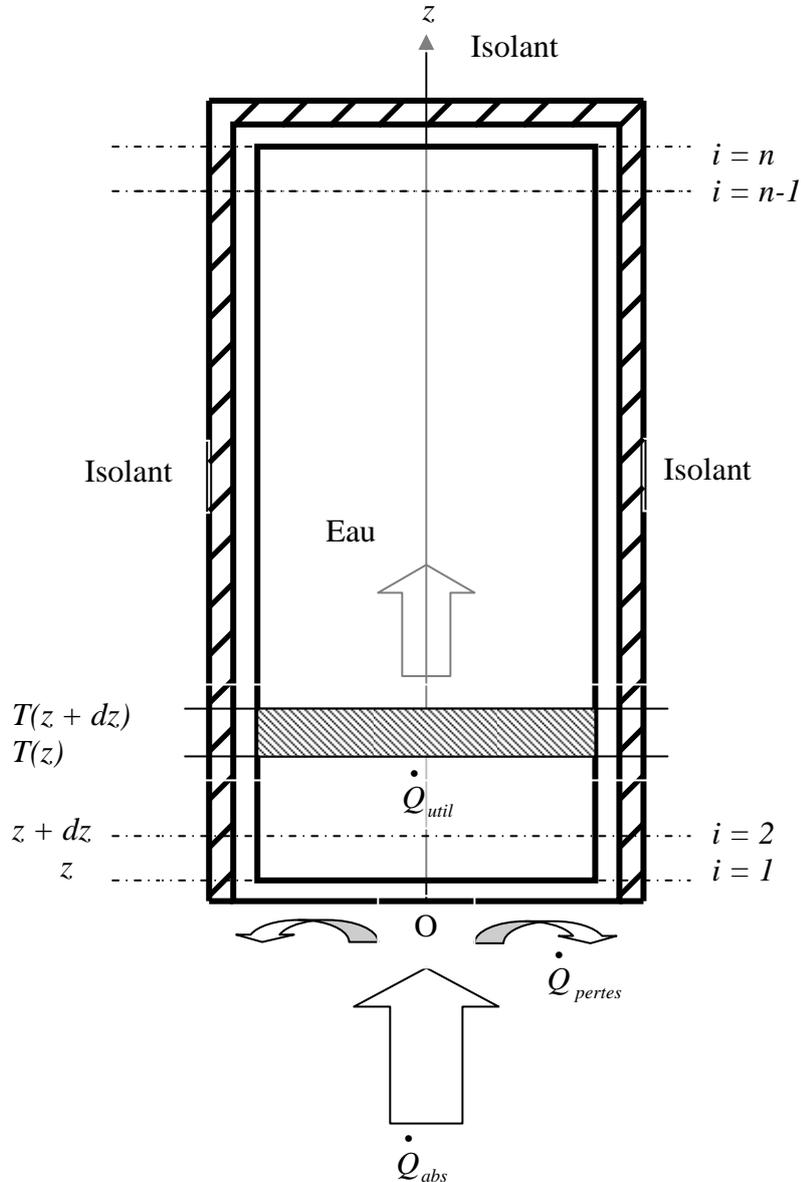


Fig. IV.4 Schéma illustratif d'un absorbeur cylindrique fermé

La figure IV.1 présente un absorbeur, ayant ses faces arrière et latérales parfaitement isolées, exposé au rayonnement solaire concentré

IV.9 Résolution du système d'équation

IV.9.1 Schéma implicite

Nous utilisons un schéma arrière d'ordre 1 pour évaluer la dérivée temporelle et un schéma centré d'ordre 2 pour la dérivée seconde en espace :

$$\frac{\partial T_{abs}}{\partial t} = \frac{T_{abs,i}^{t+\Delta t} - T_{abs,i}^t}{\Delta t} \quad (\text{IV} - 27)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{abs,i+1}^{t+\Delta t} - 2T_{abs,i}^{t+\Delta t} + T_{abs,i-1}^{t+\Delta t}}{\Delta z^2} \quad (\text{IV} - 28)$$

On remplaçant :

$$\beta = \frac{\alpha_f \Delta t}{\Delta z^2} \quad (\text{IV} - 29)$$

Où : $\alpha_f = \frac{\lambda_f}{\rho_f c_f}$ est la diffusivité thermique

La température à l'itération $n + 1$ est donnée par :

$$T_{abs,i}^{t+\Delta t} - T_{abs,i}^t = \beta \left(T_{abs,i+1}^{t+\Delta t} + T_{abs,i-1}^{t+\Delta t} - 2T_{abs,i}^{t+\Delta t} \right) \quad (\text{IV} - 30)$$

$$(1 + 2\beta) T_{abs,i}^{t+\Delta t} - \beta \left(T_{abs,i+1}^{t+\Delta t} + T_{abs,i-1}^{t+\Delta t} \right) = T_{abs,i}^t \quad (\text{IV} - 31)$$

i variant de 1 à N-1

On constate que les inconnues à l'itération $n + 1$ sont reliées entre elles par une relation implicite (d'où le nom de la méthode). Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} 1+2\beta & -\beta & 0 & \dots & 0 \\ -\beta & 1+2\beta & -\beta & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & -\beta & 1+2\beta & -\beta \\ 0 & 0 & 0 & -\beta & 1+2\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_{n-2} \\ T_{n-1} \end{bmatrix}^{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_{n-2} \\ T_{n-1} \end{bmatrix}^t + \beta \begin{bmatrix} T_{int} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ T_{out} \end{bmatrix}^{t+\Delta t} \quad (\text{IV} - 32)$$

A chaque itération, le vecteur des inconnues discrètes se détermine par résolution d'un système linéaire. La matrice du système étant tridiagonales, un algorithme de Thomas (basé sur la méthode du pivot de Gauss) est très souvent utilisé.

IV.10 Température de stagnation

La stagnation est l'état d'un capteur ou d'un système sans circulation du fluide caloporteur. La température de stagnation se reproduit généralement à la température du fluide caloporteur sans circulation où les pertes thermiques sont égales au flux du rayonnement solaire incident donnée par la formule [28] :

$$\dot{Q}_{util} = \dot{Q}_{opt} - \dot{Q}_{pert} \quad (IV - 33)$$

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 $\dot{Q}_{abs} = \dot{Q}_{pert}$.

Où :

$$\eta_{opt} I_{DN} A_{abs} = U_{glob} (T_{abs} - T_{amb}) A_{ref} \quad (IV - 34)$$

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} [28] :

$$T_{stag} = T_{amb} + \frac{\eta_{opt} I_{DN}}{U_{glob} C_g} \quad (IV - 35)$$

IV.11 La différence de température au niveau de l'absorbeur d'un fluide en Circulation

La chaleur utile \dot{Q}_{util} est fonction du débit massique \dot{m} , et la chaleur spécifique C_p à une pression constante, et la température d'entrée T_E de fluide et la température de sortie T_S de même fluide par la relation suivante [3] :

$$\dot{Q}_{util} = \dot{m} C_p (T_S - T_E) = \Gamma \rho_{ref} \tau_{abs} \alpha_{abs} I_{DN} A_a - A_{abs} \left[(h_{cond} + h_{conv}) (T_{abs} - T_{amb}) + \varepsilon_{abs} \sigma (T_{abs}^2 - T_{amb}^2) \right]$$

$$\dot{Q}_{util} = \dot{m} C_p (T_s - T_e) = \dot{m} C_p \Delta T \quad (\text{IV} - 36)$$

La figure IV.5 illustre le prototype de l'absorbeur contenant un serpentin en cuivre circule l'eau à l'intérieur de ce dernier.

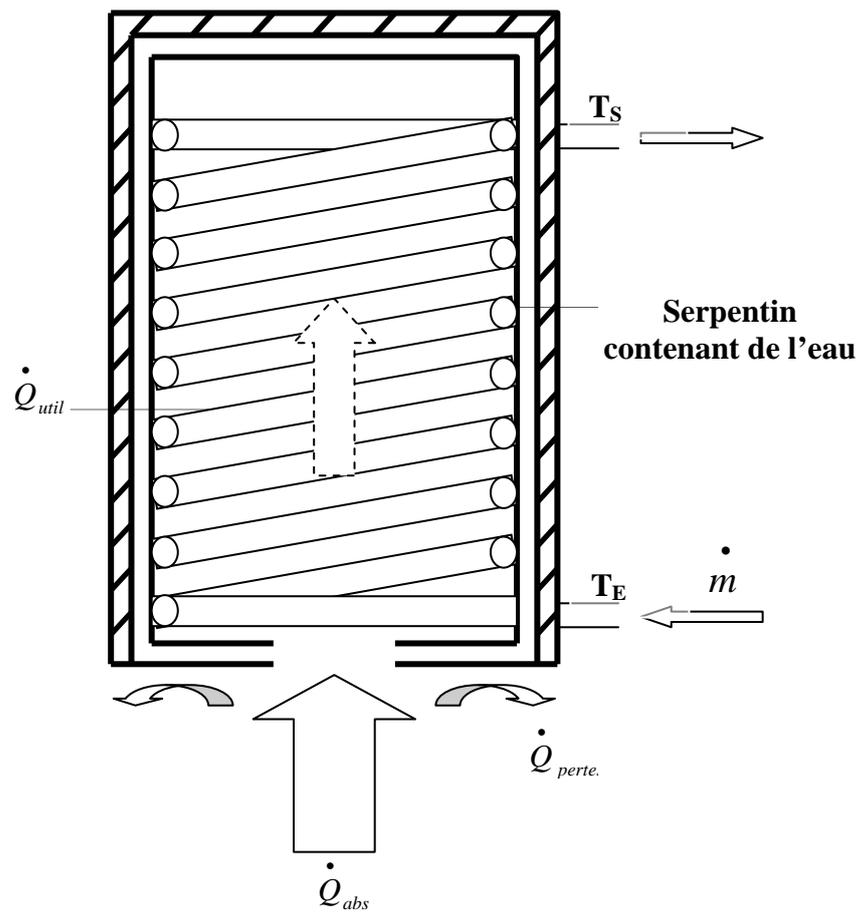


Fig. IV.5 Schéma illustratif d'un absorbeur cylindrique contenant un serpentin

IV.12 Conclusion

Le développement théorique d'un modèle nous permet de calculer la température au niveau de la surface captatrice, la répartition de la température au niveau de l'absorbeur selon l'axe z. Le rendement du concentrateur, ainsi que le flux solaire direct qui reçoit par l'absorbeur.

L'augmentation du rendement à une température donnée peut alors être obtenu, soit par action sur la conception du capteur par augmentation du facteur de concentration, soit par action sur les propriétés optiques des matériaux composant la couverture et la surface de l'absorbeur de façon à conserver ou augmenter l'absorption de l'énergie solaire incidente et simultanément diminuer ses pertes radiatives à la température de fonctionnement.

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous représenterons les différentes étapes de réalisation du concentrateur sphérique conçu conformément au modèle théorique étudié au chapitre précédent. Notre expérience a été réalisée au niveau du centre de développement des énergies renouvelables C.D.E.R à Bouzareah à Alger.

Dans la deuxième partie de ce travail on montre quelques résultats au niveau de l'absorbeur. Les différents phénomènes physiques susceptibles afin d'interpréter d'une façon assez bonne.

A cause de divers phénomènes interagissent dans l'expérience. Nous avons suivi un bilan thermique contribué par des plusieurs travaux et publications [1, 3, 19, 27]

Nous avons mis au point un programme de simulation qui permet d'estimer les différentes puissances incidentes sur le capteur en n'importe quel lieu de la terre et d'optimiser cette énergie. Les résultats de simulation pour des différents paramètres à été interpréter.

V.2 Description générale du montage réalisé

Nous avons un montage en acier qui consiste en un mouvement à deux axes perpendiculaires, un montage altazimutale et un montage équatorial. Dans le premier type de montage, le miroir tourne autour d'un axe horizontal porté par une monture qui elle-même, tourne autour d'un axe vertical. La rotation autour de l'axe horizontal assure la poursuite en hauteur alors que l'autre rotation assure en azimut. Cette disposition très simple a été réalisé manuellement (la poursuite automatique est complexe et coûteuse).

Le concentrateur est composé de deux éléments essentiels :

1. un réflecteur
2. un absorbeur

Le miroir est une calotte sphérique recouverte d'argent, soutenu par un gabarit en bronze (le réflecteur).

Nous avons deux cylindres en acier, le premier fermé contenant de l'eau pénétré d'une tige de même longueur supportant 04 thermocouples de type J enveloppé par une laine de verre d'épaisseur deux (02) cm et elle-même recouverte par une matière réfléchissante excepté à la base (face captant le rayonnement concentré).

Le deuxième cylindre possède une ouverture à la base contenant un serpentin en cuivre à ses extrémités se trouvent deux thermocouples.

Les thermocouples des deux cylindres sont reliés au système d'acquisition de données.

Le montage du concentrateur est illustré par la figure **V.1**.

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 (cas d'un ciel couvert, de grêle, de vent fort, présence d'aérosol ou de pollution), des dégâts peuvent survenir pour empêcher ou minimiser le fonctionnement optimal du concentrateur.

V.3 Conception du concentrateur

La conception du concentrateur réalisé pour le besoin de l'expérience se présente selon le schéma illustré par les figures (V.1, V.2, V.3, V.4) suivantes :

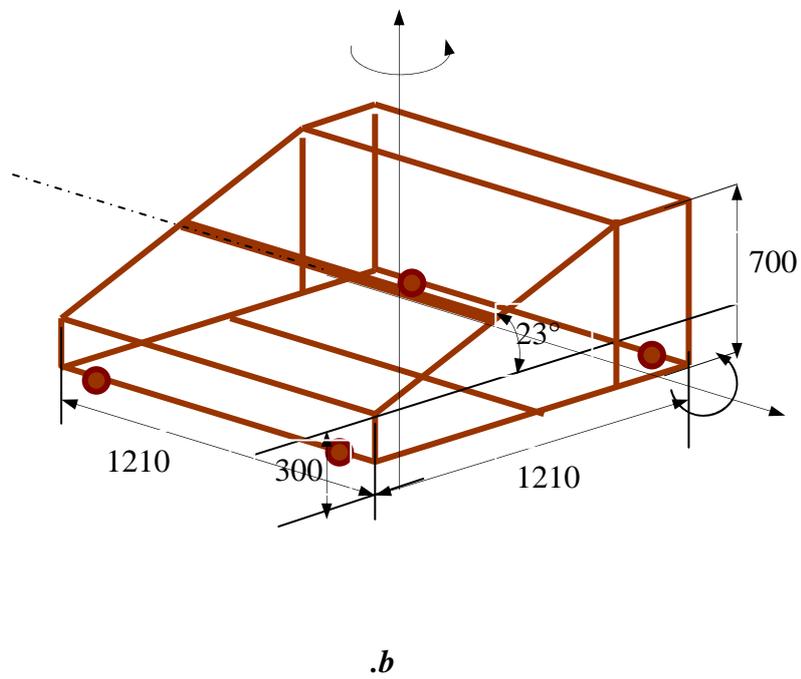
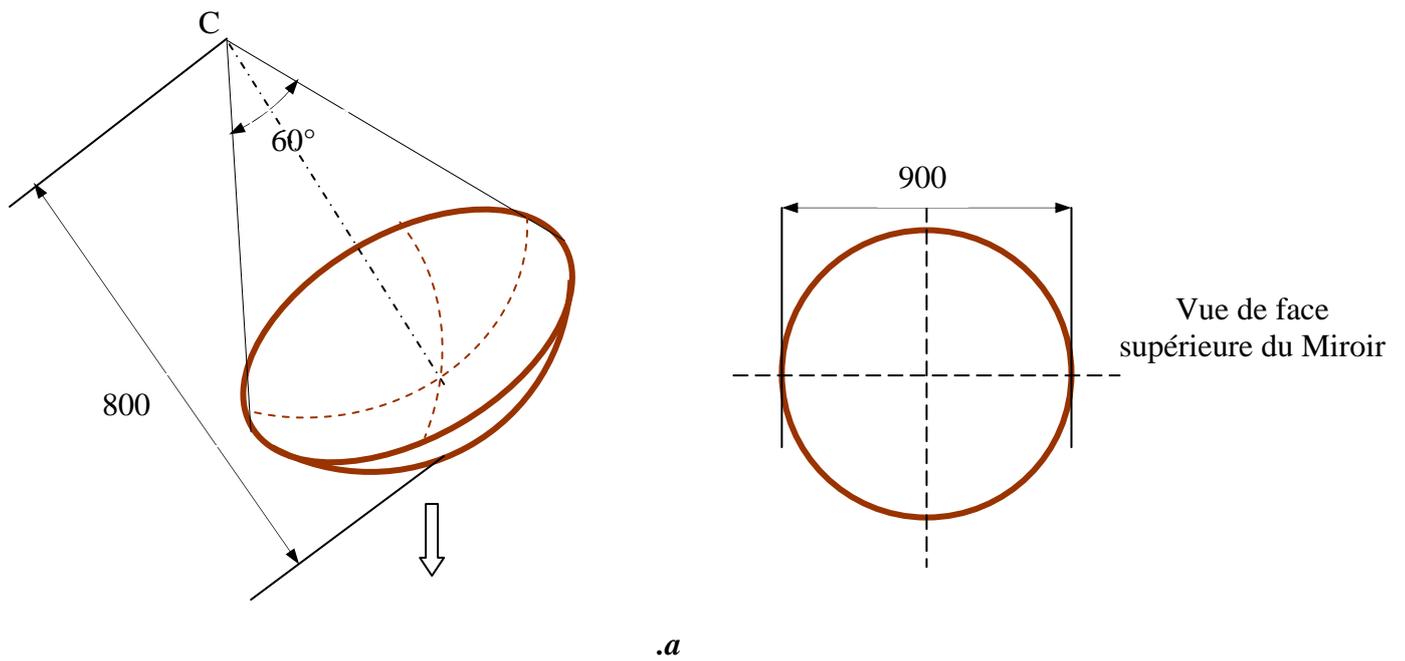


Fig.V.1 *a*. Miroir sphérique, *b*. Support métallique en Acier

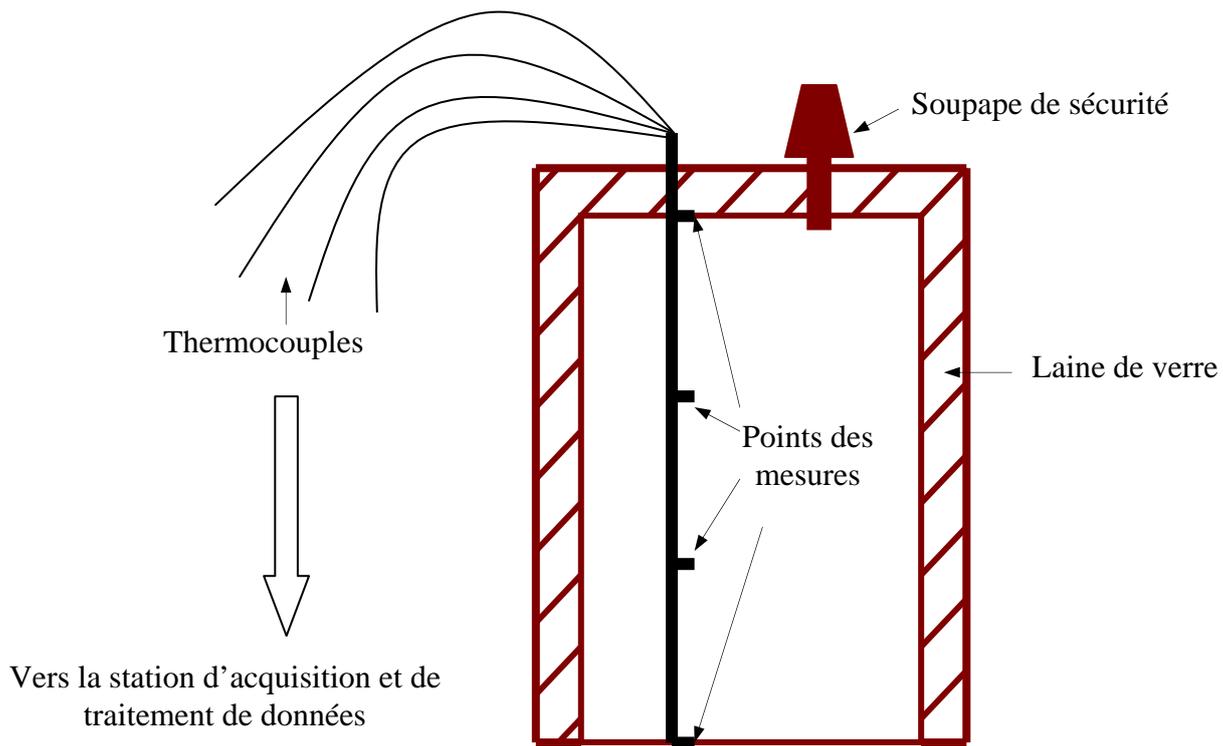


Fig.V.2 Absorbeur cylindrique fermé

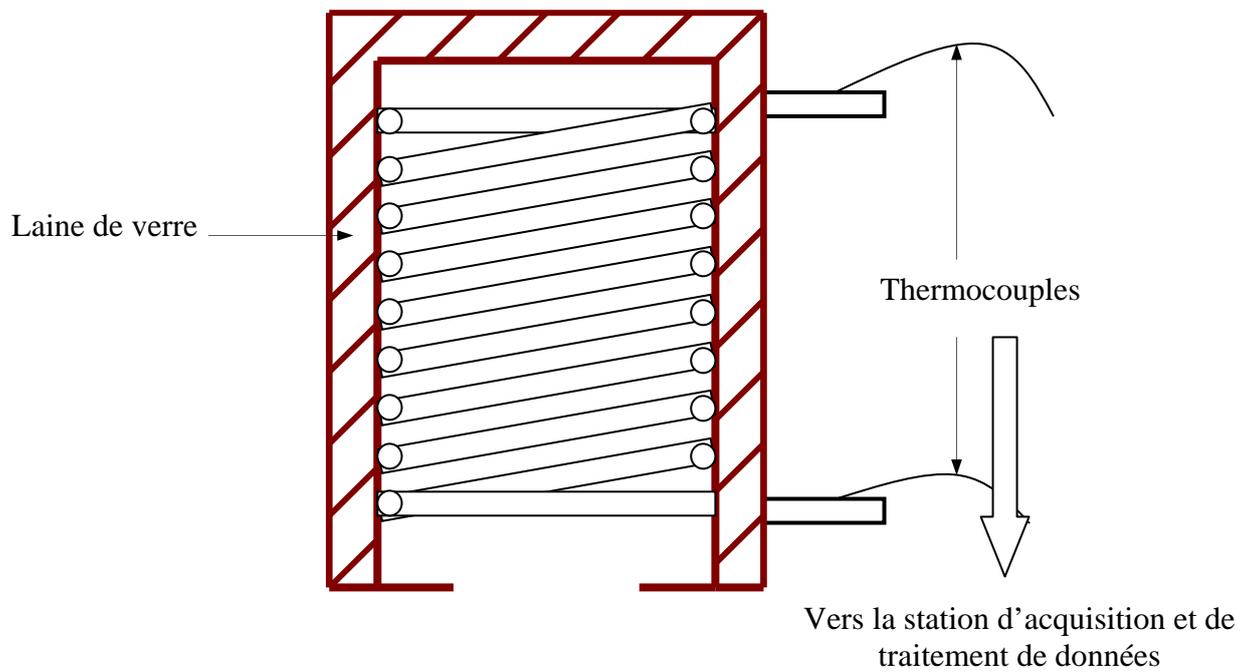


Fig.V.3 Absorbeur ouvert à sa base contenant un serpentin.

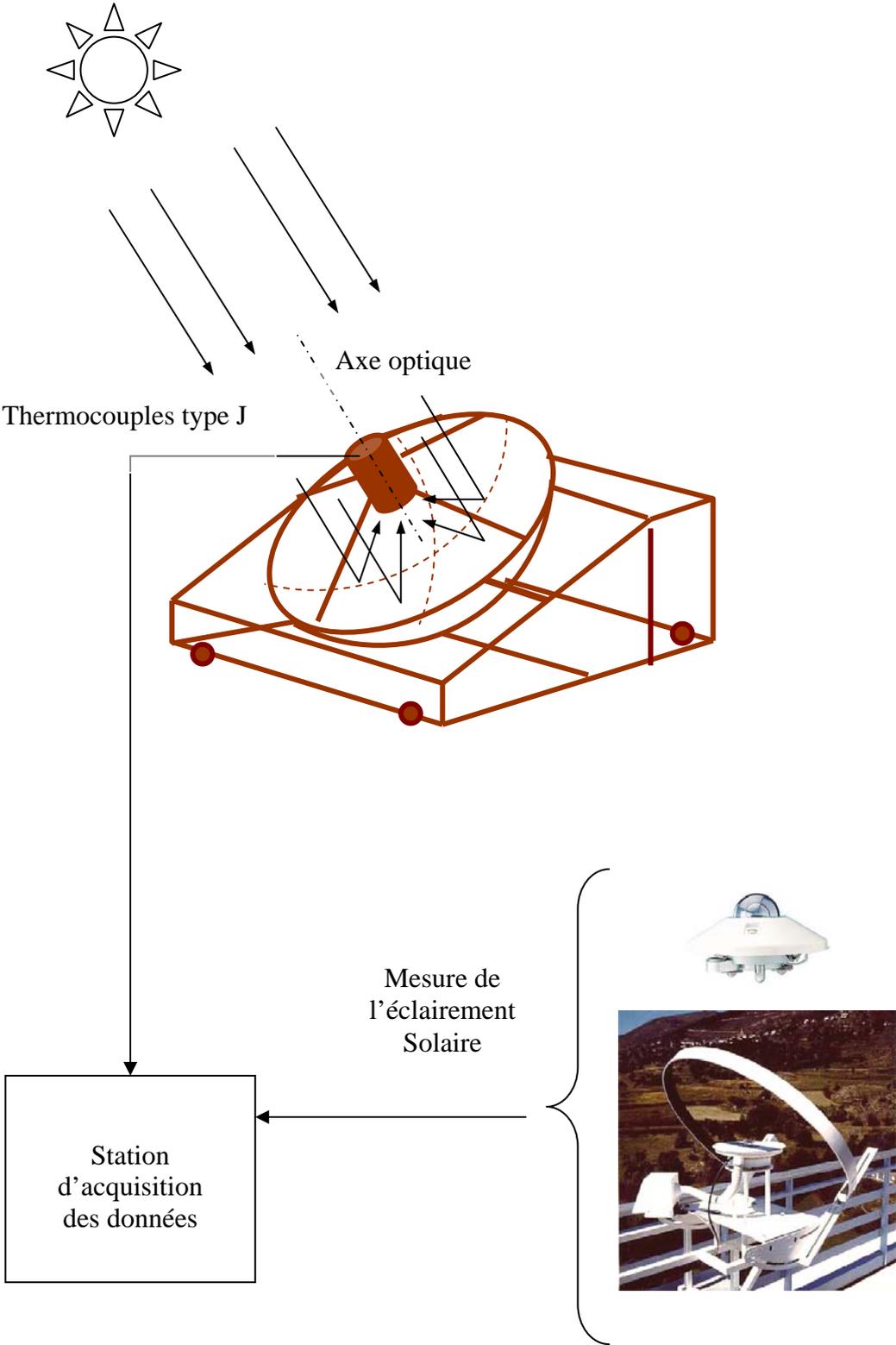


Fig.V.4 Installation du concentrateur

La figure V.5 illustre l'acquisition des données mesurées par les thermocouples.



Fig.V.5 Station d'acquisition des données

La figure V.6 montre l'exposition du prototype face au soleil.



Fig.V.6 Exposition du concentrateur au soleil

V.2.1 Le réflecteur

Il est constitué par un miroir d'argent sous forme d'une calotte sphérique. Le miroir repose sur un support incliné à 23°

Le miroir a un coefficient de réflexion d'argent $\rho_{ref} = 0,8$

Tableau V.1 Dimensionnement d'un réflecteur sphérique :

Diamètre	$D = 90 \text{ cm}$
L'angle d'ouverture	$\Theta = 30^\circ$
Distance focale	$F = 40 \text{ cm}$
Surface d'ouverture	$S = 0,367 \text{ m}^2$

V.2.2 L'absorbeur

Nous avons utilisé l'acier comme dispositif absorbant, c'est un tube de 10 cm de diamètre extérieur et 19 cm de longueur.

Avec : $\varepsilon_{abs} = 0,8$, $\alpha_{abs} = 0,8$, $\tau_{abs} = 0,9$

Le serpentin fabriqué en cuivre de 4 mm de diamètre et 8 m de longueur.

(Voir la figure V.6).



Fig.V.7 La tache solaire au disque de la moindre diffusion

V.2.3 L'expérience

La première expérience illustrée dans la figure V.7 s'est déroulée durant la journée du 30/07/2008 et la seconde montrée dans la figure V.8 durant la journée du 05/08/2008.



Fig.V.8 La première expérience



Fig.V.9 La deuxième expérience

V.2.4 Problèmes rencontrés durant l'expérience

Durant nos expériences, nous avons rencontré un certain nombre de problèmes décrits ci dessous :

- La fixation des thermocouples : il arrive que l'un d'eux se détache au cours de l'expérience, et se détériore aux températures très élevées.
- L'étanchéité de l'absorbeur comportant la tige des thermocouples laisse passer des fuites de vapeur vers l'extérieur causant une baisse de pression à l'intérieur de celui-ci affectant les mesures.
- La fluctuation du vent lors de l'expérience (vitesse du vent supposée constante dans nos calculs) influe sur les données de température calculées.
- L'intensité du rayonnement solaire direct est affectée par un ciel nuageux d'où un faible rendement du concentrateur.
- Le déplacement et la variation de la tache solaire sur la surface captatrice de l'absorbeur affecte la température mesurée par les thermocouples de l'absorbeur.
- L'absence du système de poursuite automatique nous oblige à suivre le soleil manuellement avec un pointage toutes les cinq (05) minutes voir la figure V.9.

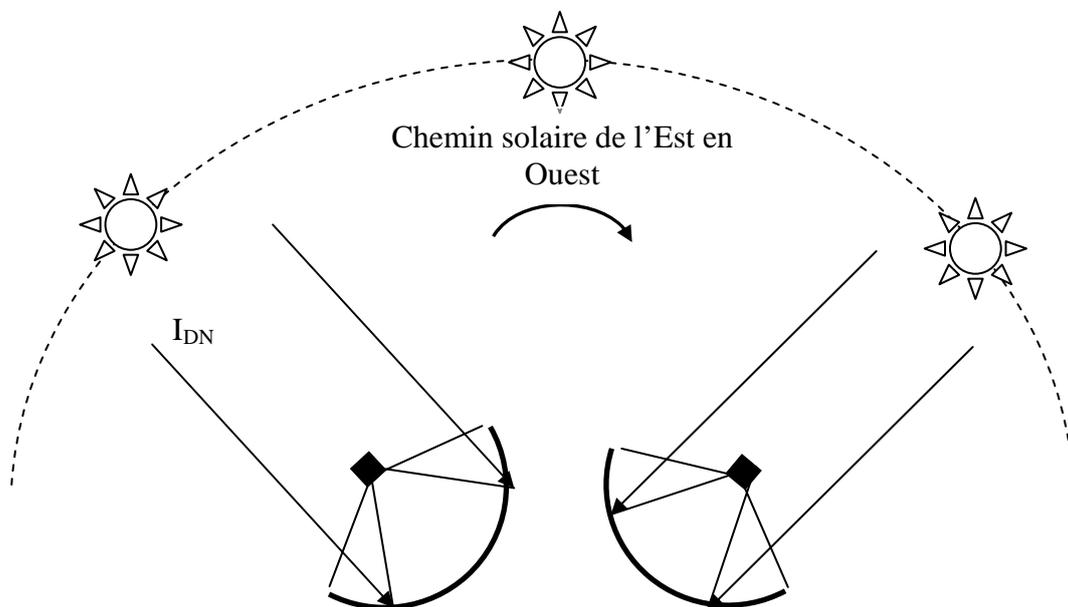


Fig.V.10 Pointage solaire a chaque cinq (5) minute

V.3 Interprétation des Résultats

V.3.1 Comparaison entre l'éclairement théorique et mesuré

1. La figure **V.11** montre la variation de l'éclairement au cours de la journée, on constate que l'éclairement direct théorique suit l'éclairement mesuré, avec une erreur relative moins de 10 %.
2. En absence de Pyrhéliomètre et pour déterminer l'éclairement solaire direct parallèle à l'axe optique de miroir sphérique, on utilise une méthode de calcul simple qui consiste à retrancher du rayonnement globale le rayonnement diffus et diviser le tout par $\sin(h)$.
3. La puissance solaire reçue à l'ouverture du récepteur sous forme de rayonnement solaire est toujours parallèle à l'axe optique du miroir.
4. la courbe illustrée par la figure **V.9** montre que l'éclairement solaire direct croit rapidement du lever du soleil jusqu'à environs de 09h30 (heure locale) avec une vitesse de $185,6 \text{ W/m}^2/\text{heure}$ pour atteindre une valeur de 670 W/m^2 . Puis il varie lentement entre 09h30 jusqu'à 11h10 avec une vitesse de $76,5 \text{ W/m}^2/\text{heure}$, dans l'intervalle 11h10 et 15h00 environs l'éclairement varie faiblement et devient presque stable ($\sim 20 \text{ W/m}^2/\text{heure}$) où il atteint son maximum.
5. lorsque le ciel est clair toute la journée la répartition de l'éclairement est symétrique par rapport au midi solaire vrai.
6. on remarque aussi que vers 09h30 jusqu'à 10h50 environs une succession de chutes d'éclairement liées à un voile nuageux.

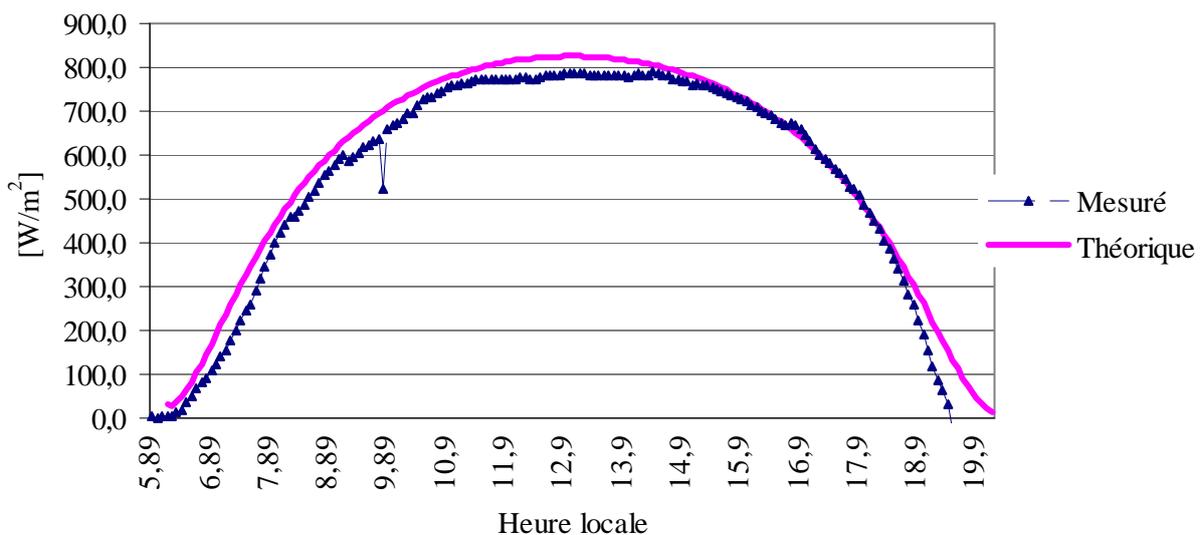


Fig.V.11 L'éclairement solaire direct du 27/06/04.
 Lieu du point de mesure : latitude : 36,78, longitude : 3,03 et altitude : 340 m.

V.3.2 L'influence de diamètre du réflecteur

La figure V.12 montre l'influence du miroir sur la température de l'absorbeur. L'augmentation du diamètre du réflecteur fait augmenter la concentration géométrique de ce fait, fait augmenter la température de l'absorbeur. Lorsque la dimension du réflecteur augmente, le flux concentré au niveau de l'absorbeur augmente la valeur de la température à des niveaux élevés.

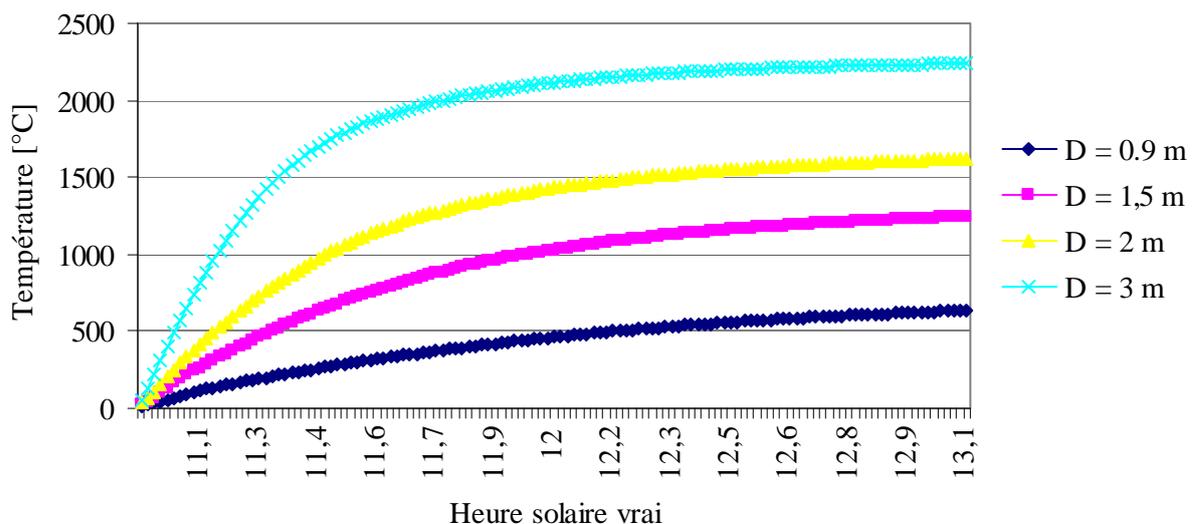


Fig.V.12 L'influence du diamètre simulé du réflecteur sur la température de l'absorbeur.

V.3.3 Évolution des puissances journalières

Dans les figures suivantes, nous montrons l'évolution de la puissance perdue, utile et absorbée durant le chauffage au cours des deux journées. Nous constatons que la puissance absorbée par la surface captatrice de l'absorbeur est inférieure à la puissance reçue par le réflecteur sphérique. Cette variation est due aux pertes par réflexion et absorption de la sphère et de l'absorbeur.

Quand la température de l'ouverture du récepteur augmente, le récepteur cède de la chaleur à l'environnement par conduction, rayonnement et convection. Plus l'écart entre la température de l'absorbeur et l'air ambiant est élevé, plus les pertes thermiques du concentrateur sont importantes et plus la puissance utile diminue.

Le chauffage continue jusqu'à atteindre l'état d'équilibre entre la puissance incidente du réflecteur et la puissance perdue (la puissance utile nulle) [31], Dans ce point la température de stagnation est atteinte. La puissance utile absorbée par l'ouverture du récepteur sert à chauffer l'eau qui se trouve à l'intérieur du récepteur et fait augmenter sa température jusqu'à

la température d'ébullition. La valeur de la puissance utile absorbée par l'ouverture de l'absorbeur durant l'été est plus grande que celle de l'hiver.

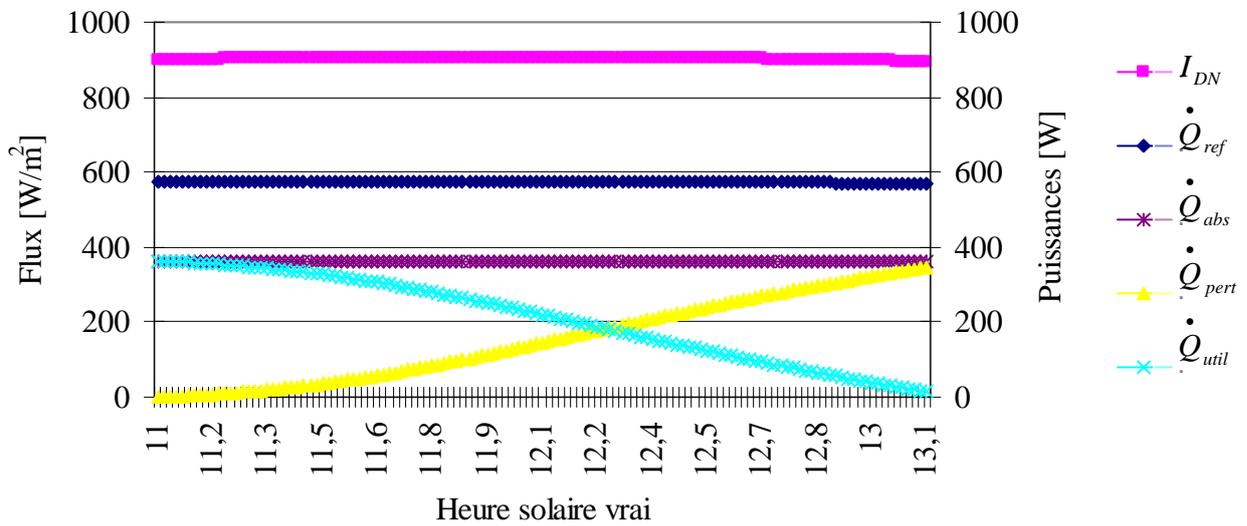


Fig.V.13 Variation des différentes puissances en fonction de la journée de 22/07/2008

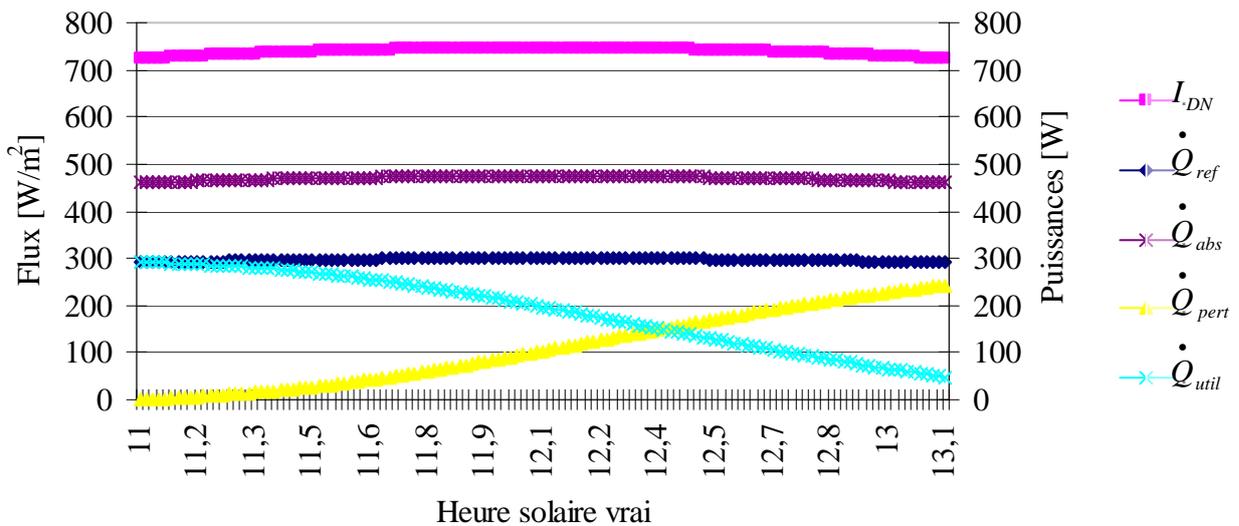


Fig.V.14 Variation des différentes puissances en fonction de la journée de 22/12/2008

V.3.4 Évolution théorique de la température d'absorbeur

Au début du chauffage, à $t = 0$ s, la température d'ouverture d'absorbeur égale à la température ambiante, après un pas du temps de (05) minutes de chauffage, cette température croît avec en fonction du rayonnement solaire concentré à l'ouverture de l'absorbeur, elle 40°C atteint en hiver et 60°C en été. Elle continue à augmenter ou sa valeur devienne stationnaire (température de stagnation) [28]. Dans ce cas l'absorbeur est en état d'équilibre, c'est-à-dire que toute les surface d'absorbeur à la même température, cet état d'équilibre est très difficile à établir à cause :

- l'influence du vent,
- La température maximale ambiante est atteinte entre 12h00 et 14h00,
- Eclairage important.

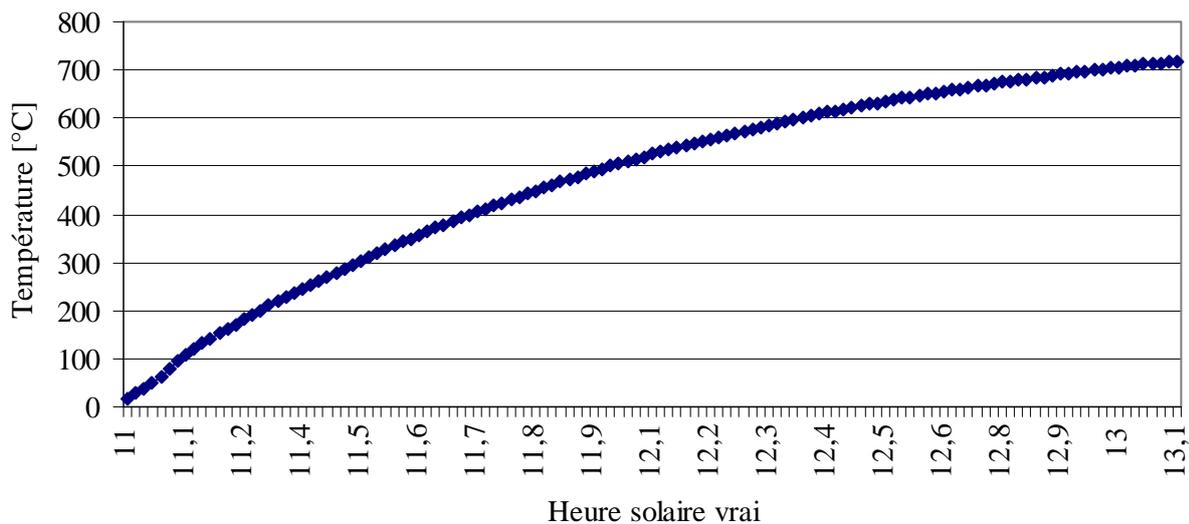


Fig.V.15 Variation de température d'absorbeur durant la journée de 22/07/2008

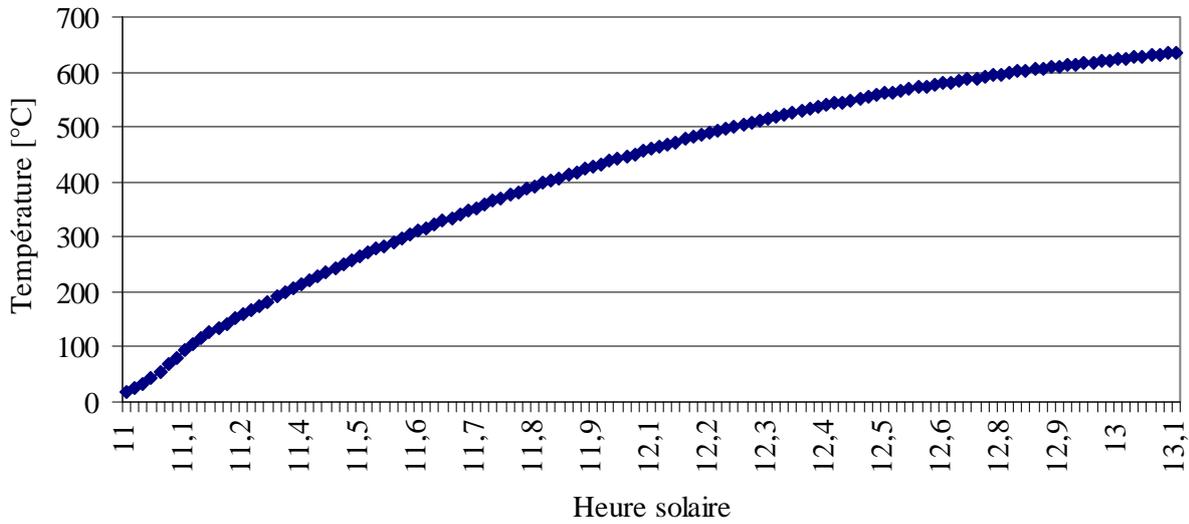


Fig.V.16 Variation de température d'absorbeur durant la journée de 22/12/2008

V.3.5 Évolution des flux thermiques

L'évolution des flux ont la même révolution par rapport aux puissances, mais seulement du point de vu valeurs sont plus puissant par rapport à l'éclairement solaire direct de l'ordre de plus 40 fois. C'est-à-dire quarante (40) Soleil.

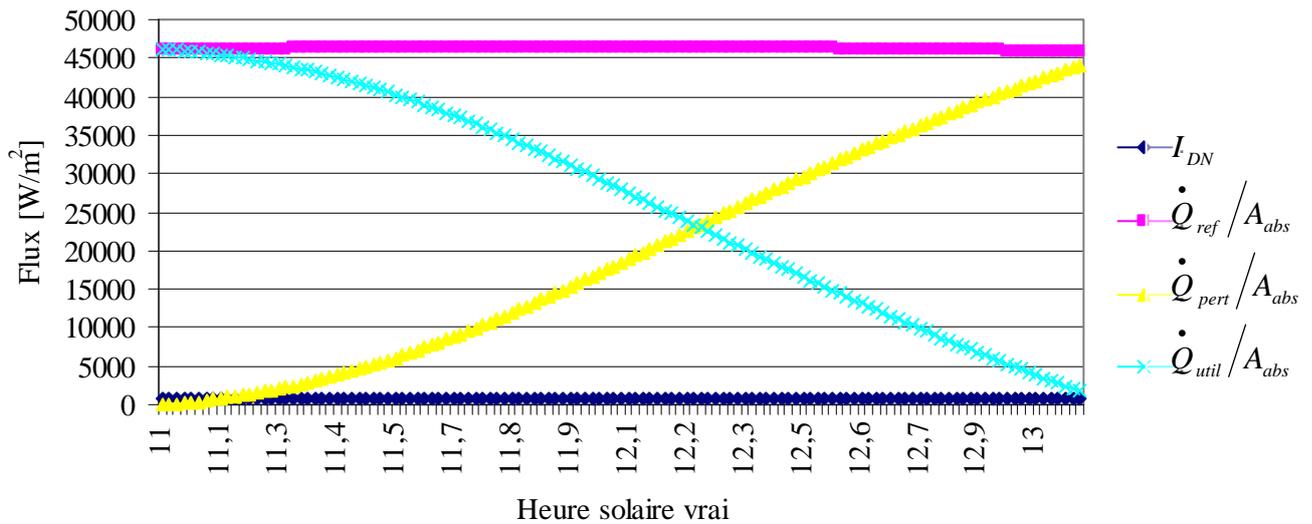


Fig.V.17 Variation des flux thermique du 22/07/2008

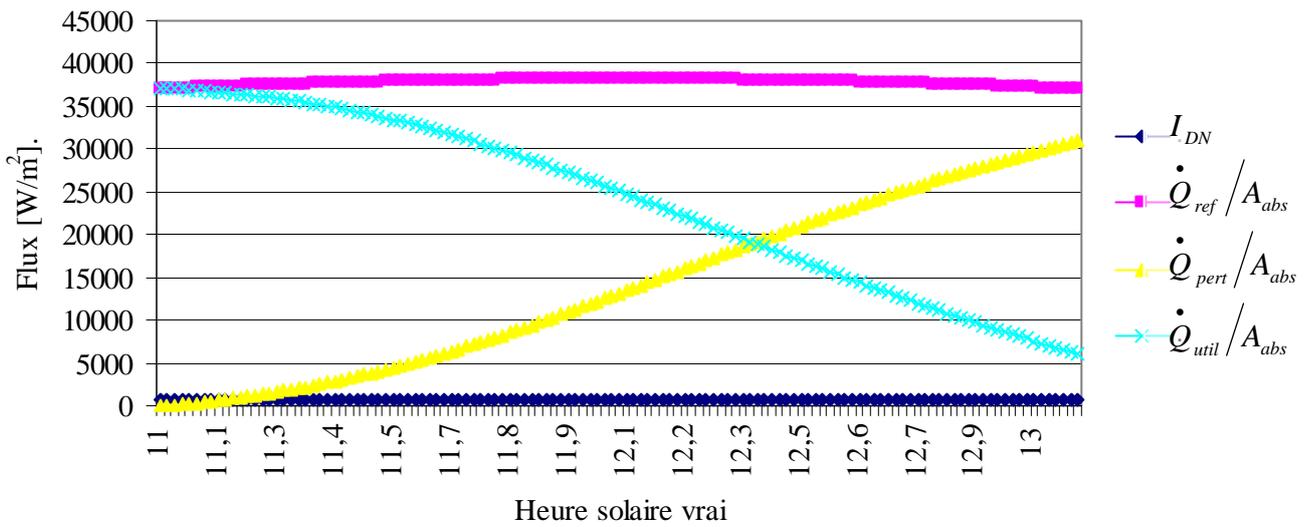


Fig.V.18 Variation des flux thermique du 22/12/2008

V.3.6 Évolution des pertes thermiques

Les pertes thermiques par rayonnement sont très importantes par rapport aux pertes thermiques par convection et par conduction à cause du rayonnement solaire concentré vers la surface captatrice, même les pertes thermiques par conduction sont négligeables à cause de faible épaisseurs de l'absorbeur de plus il est du nature métallique (conductivité thermique de l'acier est considérable), Pour les pertes thermiques par convection a cause de la surface est faible surface d'échange Qui minimise ces pertes avec le vent devant les pertes thermiques par rayonnement qui jouent un rôle primordial à cause de quatrième puissance de température de l'absorbeur (concentration).

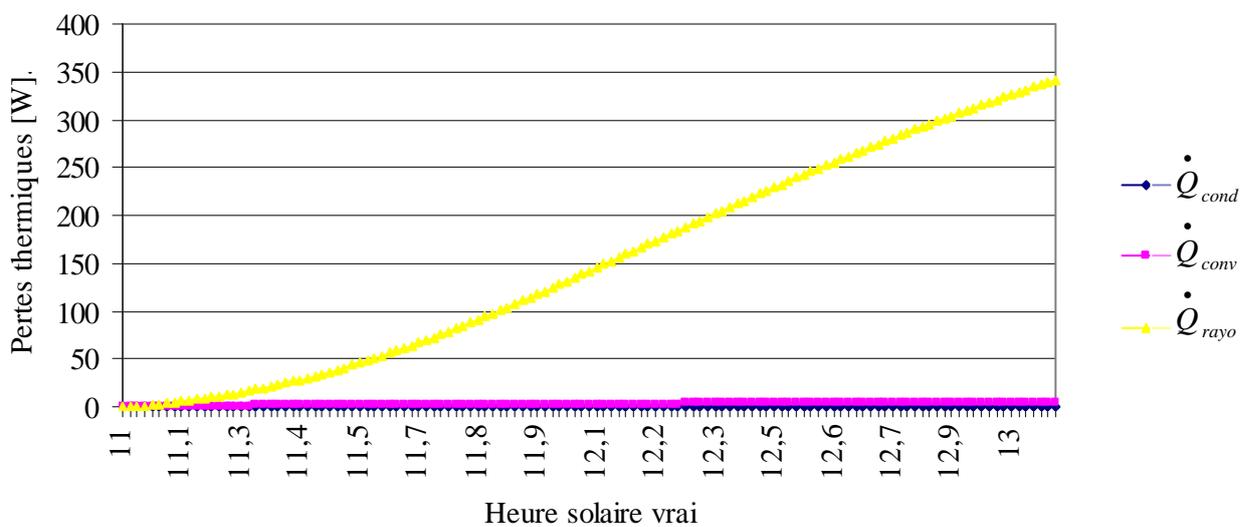


Fig.V.19 Variation des pertes thermique du 22/07/2008

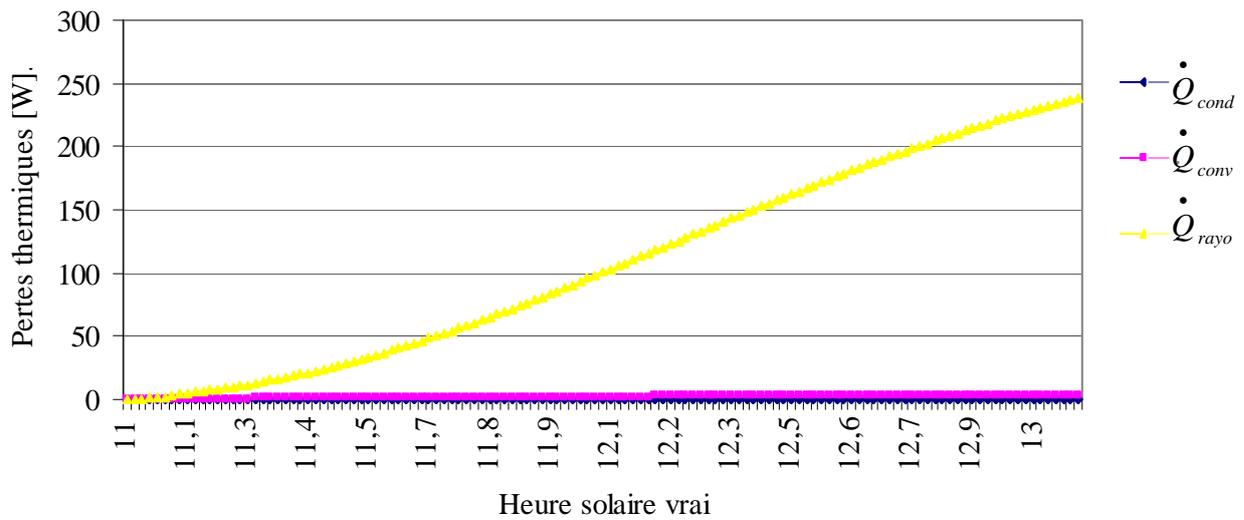


Fig.V.20 Variation des pertes thermique du 22/12/2008

V.3.7 L'influence du vent sur les pertes thermiques

Les différentes variations temporelles des puissances des pertes thermiques en fonction du vent fort d'une vitesse de 15 m/s montré à la figure **V.21**, comparant la figure **V.20** où le vent est faible 1m/s , les pertes par conductions sont négligeables par rapport aux autres pertes (convection et rayonnement) pour les pertes par convection sont augmenter lorsque la vitesse du vent augmente, les pertes par rayonnement diminue lorsque la vitesse du vent augmente parce que cette dernière est en fonction de la température à la puissance quatre (4) de l'absorbeur qui diminue en fonction de la vitesse du vent.

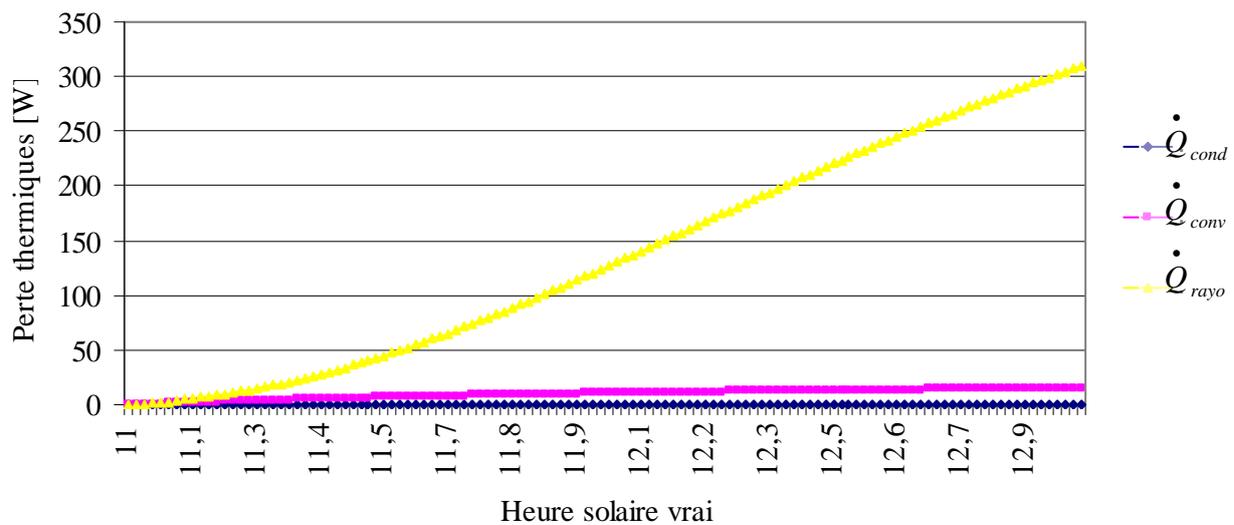


Fig.V.21 Variation des pertes thermique du 22/07/2008

V.3.8 Efficacité thermique du concentrateur

Les figures (V.30, V.31) représentent les variations du rendement du concentrateur au cours de la journée. Le rendement du système est maximal au début du chauffage ou la température du récepteur est égale à la température ambiante. L'absorbeur ne cède pas de la chaleur au milieu ambiant. Lorsque la température de l'absorbeur augmente, le rendement diminue jusqu'à devenir faible.

Le temps de chauffage est long à la période hivernale par rapport à la période estivale.

On peut monter, pour une température d'utilisation donnée. Que le rendement thermique n'augmente pratiquement plus au-delà d'une valeur déterminée du rapport de concentration [32, 35] ; ceci est de nature à faciliter la récupération de la chaleur produite et à limiter les difficultés technologiques lors de la réalisation du miroir concentrateur.

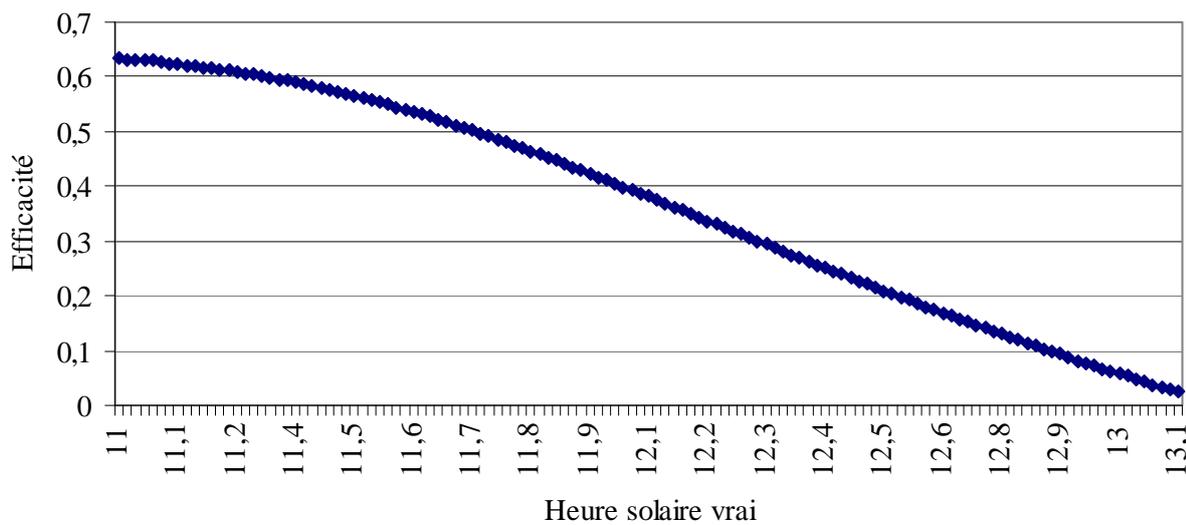


Fig.V.22 Évolution d'efficacité du concentrateur du 22/07/2008

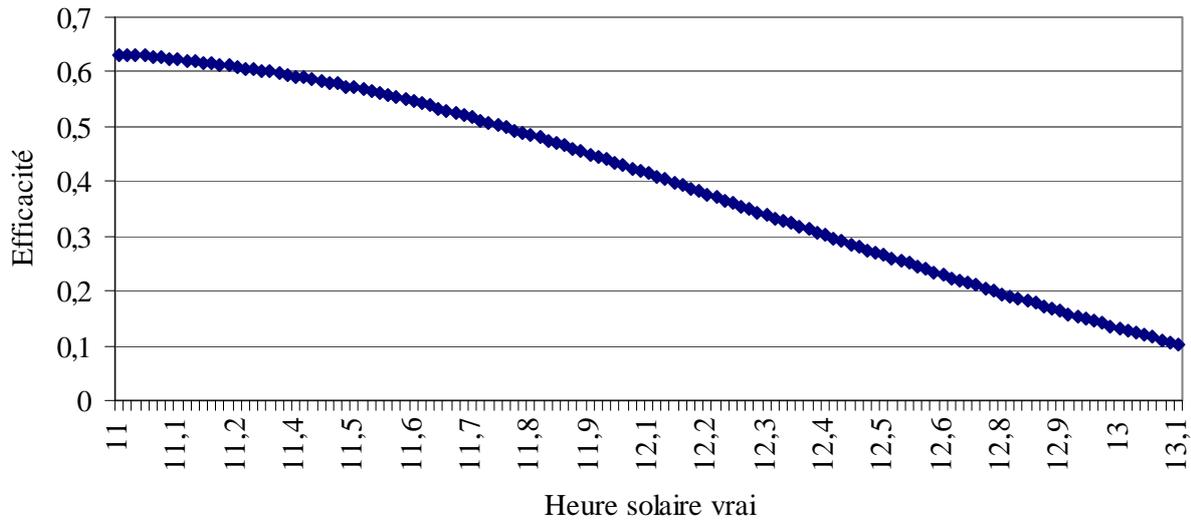


Fig.V.23 Évolution d'efficacité du concentrateur du 22/12/2008

V.3.9 Comparaison de la distribution de la température théorique et expérimentale

Sachant que les propriétés thermophysiques de l'acier diffèrent de celle de l'eau $\lambda_{eau} = 0,6$ W/m/K, $\lambda_{acier} = 48$ W/m/K, $C_{peau}(T) = [4180 - 5700]$ J/kg/K, $C_{p\ acier} = 465$ J/kg/K, ce qui signifie que le transfert thermique par conduction est plus important dans les parois de l'absorbeur que dans l'eau située à l'intérieur du récepteur. Illustré à la figure V.23.

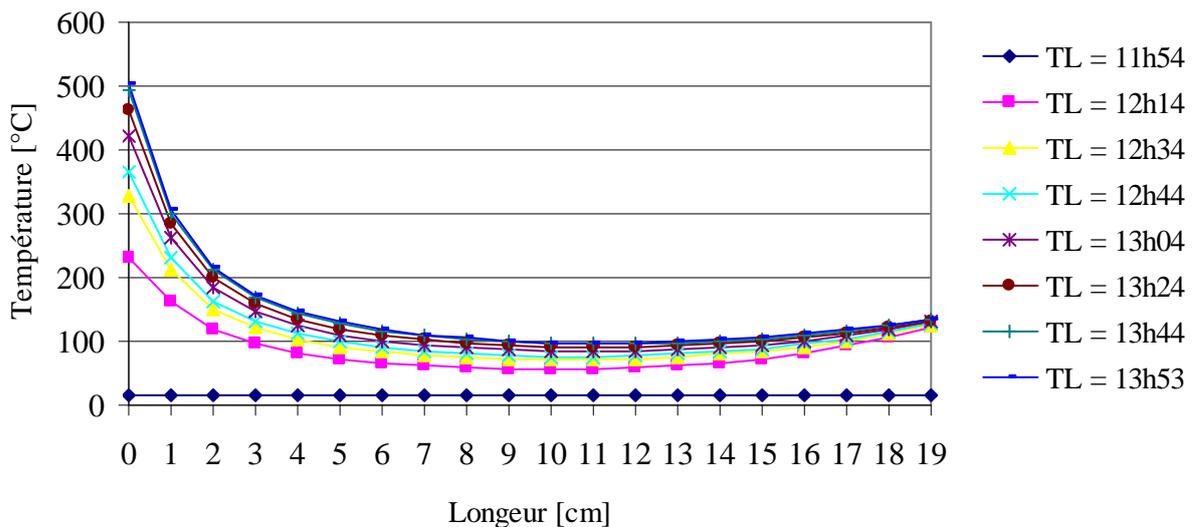


Fig.V.24 Distribution de la température de l'eau au niveau du récepteur

On constate que la courbe théorique et les niveaux de mesures (thermocouple) suivent pratiquement la même allure, cependant on remarque une légère hausse à l'extrémité de la

courbe liée du fait que les propriétés physiques de l'acier (absorbeur) et de l'eau telles que la conductivité thermique et la capacité calorifique qui sont différentes. En effet la propagation de la chaleur par conduction dans l'absorbeur (acier) est plus rapide que dans l'eau, de ce fait l'absorbeur, dans sa partie supérieure devient une source de chaleur ce qui explique l'augmentation de la température.

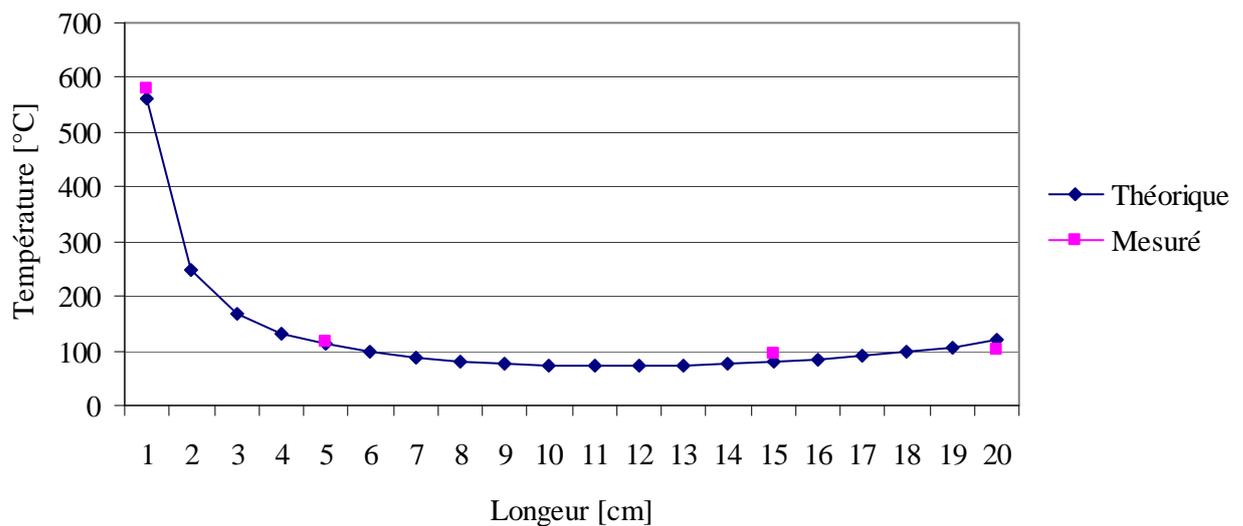


Fig.V.25 Comparaison entre température du l'absorbeur mesuré et estimé

La figure **V.25** montre la concordance entre les points des mesurés par les thermocouples et la stratification thermique calculée par le modèle.

V.3.10 L'influence de la sélectivité thermique

Pour simulé l'intérêt du la sélectivité thermique, Nous prenons par exemple une couche sélective sur une surface captatrice de l'absorbeur comme Fe_3O_4 est la comparée avec une surface non sélective comme l'acier.

Pour les températures relativement élevées, dans les conditions des systèmes de la concentration du flux solaire, on a vu que les pertes par convection et conduction pouvaient être négligées en première approximation par rapport aux pertes radiatives, Sur les figures **V.20** et **V.28**. on peut comparer les efficacités thermiques de conversion et thermo-énergétique d'un absorbeur sélectif ($\alpha_{abs} = 0,85$, $\varepsilon_{abs} = 0,12$) à ceux d'un absorbeur non sélective ($\alpha_{abs} = 0,8$, $\varepsilon_{abs} = 0,8$), On constate que dans tous les cas la sélectivité conduit à une augmentation de rendements mais que ce gain n'est vraiment intéressant que pour des facteurs de concentration inférieurs à 100 et pour des températures inférieures à 1 000 K (727°C) [1],

la figure V.26 montre clairement l'importance de la sélectivité qui concerne l'efficacité (Rendement) thermique.

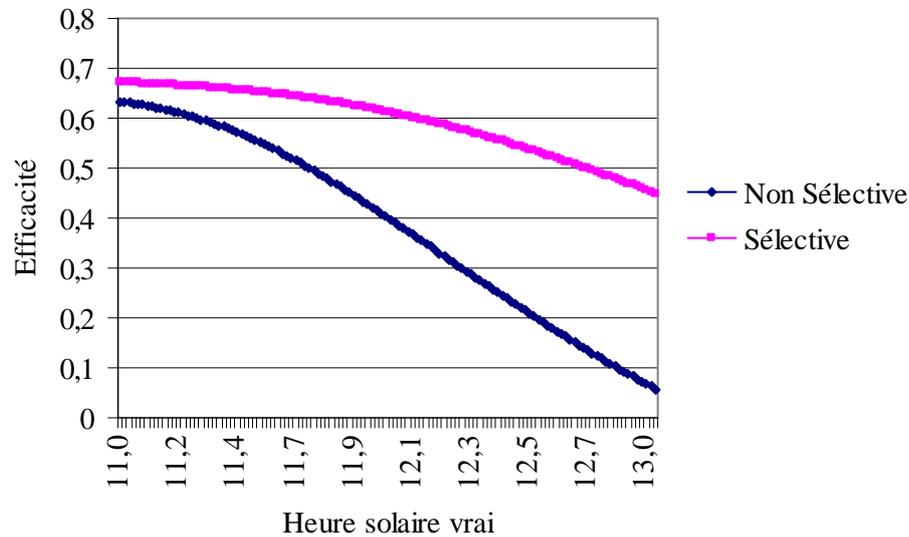


Fig.V.26 Différence d'efficacité entre surface sélective et non sélective

Sur la figure V.27 représente l'avantage de la sélectivité à l'augmentation de la température de l'absorbeur par rapport à une surface captatrice non sélective.

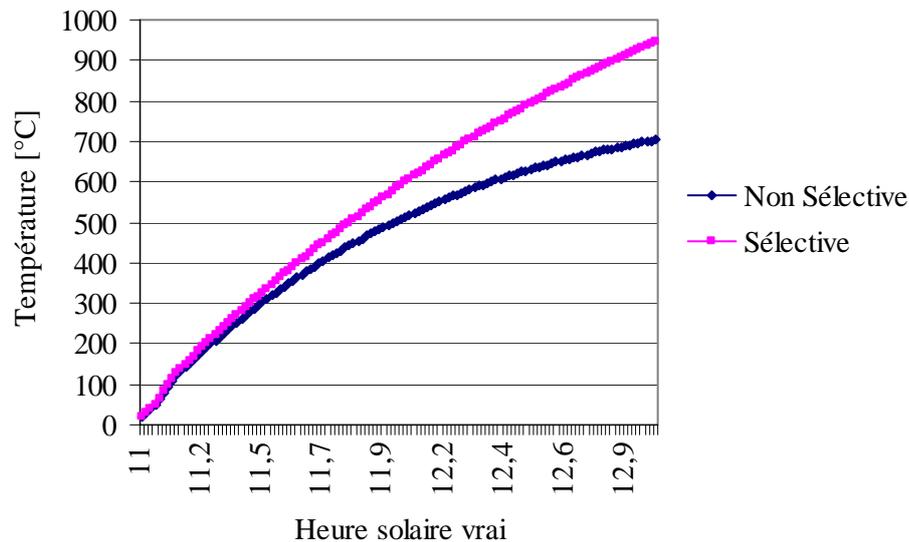


Fig.V.27 Différence de la température de l'absorbeur entre surface sélective et non sélective

Dans les figures V.28 et V.29, lorsque les pertes thermiques diminuent à cause de la sélectivité de la surface captatrice, cela conduit à retarder la température de stagnation, ce qui rend la puissance utile plus importante que celle de la surface non sélective, c'est-à-dire le rayonnement concentré.

sera plus disponible et conduit l'efficacité thermique à augmenté de plus en plus par rapport à la surface non sélective de l'absorbeur.

Ceci confirme bien l'intérêt des surfaces sélectives dans la conversion photothermique à haute température.

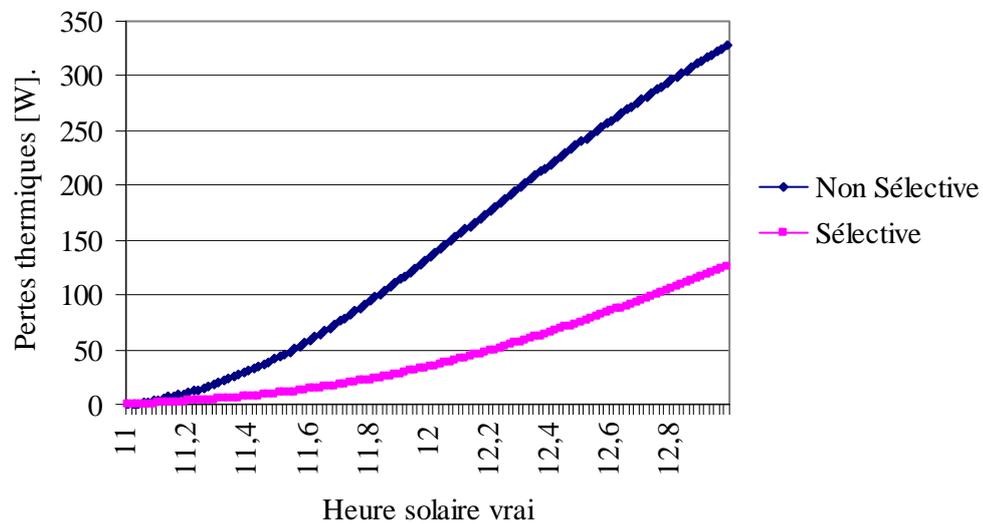


Fig.V.28 Différence des pertes thermiques entre surface sélective et non sélective

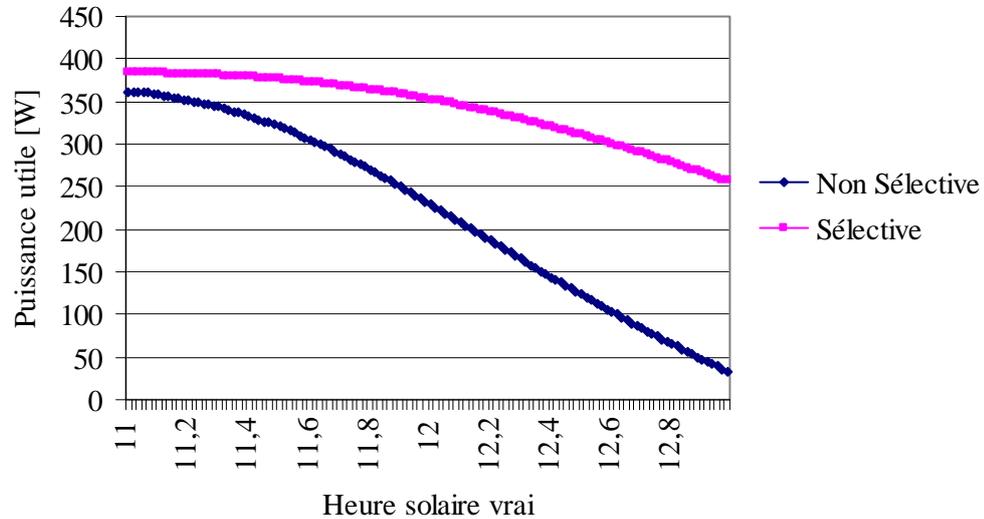


Fig.V.29 Différence des puissances utiles entre surface sélective et non sélective

V.3.11 Comparaison entre température mesurée et estimée

Dans la figure V.30 montre la stratification de la température de l'eau mesurée par les thermocouples. L'augmentation de l'eau augmente lorsque on expose le concentrateur vers le soleil. La durée du chauffage diminue avec l'intensité de l'éclairement, à chaque fois l'éclairement est importante le fluide atteint des températures plus importantes ($>100^{\circ}\text{C}$) jusqu'à la température de stagnation (le fluide sans circulation dans l'absorbeur).

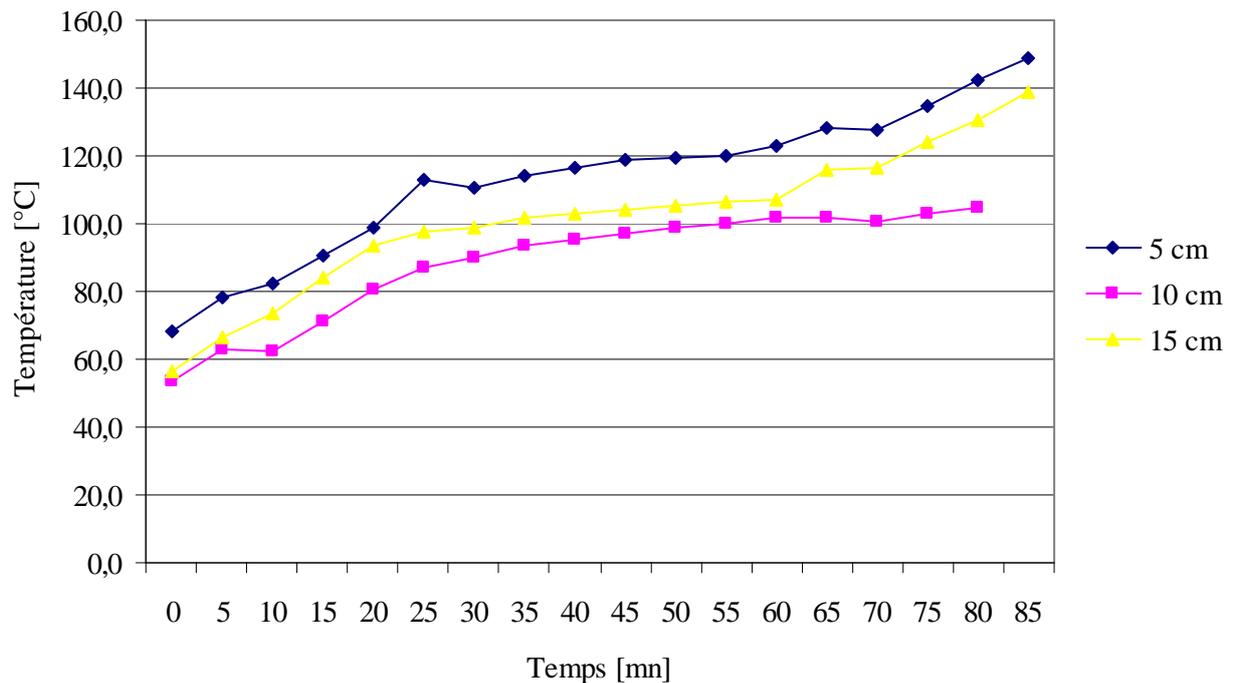


Fig.V.30 Stratification de la température mesurée de l'absorbeur

Dans la figure V.31 le calcul des niveaux des températures de l'absorbeur sont suivent la température mesuré par les thermocouples d'une manière qualitative, d'une manière quantitative les valeurs de température mesurées et calculées sont assez proche.

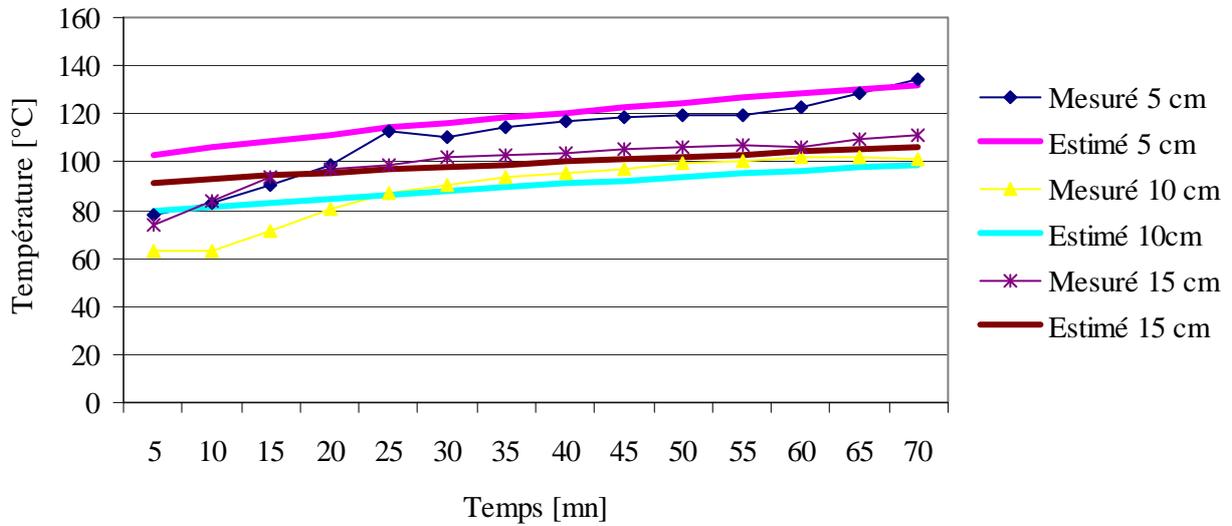


Fig.V .31 Comparaison entre la stratification thermique mesuré et estimé [09h48 - 10h58]

D’après la figure V.32, A $t = 0s$ la différence entre la température d’entrée de l’eau du réseau communal et la température de la sortie du serpent ($T_e = T_s$) est nulle. La différence est différente à zéro à cause la puissance utile est différente à zéro. On constate que l’estimation suit la mesure avec des fluctuations par la mesure due cette dernière aux plusieurs facteurs au niveau de l’expérience comme la variation de l’éclairement solaire direct au cours du temps due au passage nuageux. Cette dernière est ignorée par le calcul qui suppose toujours que le ciel est sans nuage.

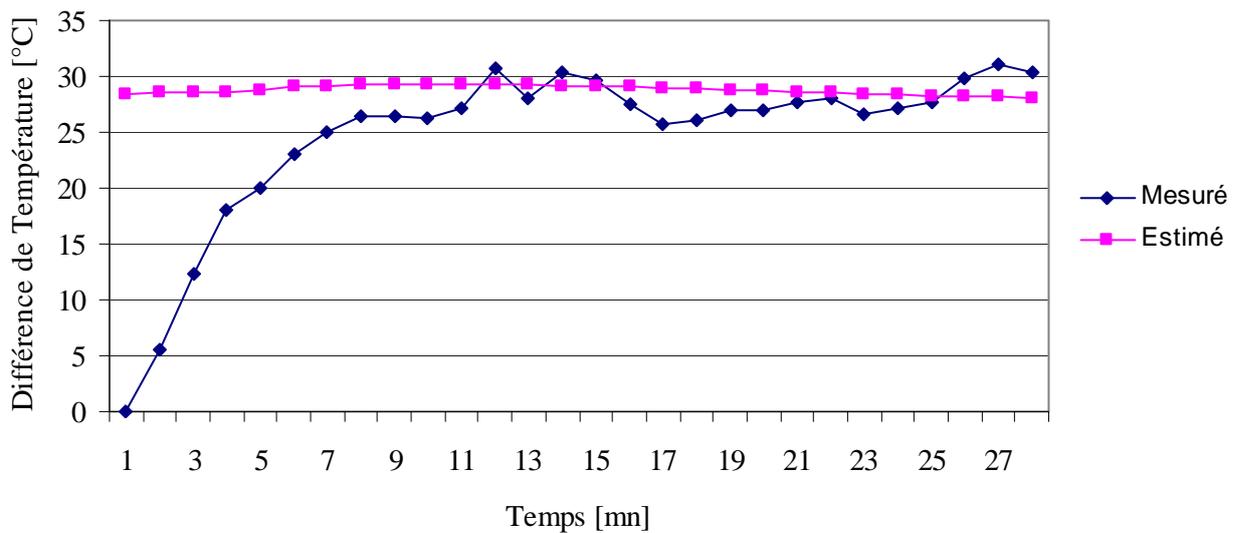


Fig.V.32 Comparaison entre la variation de différences températures mesurée et estimée,

$$\dot{m} = 0,007 \text{ kg/s de } 05/08/2008$$

La figure V.33 montre la variation de la différence de la température de l'absorbeur en fonction de débit, lorsque le débit est important la différence du température est moins importante lorsque le débit est faible où la différence de la température atteint des valeurs de 180°C pour un débit de 3,6 kg/heure et 36°C pour un débit de 18 kg/heure.

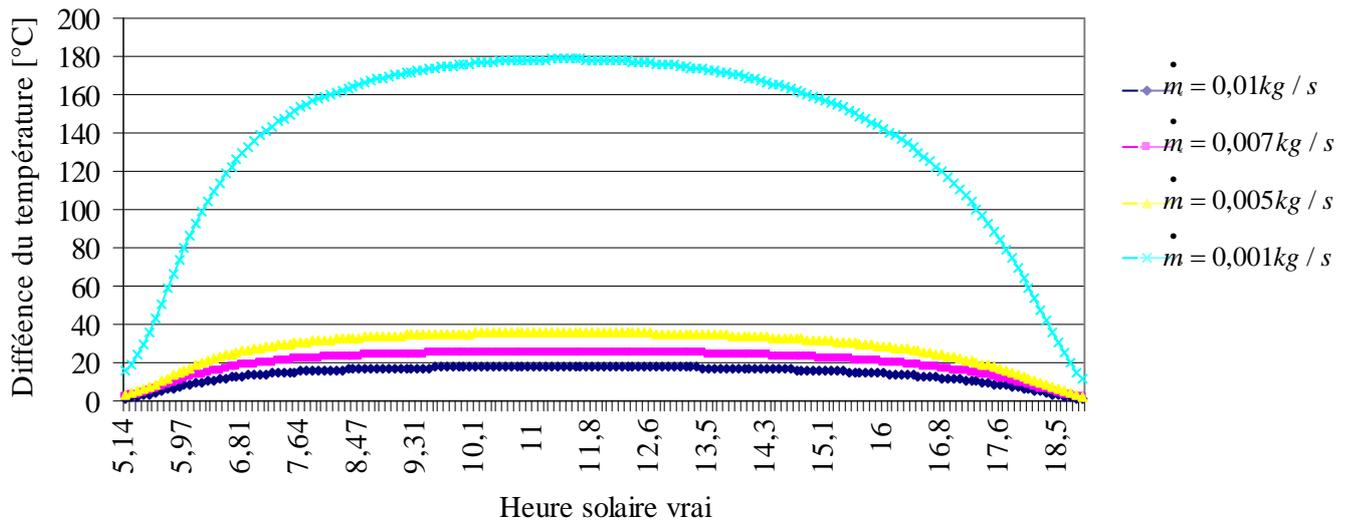


Fig.V.33 Simulation de différences températures en fonction de leur débit \dot{m} de la journée 05/08/2008

V.4 Conclusion

Le présent travail est une contribution dans le domaine des concentrateurs solaires sphérique, il s'intéresse particulièrement aux problèmes de transfert de chaleur dans l'absorbeur, c'est-à-dire lorsque nous concentrons le rayonnement solaire à travers un système optique (miroir sphérique) par lequel l'absorbeur convertit l'énergie solaire concentré en énergie thermique permet de répondre aux différents besoins : production d'eau chaude, production d'énergie électrique par la génération de vapeur d'eau, stérilisation d'objet (instruments médicaux), etc. Une partie de l'énergie concentrée sur la surface captatrice est perdue par réflexion sur la couverture de cette surface. Ce sont les pertes optiques. Une autre part de l'énergie thermique produite par l'absorption des photons incidents est perdue par transfert vers l'environnement du concentrateur par convection et 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.

Parmi les résultats les plus importants, nous pouvons citer que:

- La disponibilité d'un Pyrhéliomètre qui donne un éclairage direct plus précis. Nous avons estimé l'énergie utile de manière plus précise.
- L'augmentation du diamètre du réflecteur entraîne une augmentation de la température du fluide caloporteur dans l'absorbeur.
- La vitesse du vent influence également la température du fluide caloporteur cependant cette influence est petite.
- Le Montage d'un système de poursuite qui nous aide à fixer la tache solaire au milieu de l'absorbeur.
- Le rendement thermique du concentrateur est d'autant meilleur que la température de l'absorbeur est basse.
- L'avantage de la sélectivité est amélioré les paramètres de l'absorbeur du concentrateur.
- L'inconvénient principale de la sélectivité c'est pour des températures très élevées le risque de la détérioration du matériau sera possible [1].
- Sélectivité optimisable pour absorption max et émission min
- traitements de surface
- La diminution du débit massique entraîne une augmentation de la température du fluide caloporteur.

- Le développement d'un code nous a permis de prédire l'évolution du champ de la température dans l'espace et dans le temps au niveau de l'absorbeur.

Conclusion générale

L'étude que nous avons réalisée porte sur un concentrateur sphérique, elle nous a permis de connaître le fonctionnement de ce système et de prévoir la température atteinte au niveau de la surface captatrice de l'absorbeur.

Nous avons montré que cette température au niveau de l'absorbeur dépend de plusieurs facteurs dont les plus importants sont :

- La variation de l'éclairement solaire qui varie au cours de la journée,
- La géométrie du réflecteur (diamètre, angle d'ouverture et rayon de la sphère),
- La nature de la matière réfléchissante du miroir (Argent, Aluminium,...)
- La nature de l'absorbeur (acier, cuivre,...), sa géométrie (cylindrique, conique,..) ainsi que ses dimensions.
- La sélectivité de la surface absorbante.

Par contre, l'absence d'appareillage pour mesurer le rayonnement direct (Pyriéliomètre) ne nous a pas permis d'avoir des données de l'éclairement solaire direct, ce qui nous a amené à l'estimer par un simple modèle théorique. Cette estimation s'est répercutée sur la précision du calcul de la température au niveau du récepteur.

L'utilisation de ce concentrateur pour le chauffage d'eau avec un fluide stationnaire au niveau du récepteur est peu intéressante à cause de la température de stagnation atteinte au bout d'un temps très court, le rendement du concentrateur devenant faible après un certain temps de chauffage, il faut procéder au changement du contenu du récepteur, ce qui nous permet de conclure que ce type de modèle ne peut être utilisé de façon continue toute la journée. Le temps d'utilisation de ce modèle dépend de la nature de l'application qu'on veut réaliser.

Pour rendre ce concentrateur complètement autonome et plus performant, il serait judicieux de le faire fonctionner en utilisant l'huile (caractéristiques thermophysiques résolu a des températures élevée) comme fluide caloporteur et transmettre cette chaleur par l'intermédiaire d'un échangeur de l'eau en mouvement.

Le premier domaine d'application de ce système est destiné à la stérilisation d'instruments médicaux, pour la cuisine solaire ainsi que pour la pasteurisation des alimentations (lait par exemple).

Le deuxième domaine est la production d'eau chaude sanitaire contenue dans le serpentin du récepteur.

Le problème que nous avons rencontré dans l'expérience qui a été menée est celui de la fermeture du récepteur qui limite le temps de fonctionnement du système. Ce problème trouve son origine au fait que la pression à l'intérieur du récepteur augmente en fonction de la température.

Pour améliorer le concentrateur solaire proposé dans cette étude, il est recommandé de lui adjoindre à un système de poursuite automatique du soleil et également d'utiliser un autre type de récepteur de chaleur comme par exemple le moteur de Stirling.

Enfin je pense que l'expérience est à considérer comme étant largement positive en ce qui concerne la compréhension du modèle et la connaissance de la méthode de construction des capteurs solaires sphérique à moyennes températures.

Le programme informatique développé pour cette étude peut être également utilisé pour n'importe quel système optique à concentration. Toutefois, quelques modifications doivent être apportées à ce programme afin de l'adapter au concentrateur utilisé en introduisant les paramètres physiques adéquats.

REFERENCES

- [1] **J.Spitz et A.Aubert**, Matériaux sélectifs pour la conversion photothermique de L'énergie solaire, Revue de physique appliquée, tome 14, Janvier 1979, page 67.
- [2] **J.A. Duffie**, and **J.W.Beckman**, Solar Engineering of Thermal Processes, 2^{ed}, Inc, 1991.
- [3] **M. Iqbal**, An Introduction to solar Radiation, Academic Press, Toronto (1983).
- [4] **M.Geyer**, and **W.B.Stine**, Power From the Sun (Powerfromthesun.net). J.T. Lyle Center, 2001.
- [5] **R.Donald**, Solar Energy. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1981.
- [6] **Y.Jannot**, Cours de Transferts thermiques, Thermique solaire, Octobre 2003.
- [7] **C.P.de Brichaumbot et C.Vauge**, Le gisement solaire, Ed. Tech. & Doc., Paris, 1982.
- [8] **J. Bernard**, Energie solaire Calculs et optimisation. Edition ellipses, 2004.
- [9] <http://www.promes.cnrs.fr/MOYENS/Station/pyranometre.htm>
- [10] <http://www.promes.cnrs.fr/MOYENS/Station/pyrheliometre.htm>
- [11] **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.
- [12] **M. Capderou**, Atlas Solaire de l'Algérie, Tome1, Vol 1 et 2 : Modèles théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [13] **R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz**, Le rayonnement solaire conversion thermique et Applications. Edition Tec-Doc, 1980.
- [14] Concentration du rayonnement solaire, Cahiers de l'AFEDES, n°3 novembre 1973, S.A Editions Européennes de Thermique et industrie, Paris.
- [15] **R. Peyturaux**, L'énergie solaire, 3^{ème} édition 1978, P.U.F, Paris.
- [16] **R. Winston**, Solar Energy, 16, 89, 1974.
- [17] **J.J. O'Gallagher**, Nonimaging Optics in Solar Energy, A Publication in the Morgan and Claypool Publishers series, 2008.
- [18] **Y.Shuai, X.L.Xia, H.P.Tan**, Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems, Solar Energy 82 (2008) 13–21.
- [19] **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.

- [20] **N.M. Bahadori**, Design of solar autoclave. Solar Energy, Vol.18, pp. 489- 496. Pergamon press 1976.
- [21] **B. Hafner, C. Faber**, Methods for design and thermal characterisation of solar cookers, Solar cookers test procedure ECSCR, Version 2, 1993.
- [22] **S. Bonned et A. Alaphillipe**, Conversion thermodynamique de l'énergie solaire dans des Installations de faible et moyenne puissance. Energ. Ren : 11^{ème} journées internationales de thermique. pp. 73-80. 2003.
- [23] **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.
- [24] **F.Kreith**, Principals of heat transfer, (3^{ème} edition).
- [25] **D. Kedwards, L. Marlot**, Capteurs Solaires, Edition SCM, Paris 1979.
- [26] **S. Bonned et A. Alaphillipe**, Conversion thermodynamique de l'énergie solaire dans des Installations de faible et moyenne puissance. Energ. Ren : 11^{ème} journées internationales de thermique. pp. 73-80. 2003.
- [27] **A. Rabl**, Optical and thermal Properties of compound Parabolic concentrators, Solar Energy. Vol 18, pp 497-511. Pergamon press 1976.
- [28] **D. Faiman**, Solar thermal Collectors. Introduction to solar energy. Lecture 5 version 3 .1.2003.
- [29] **O. C. Jorgensen**, Collector heat capacity effect on solar system performance, Solar Energy. Vol29. No.2. pp 175-176, Printed in Great Britain. 1982.
- [30] **J.E. Braun et J.C. Mitchell**, Solar geometry for fixed and tracking surface. Solar Energy. vol. 31, n^o5, pp. 439-444, 1983.
- [31] **S.J. Harrison, Q. Lin and L.C.S. Mesquita**, Integral stagnation temperature control for Solar. SESCOI 2004 Conference University of Waterloo Waterloo, Ontario, Canada August 21st–25th, 2004.
- [32] **F. Kreith, D.Y. Goswami**, Handbook of Energy Efficacy and Renewable energy, by Taylor & Francis group LLC, 2007.
- [33] **F.Kreith, JF. Kreider**. Principles of solar engineering. NewYork: McGraw-Hill; 1978.
- [34] **B.Anderson**. Solar energy: fundamentals in building design. New York: McGraw-Hill; 1977.
- [35] <http://www.promes.cnrs.fr/MOYENS/Concentrateurs/concentrateur1.htm>
- [36] **SA.Kalogirou**, Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004) 231–295.

ANNEXE A

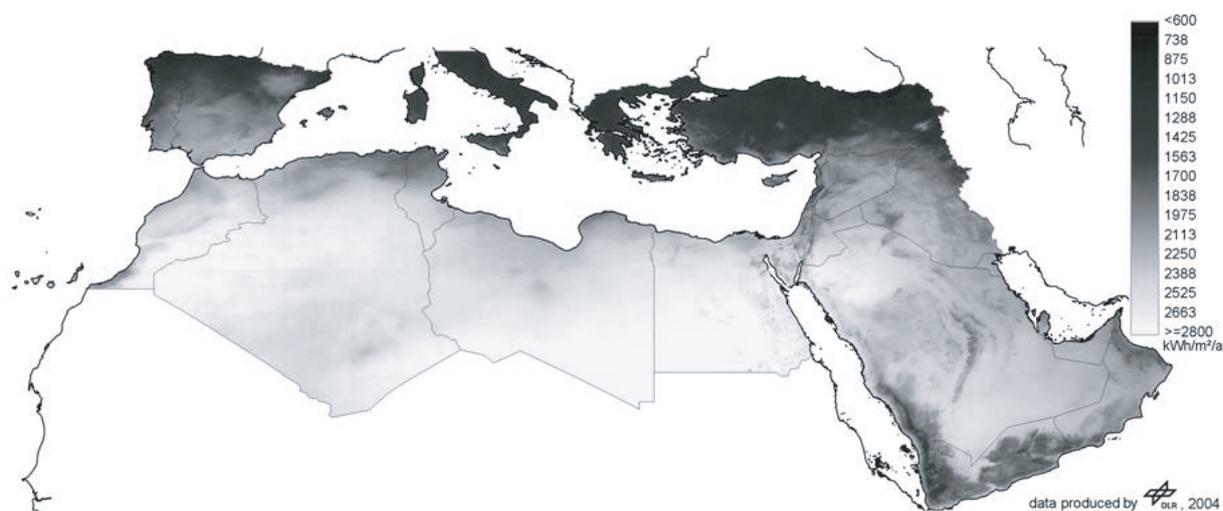


Fig.A.1 L'énergie solaire annuelle en [kWh/m²/an] [32]

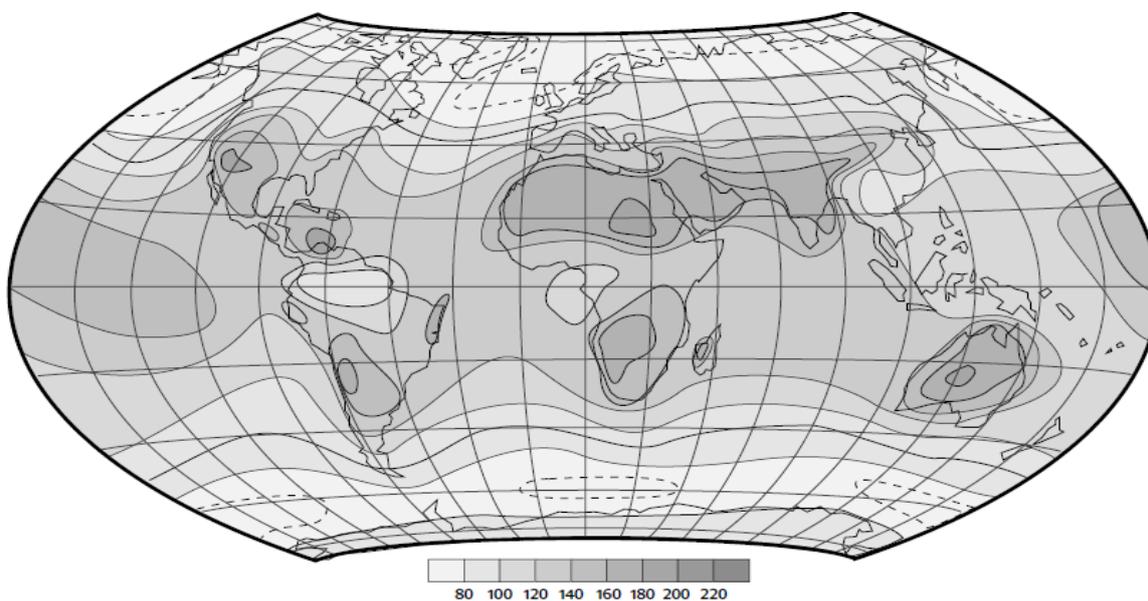


Fig.A.2 Répartition mondiale du cumul annuel du rayonnement global reçu au Sol (en kilocalories.cm⁻²). Pour obtenir des J.m⁻², il faut multiplier les Valeurs du graphique par $4,2 \cdot 10^7$. (D'après Landsberg et al, 1965)

A.1 Calcul de la température ambiante CAPDEROU

La détermination de la température ambiante se fait à l'aide d'une fonction sinusoïdale, où nous avons choisi d'utiliser les données de l'Atlas Solaire Algérien et notons aussi que la simulation n'est pas effectuée sur 24 heures, on se limite à l'intervalle dans lequel le soleil arrive sur la surface du capteur.

$$T_{amb} = \left[\frac{T_{a\max} - T_{a\min}}{2} \right] \cdot \sin \left[\frac{(t - 8) \cdot \pi}{12} \right] + \left[\frac{T_{a\max} + T_{a\min}}{2} \right]$$

T_{amb} : Température ambiante

$T_{a\max}$: Température maximale journalière moyenne du mois considéré.

$T_{a\min}$: Température minimale journalière moyenne du mois considéré.

t : Temps local.

ANNEXE B

B.1 Les propriétés thermophysiques et physiques

Les fluides considérés dans le cadre du présent programme sont l'air à la pression atmosphérique et l'eau. Leurs propriétés thermophysiques ont été tirées des tables [9] et transformées en équations fonction de la température à l'aide de la méthode des moindres carrés. Le type de régression choisie dépend de l'écart type minimum (en général polynomiale ou exponentielle).

- eau :

$$C_p = 4196.35 - 0.81714T + 0.00934T^2 + 10^{-5}T^3 \quad [J/KgK]$$

$$\rho = 1002.73 - 0.17373T - 0.00265T^2 \quad [Kg/m^3]$$

$$\mu = (1.632 + 13.63 \exp(-0.025T))10^{-4} \quad [Ns/m^2]$$

$$k = 0.55867 + 0.00203T - 10^{-5}T^2 \quad [W/mK]$$

- air :

$$C_p = 1005.48 - 0.01014T + 0.001138T^2 + 0.62 \cdot 10^{-5}T^3 + 0.1613 \cdot 10^{-7}T^4 \quad [J/KgK]$$

$$\rho = 1.3043 + 0.00203T - 10^{-5}T^2 \quad [Kg/m^3]$$

$$\mu = (1.7164 + 0.01327T + 0.00019T^2 + 0.1057 \cdot 10^{-5}T^3)10^{-5} \quad [Ns/m^2]$$

$$k = 0.02415 + 0.00008T \quad [W/mK]$$

Il faut souligner que dans tous les cas, la température est introduite en degrés Celsius.

Tableau.B.1 : Propriétés de quelques matériaux utilisées dans le calcul [34]

	λ_{abs} (W/m/K)	α_{abs}	ε_{abs}	Cp (J/K/m)	ρ_{abs} (kg/m)
Cuivre	389	0,75	0,04	38	8940
Aluminium	200	0,04	0,04	86	2700
Acier	46	0,7	0,1	49	7850

Tableau.B.2 : Surface sélectives pour la conversion photothermique à basse et moyenne Températures [1].

Substrat	Traitement	Dépôt	α_{abs}	ε_{abs}	Réf
Cuivre	conversion	CuO-Cu ₂ O	0,85	0,1	[35]
Cuivre	électrolyse	CrO _x	0,97	0,09	[36]
Aluminium	conversion	CuO-CuO ₂	0,93	0,11	[37]
Acier	conversion	Fe ₃ O ₄	0,85	0,12	[38]
Acier	électrolyse	NiS-ZnS	0,95	0,07	[39, 40]
Acier	électrolyse	CrO _x	0,95	0,13	[41]

Définitions [8]

α : L'absorptivité ou facteur d'absorption fraction du rayonnement solaire incident qui est Absorbé

ρ : Réflectivité ou facteur de réflexion solaire (le complémentaire)

τ : Transmissivité ou facteur de transmission solaire (en principe nul) la plaque est en Principe opaque.

ε : L'émissivité ou facteur d'émission infrarouge, fraction d'énergie effectivement rayonnée Sur l'énergie qui serait rayonnée par un corps noir.

Sélectivité: rapport de l'absorptivité sur l'émissivité.

Thermocouple

Instrument constitué de deux fils de matériaux différents dont les extrémités sont reliées entre elles. Il se crée une faible tension quand les deux jonctions sont à des températures différentes. Si l'une des jonctions est maintenue à une température de référence, la mesure de cette tension permet d'en déduire la température de l'autre jonction.

Thermopile

Appareil constitué d'un grand nombre de thermocouples reliés en série.

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.

$$Nu = \frac{hL}{\lambda_f}$$

h : Coefficient de convection thermique [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

L : Longueur caractéristique [m].

λ_f : Coefficient de conductivité thermique du fluide [$w/m \cdot ^\circ C$].

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 [$J/kg \cdot ^\circ C$]

λ_f : La conductivité thermique du fluide [$W/m \cdot ^\circ C$]

α : La diffusivité thermique [m^2/s]

ν : Viscosité cinématique

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.

$$\text{Re} = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$$

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 densité du fluide [kg/m³]

ANNEXE D

D.1 Matrices tridiagonales

On considère le cas particulier où la matrice A est non singulière et tridiagonales, Donnée par :

$$\begin{bmatrix} a_1 & c_1 & & \\ b_2 & a_2 & \ddots & \\ & \ddots & & c_{n-1} \\ 0 & & b_n & a_n \end{bmatrix}$$

Dans ce cas, les matrices L et U de la factorisation LU de A sont des matrices bidiagonales de la forme :

$$L = \begin{bmatrix} 1 & & & 0 \\ \beta_2 & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \\ 0 & & \beta_n & 1 \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} \alpha_1 & c_1 & & 0 \\ & \alpha_2 & & \\ & & \ddots & c_{n-1} \\ 0 & & & \alpha_n \end{bmatrix}$$

Les coefficients α_i et β_i peuvent être calculés par la relations :

$$\alpha_1 = a_1, \quad \beta_2 \alpha_1 = b_2 \Rightarrow \beta_2 = \frac{b_2}{\alpha_1}, \quad \beta_2 c_1 + \alpha_2 = a_2 \Rightarrow \alpha_2 = a_2 - \beta_2 c_1, \dots$$

Don, on a

$$\alpha_1 = a_1, \quad \beta_i = \frac{b_i}{\alpha_{i-1}}, \quad \alpha_i = a_i - \beta_i c_{i-1}, \quad i = 2, \dots, n.$$

Cet algorithme est connu sous le nom d'algorithme de Thomas, et le nombre d'opérations effectuées est de l'ordre de n .

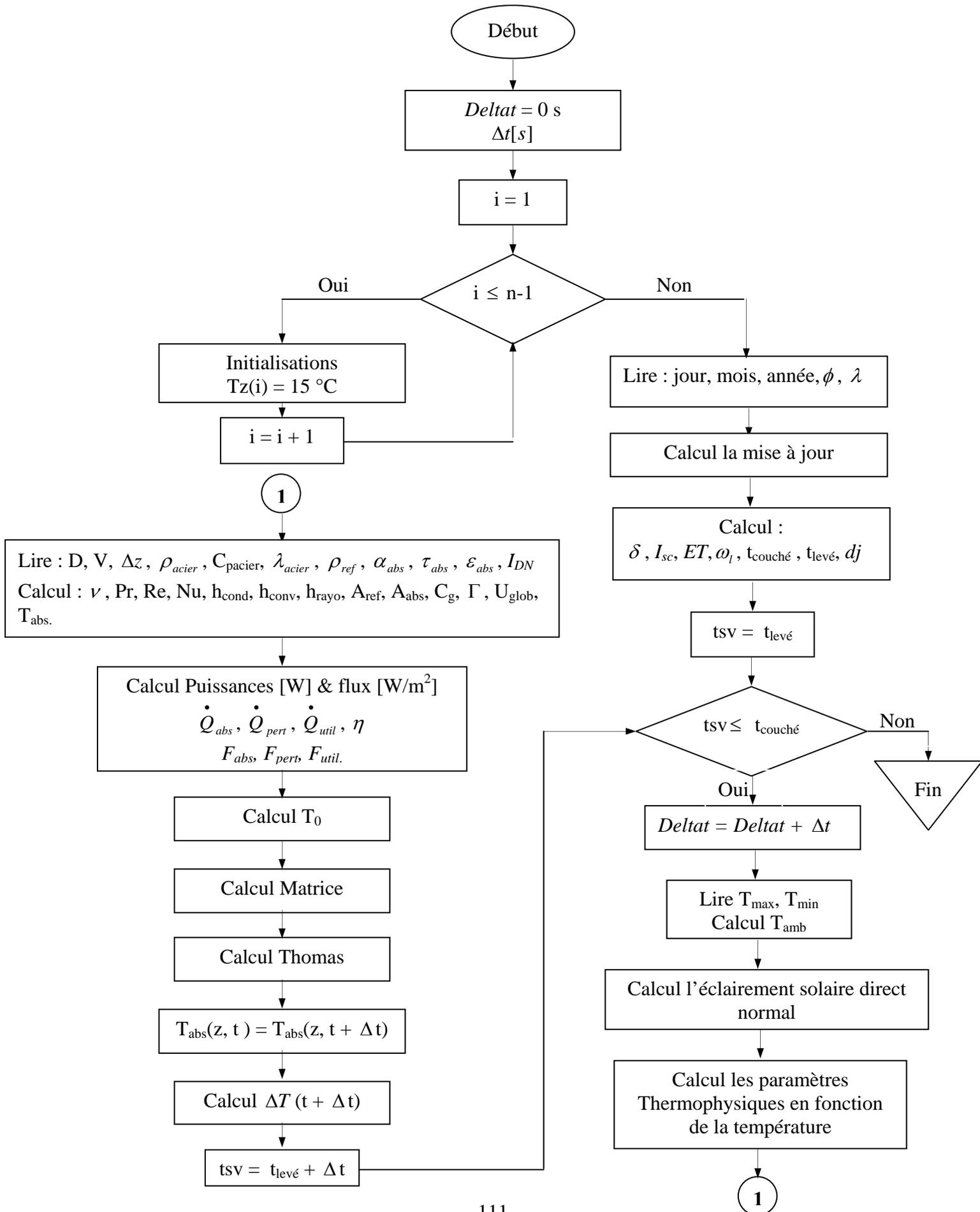
Avec l'algorithme de Thomas, résoudre un système tri diagonal $Ax = f$ revient à résoudre 2 systèmes bidiagonaux $Ly = f$ et $Ux = y$ avec :

$$Ly = f \Leftrightarrow y_1 = f_1, \quad y_i = f_i - \beta_i y_{i-1}, \quad i = 2, \dots, n,$$

$$Ux = y \Leftrightarrow x_n = \frac{y_n}{\alpha_n}, \quad x_i = \frac{y_i - c_i x_{i+1}}{\alpha_i}, \quad i = n-1, \dots, 1.$$

Le coût de calcul ici est de $3(n-1)$ opérations pour la factorisation et de $5n - 4$ opérations pour la substitution, pour une totale de $8n - 1$ opérations.

D.2 Organigramme général de calcul



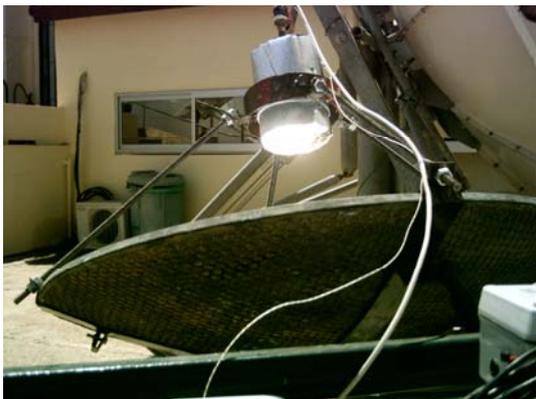
ANNEXE E

Tableau.E.1 Comparaison entre la température mesuré et estimé.

Temps [mn]	5cm Exp	5 cm Théo	10 cm Exp	10cm Théo	15 cm Exp	15 cm Théo
5	78,0	103,1	62,9	79,2	73,6	91
10	82,6	106,1	62,6	81,2	84,1	92,6
15	90,4	108,8	71,4	83,1	93,6	94,1
20	98,9	111,5	80,8	84,9	97,4	95,4
25	113,1	114	86,9	86,6	98,9	96,7
30	110,6	115,9	90,1	87,9	101,6	97,7
35	114,2	118,2	93,4	89,5	102,8	98,9
40	116,6	120,4	95,3	91	104,0	100,1
45	118,8	122,5	97,0	92,4	105,6	101,1
50	119,7	124,5	99,1	93,8	106,3	102,2
55	119,7	126,5	99,9	95,1	106,8	103,2
60	122,7	128,4	101,8	96,4	106,1	104,1
65	128,3	130,2	101,8	97,6	109,4	105
70	134,3	131,6	101,5	98,5	111,0	105,8

E.2 Quelques photographies requises de la manipulation







إنشاء و دراسة مركز كروي

الملخص

هذا العمل المنجز يحوي دراسة تجريبية لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية باستعمال مركز شمسي كروي الطاقة الشمسية المركزة تلتقي في دائرة أقل انتشار أين يوجد لاقط يحول هذه الطاقة إلى حرارة. قمنا باختبار لاقطان اسطوانيان الشكل من فولاذ. الأول مغلق مملوء بالماء و الثاني يحتوي على أنبوب حلزوني نحاسي يمر به الماء. النموذج النظري المستعمل يمكننا من تقدير قيمة الطاقة الشمسية المباشرة اللحظية على مستوى العاكس. كذلك بعض الوسائط على مستوى اللاقط، خاصة درجات الحرارة. الطاقة الشمسية المستعملة في التجربة الأولى تعمل على تحويل الماء إلى بخار هذا الأخير يعمل مثلا على تطهير أدوات الجراحة الطبية، و بسترة المواد الغذائية (الحليب) حيث درجات الحرارة المتحصل عليها تتراوح ما بين 250°م و 350°م. في التجربة الثانية نهتم بالفرق بين درجة الحرارة الداخلة في الأنبوب و الخارجة منه حيث درجة الحرارة المتحصل عليها تقارب 35 ° م مع تدفق متوسط يقدر بـ 20 ل/سا، تكون استعمالات هذا المركز صحية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية, مركز كروي, عاكس, لاقط, دائرة أقل انتشار.

Design and realization of a spherical concentrator

Abstract

This work is to develop an experimental study of converting solar energy to heat using a spherical hub that we have achieved. The concentrated solar energy received in the circle of less widely used by a flat absorber suffered a thermal conversion. Indeed, we tested two receivers in the form cylindrical steel; the first is closed containing water. The second, with an opening at the base, containing a copper coil in which water flows. The development of a simple theoretical model can estimate the direct solar irradiance at the reflector, and other parameters at the receiver including temperatures. Solar energy useful in the first experience makes evaporate water to be used for sterilization of medical instruments; temperatures obtained are about 250°C to 350°C. In the second experiment, focuses on the difference in temperature (entry - exit) of water, the temperature reached, is about 35°C with An average flow of 20 l/h, used for health purposes.

Keywords: Solar radiation, Spherical concentrator, Receiver, Reflector, Circle less widely.

Conception et Réalisation d'un Concentrateur Sphérique

Résumé

Notre travail consiste à élaborer une étude expérimentale de conversion d'énergie solaire en énergie thermique en utilisant un concentrateur sphérique que nous avons réalisé. L'énergie solaire concentrée reçue dans le cercle de moindre diffusion par un absorbeur plat subie une conversion thermique. En effet, nous avons testé deux récepteurs sous forme cylindriques en acier, le premier est fermé contenant de l'eau. Le second, présentant une ouverture à la base contenant un serpentin en cuivre dans lequel l'eau circule. Le développement d'un modèle théorique simple peut estimer l'éclairement solaire direct au niveau du réflecteur, ainsi que les autres paramètres au niveau du récepteur notamment les températures. L'énergie solaire utile dans la première expérience fait évaporer l'eau afin de l'utiliser pour la stérilisation des instruments médicaux, les températures obtenues sont de l'ordre de 250°C à 350°C. Dans la deuxième expérience, on s'intéresse à la différence des températures (entrée - sortie) de l'eau, la température obtenue, est de l'ordre de 35°C de différence avec un débit moyen de 20 l/h, utilisée à des fins sanitaires.

Mots clés : Rayonnement solaire, Concentrateur sphérique, Absorbeur/Récepteur, Réflecteurs, Cercle de moindre diffusion.