

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'études

En vue d'obtention du diplôme de master professionnel en génie mécanique
Option : Energétique
Spécialité : Energies Renouvelables

Thème

**Elaboration d'un programme de calcul de
rendement énergétique d'un capteur cylindro-
parabolique**



Proposé et dirigé par :

Mr: MEDJKANE.G

Etudier par :

IBDJAOU DENE Taous

MAHIOUT Mohamed

Promotion : 2016/2017

Remerciements

Nous exprimons nos vifs remerciements à notre promoteur M r MEDJKAN.G, de nous avoir proposé le sujet. On tient à le remercier pour sa Précieuse aide, sa disponibilité et ses précieux conseils pour l'élaboration de ce travail.

Nous tenons également à remercier le président et les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en jugeant ce e travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département de Génie Mécanique de nous avoir suivis le long de notre cursus universitaire

Enfin, nous remercions toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin au bon accomplissement de notre travail.

Je dédie ce travail :

A ma très chère mère à qui je dois tout mon respect et que je ne remercierai jamais assez pour son soutien;

A mon frère ;

A mes sœurs ;

Tous ceux qui me sont chers :HADI ,MELISSA et YACIN

A la mémoire de mon père.

Tous

Je dédie ce travail :

-A mon très cher père et ma très chère mère auxquels je dois tout mon respect et que je ne remercierai jamais assez pour leur soutien, encouragements et conseils durant tout mon parcours universitaire ;

-A tous mes amis.

Mohamed

Nomenclatureur

➤ Lettres latines :

Symbole	Désignation	unité
A	Altitude	[m]
L	latitude	[degré]
h	Hauteur du soleil	[degré]
a	L'azimut du soleil	[degré]
W	Largeur de la surface d'ouverture	[m]
l	Longueur de la surface d'ouverture	[m]
I_{sc}	Constante solaire	[w/m ²]
I_b	Rayonnement direct incident	[w/m ²]
I_n	Rayonnement direct normal à la surface d'ouverture	[w/m ²]
I_{so}	Rayonnement terrestre sur une surface horizontale	[w/m ²]
A_a	Surface d'ouverture du cylindro parabolique	[m ²]
A_r	Surface du tube absorbeur	[m ²]
C_G	Concentration géométrique	[-]
$C_{idéal}$	Concentration idéale	[-]
C_O	Concentration énergétique	[-]
f	Distance focale	[m]
D_{ri}	Diamètre interne de l'absorbeur	[m]
D_{ro}	Diamètre externe de l'absorbeur	[m]
D_{ci}	Diamètre interne de la couverture	[m]
D_{co}	Diamètre externe de couverture	[m]
h_{rc}	Coefficient D'échange couverture/environnement	[w/m ² .k]
h_{rrc}	Coefficient D'échange radiatif absorbeur/couverture	[w/m ² .k]
h_{rra}	Coefficient D'échange convectif couverture/environnement	[w/m ² .k]
\dot{m}	Débit massique	[Kg/s]
n	Numéro du jour	[heures]
K_c	Conductivité thermique de la couverture	[m/m.k]
K_f	Conductivité thermique de fluide	[m/m.k]
K_{Ls3}	Angle d'incidence modifié	[-]
A_R	Surface d'image réelle	[m ²]

A_G	Surface de gauss	[m ²]
Q_{abs}	Puissance absorbée	[W]
Q_L	Puissance perdue	[W]
Q_u	Puissance utile	[W]
TE	Température d'environnement	[K]
T_a	Température ambiante	[K]
T_r	Température du tube	[K]
T_{ri}	Température de la face interne du tube	[K]
T_{co}	Température de la face externe de la couverture	[K]
T_{ci}	Température de la face interne de la couverture	[K]
T_{fo}	Température de sorti de fluide	[K]
T_{fi}	Température d'entré de fluide	[K]
T_{fm}	Température moyenne du fluide	[K]
TSV	Temps solaire vrai	[heures]
ET	Equation de temps	[heures]
TU	Temps universel	[heures]
G_0	Rayonnement extraterrestre	[w/m ²]
I_H	Irradiation journalière sur un plan horizontale	[w/m ²]
I_i	Irradiation journalière sur un plan incliné	[w/m ²]
C_s	Rayonnement terrestre sur surface horizontale	[w/m ²]
T_L^*	Facteur de trouble atmosphérique de Link	[-]
ma	Masse d'air optique	[kg]
A_{he}	Est l'alternance hiver-été et « n » le numéro du jour	[-]
T_0	Est le trouble du à l'absorption gazeuse	[-]
T_1	Est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère	[-]
T_2	Est un terme relatif à la diffusion par les aérosols couplée	[-]
D_H	Eclairement dû au rayonnement diffus	[w/m ²]
G_H	Eclairement dû au rayonnement globale	[w/m ²]
E _{ph}	Energie du photon	[eV]
h	Constante de Planck	[J.s]
$Ct-s$	La correction de la constante solaire	[w/m ²]
W'	La hauteur d'eau condensable	[m]

➤ **Lettres grecques :**

δ	Déclination du soleil	[degré]
λ	longitude	[degré]
ω	Angle horaire	[degré]
θ_z	Angle zénithal	[degré]
θ	Angle d'incidence	[degré]
ϕ	Angle d'ouverture	[degré]
ε_a	Angle apparent du soleil	[degré]
ε_c	Emissivité de la couverture	[-]
ε_r	Emissivité de l'absorbeur	[-]
ξ_θ	Facteur d'interception	[-]
ρ_f	Densité volumique du fluide	[Kg/m ³]
γ_f	Viscosité cinématique du fluide	[m ² /s]
ρ	Réflectivité du miroir	[-]
α	Facteur de transmission du verre	[-]
γ	Facteur d'interception	[-]
τ	Absorptivité du tube absorbeur	[-]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[w/m ² k ⁴]
η_{opt}	Rendement optique	[-]
η_{the}	Rendement thermique	[-]
η_{en}	Rendement énergétique	[-]
ω_0	Angle au lever et au coucher de soleil	[degré]
β	Coefficient de trouble d'Angstrom, l'inclinaison	[-]

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil.....	3
Figure.I.2. Coordonnés géographiques terrestres	4
Figure. I.3.coordonnées horaire	6
Figure.I.4. Coordonnées horizontales	7
Figure .I.5. Rayonnement solaire	8
Figure.I.6. Types de rayonnement solaire reçu au sol.	9
Figure.I.7. constante solaire.	10
Figure .I.8. Description du nombre de masse d'air.....	12

Chapitre II :

Figure. II.1. Zones les plus favorables à l'utilisation de l'énergie solaire à concentration.	19
Figure.II.2. Irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu	20
Figure.II.3. Plan de l'utilisation de l'énergie solaire.....	21
Figure II.4.Capteur plan	22
Figure .II.5. Exemple d'énergie solaire photovoltaïque.....	23
Figure.II.6.Schéma global du solaire thermodynamique.....	24
Figure.II.7. les principaux systèmes de concentration	25
Figure.II.8. Les centrales à tour.....	26
Figure.II.9. Les centrales à capteurs paraboliques	27
Figure. II.10.Les centrales solaires à miroir de Fresnel	28
Figure.II.11.Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.....	28
Figure.II.12.Montage d'un capteur cylindro-parabolique suivant la direction nord-sud	29
Figure.II.13. montage d'un capteur cylindro-parabolique suivant la direction est-ouest	30
Figure II.14.Démentions d'un concentrateur cylindro- parabolique.....	30

Figure II.15. Capteur solaire cylindro-parabolique	31
Figure. II.16. Le tube récepteur d'un concentrateur cylindro-parabolique	32
Figure. II.17. Les composantes de base d'une centrale solaire cylindro-parabolique.....	33

Chapitre III :

Figure. III.1. Réflexion et réfraction de la lumière.....	35
Figure. III.2. Schéma de principe d'un concentrateur solaire.....	36
Figure. III.3. Projection sur le plan focal de l'image du soleil	37
Figure. III.4. Angle incidence sur un capteur solaire.....	39

Chapitre IV :

Figure. (IV.1). concentration énergétique et géométrique en fonction de l'angle d'ouverture.	50
Figure. (IV.2). Variation de la concentration en fonction de la température pour différentes valeurs du rendement énergétique.....	51
Figure. (IV.3) Variation du rendement énergétique en fonction de la température pour	
Différentes valeurs de la concentration.....	52
Figure. (IV.4). La déclinaison en fonction de n	53
Figure (IV.5). L'équation du temps en fonction de n	54
Figure (IV.6). Rendement énergétique η_{en} en fonction de la température ambiante T_a	55
Figure .(IV.7). La puissance utile Q_u en fonction de la température d'entrée du fluide T_{fi}	56
Figure .(IV.8). Le flux normal I_n en fonction de TSV	57
Figure .(IV.9). Température de sortie du fluide T_{fs} en fonction de TSV.	58
Figure. (IV.10). la puissance perdue en fonction de TSV.....	59
Figure .(IV.11). Rendement énergétique η_{en} en fonction de TSV.....	60
Figure .(IV.12). Rendement énergétique en fonction de nombre de jours n	61

Figure .(IV.13).Rendement énergétique η_e en fonction d'angle d'ouverture ϕ	62
Figure .(IV.14). Variation de flux normal I_n en fonction d'angle d'incidence.....	63
Figure.(IV.15).Variation de rendement énergétique en fonction d'angle d'incidence.	64

Sommaire

Nomenclature	I
Liste des figures	IV
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Notions sur le rayonnement solaire

I.1. Introduction	3
I.2. Mouvements de la terre	3
I.3. systèmes de coordonnées	3
I.3.1. Coordonnées géographiques	4
I.3.1.1. Altitude A	4
I.3.1.2. Longitude λ	4
I.3.1.3. Latitude L	4
I.3.2. Coordonnées équatoriales	5
I.3.2.1. La déclinaison du soleil δ	5
I.3.2.2. Angle horaire du soleil ω	5
I.3.3. Coordonnées horizontales	6
I.3.3.1. Hauteur du soleil h	6
I.3.3.2. Azimut du soleil a	7
I.4. Le rayonnement solaire	7
I.4.1. Rayonnement hors atmosphère	8
I.4.2. Rayonnement solaire arrivant au sol	8
I.5. La Constante solaire	10
I.6. Irradiation journalière sur un plan horizontal.....	10
I.7. Irradiation journalière sur un plan incliné	11

I.8. La masse d'air	11
I.9. Atténuation du rayonnement solaire	12
I.10. Modèles d'évaluation d'irradiation totale	13
I.10.1 Modèle de Hottel.....	14
I.10.2. Modèle de Capderou	15
I.10.3. Modèle de Kasten.....	16
I.11. Conclusion.....	18

Chapitre II : Types de centrales solaire

II.1.Introduction	19
II.2. L'utilisation de l'énergie solaire dans le monde	19
II.3. Différents filière des énergies solaires	20
II.3.1. Le solaire thermiques	21
II.3.2. énergie solaire photovoltaïque	22
II.3.3. Energie solaire thermodynamique	23
II.3.3.1.Les centrales solaire à tour	25
II.3.3.2. Les centrales solaire à collecteurs paraboliques	26
II.3.3.3. Les centrales solaires à miroir de Fresnel	27
II.3.3.4.Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques :	28
II.3.3.4.1. La Poursuite Solaire	29
II.3.3.4.2.Caractéristiques d'un concentrateur cylindro-parabolique(CCP)	30
II.3.3.4.3. Les composantes du champ solaire	31
II.3.3.4.4.Principales composantes d'une centrale solaire cylindro-parabolique	33
II.3.3.4.5 Principe de fonctionnement d'une centrale à capteurs cylindro-paraboliques	33
II.4. Conclusion	34

Chapitre III : Modélisation mathématique d'un capteur solaire cylindro-parabolique

III.1. Introduction	35
III.2. Notions d'optique géométrique	35
III.2.1. Lois de Descart	35
III.3. La concentration	36
III.3.1. Concentration idéale :	37
III.3.2. Concentration géométrique :	37
III.3.3. Concentration optique.....	38
III.4. Détermination de rendement global :	38
III.4.1 Détermination du rendement optique du concentrateur :	38
III.4.1.1 Angle d'incidence.....	38
III.4.1.2. L'énergie absorbée	40
III.4.1.3. Effet géométrique :	40
III.4.1.4. Effet isentropique	41
III.4.2. Détermination du rendement thermique du concentrateur :	42
III.4.2.1. Les pertes thermiques	42
III.4.2.1.1. Le coefficient d'échange radiatif entre l'absorbeur et la couverture	43
III.4.2.1.2. Coefficient d'échange radiatif entre la couverture et l'environnement	43
III.4.2.1.3. Coefficient d'échange convectif entre la couverture et l'environnement	44
III.4.2.1.4. Le coefficient d'échange convectif absorbeur/fluide caloporteur :	45
III.5. Conclusion.....	46

Chapitre IV : Résultats du programme et discussion

IV.1. Introduction	47
IV.2. Présentation du logiciel EES	47

IV.3. Donnée du problème	48
IV.4. Organigramme de programme.....	49
IV.5. résultats discussion	50
IV.5.1. La variation de la concentration énergétique et géométrique en fonction d'angle d'ouverture.....	50
IV.5.2. Variation de la concentration et de rendement en fonction de la température du tube absorbeur	51
IV.5.3. Déclinaison solaire en fonction du jour de l'année :	53
IV.5.4. La variation de l'équation du temps en fonction du jour de l'année	54
IV.5.5. La variation de rendement énergétique en fonction de température ambiante :	55
IV.5.6. La variation de la puissance utile en fonction de température d'entrée du fluide : ..	56
IV.5.7. La variation de flux normal, température de sortie du fluide et la puissance perdue en fonction du temps solaire vrai (TSV):	57
IV.5.8. la variation de rendement énergétique en fonction de temps solaire vrai :	60
IV.5.9. Variation du rendement énergétique en fonction de nombre de jours (n).....	61
IV.5.10. L'influence d'angle d'ouverture sur le rendement énergétique	62
IV.5.11. L'influence d'angle d'incidence sur le flux normal, et le rendement énergétique	63
Conclusion générale.....	64
Références bibliographiques.....	65
Annexes.....	69

Introduction générale :

Une importance particulière est en train d'être accordée à la recherche dans le domaine des énergies renouvelables, ceci pour plusieurs causes qui peuvent être principalement résumées, d'une part, en la croissance accrue de la demande mondiale en énergie conventionnelle et ses problèmes d'approvisionnement, et d'autre part, en l'élévation de son coût et la pollution qu'elle provoque. L'eau, le soleil, le vent, les végétaux, les marées, la chaleur de la terre peuvent fournir de l'énergie propre qui favorise un développement durable.

Parmi les sources utilisées pour le remplacement des énergies produites des combustibles fossiles, on retrouve le soleil qui représente la source primaire de production d'énergie.

En Algérie, le rayonnement globale reçu dans différents sites avec ou sans altitudes, de climats méditerranéens ou sahariens, est l'un des plus élevés du monde [1]. En plus ces régions bénéficient des qualités exceptionnelles pour valoriser l'énergie solaire sous les formes les plus variées. D'un autre côté il est intéressant d'envisager toutes les possibilités considérables pour l'exploitation de cette source solaire pour des utilisations industrielles.

L'optimisation des dispositifs solaires est parmi les solutions recommandées afin de renverser la tendance actuelle et voir l'utilisation de l'énergie solaire se répandre davantage dans le monde. L'énergie produite par le soleil suite à la réaction de fusions nucléaires est rayonnée et émise dans toutes les directions et reçue par la terre.

Ce flux solaire est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption ou diffusion, suivant les conditions météorologiques et la latitude du lieu.

L'énergie solaire est une source d'énergie naturelle, on peut la capter par des moyens basés sur des techniques différentes comme les panneaux photovoltaïques les capteurs thermiques les collecteurs thermodynamique.

L'objectif de ce travail est d'élaborer un programme de calcul du rendement énergétique d'un collecteur cylindroparabolique à l'aide d'un logiciel de calcul numérique "EES".IL est subdivisé en quatre chapitres articulés comme suit :

- Le premier chapitre, consiste à l'étude du gisement solaire avec une présentation de quelques notions et définitions astronomiques.

- Le deuxième chapitre, consiste à présenter les différents types de centrales solaires
 - Troisième chapitre, est consacré à la modélisation mathématique du cylidro-parabolique
 - Quatrième chapitre, consiste à établir un programme de calcul et analyse des résultats
- En fin, on termine notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :
Notions sur le rayonnement
solaire

I.1. Introduction :

L'énergie solaire est la ressource énergétique renouvelable la plus abondante.

Cette énergie est émise dans toutes les directions par le soleil grâce au rayonnement solaire.

Afin d'exploiter au mieux cette ressource énergétique et pour un bon dimensionnement des installations solaires, il est nécessaire de connaître les notions de base du rayonnement solaire.

I.2. Mouvements de la terre :

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers, le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique

L'excentricité de cette ellipse est faible, ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de $149\,675\,10^6$ km. [2]

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison, de l'ordre de $23^{\circ}27'$

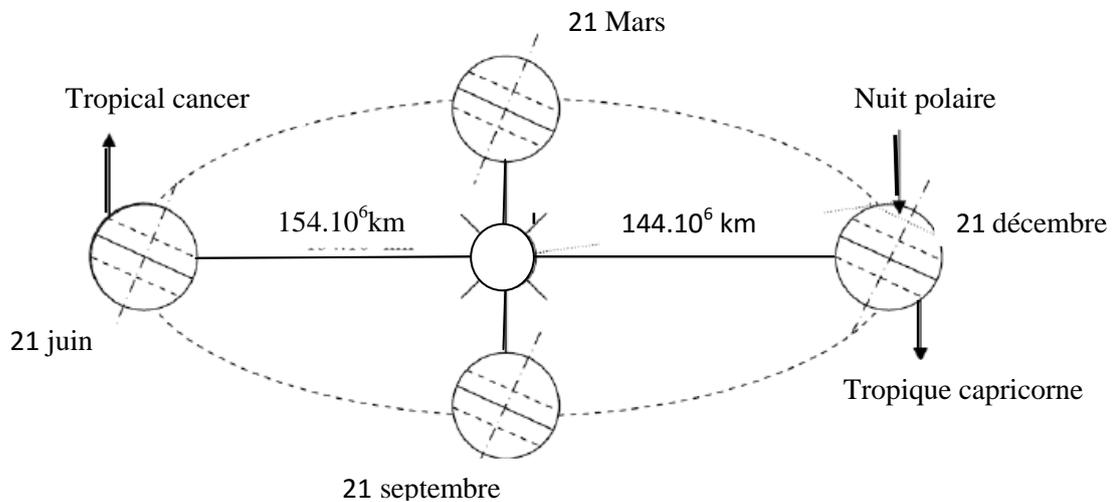


Figure I.1 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil [2]

I.3. systèmes de coordonnées :

Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voute céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre.

I.3.1. Coordonnées géographiques :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

I.3.1.1. Altitude A :

L'altitude exprime un écart entre un point donné et un niveau moyen, le plus souvent le niveau de la mer (ou niveau 0), mesuré en mètre (m).

I.3.1.2. Longitude λ :

La longitude est l'angle déterminé par le méridien du lieu et le méridien de Greenwich, elle est comptée de 0° à 180° , positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest.

I.3.1.3. Latitude L :

C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère sud.

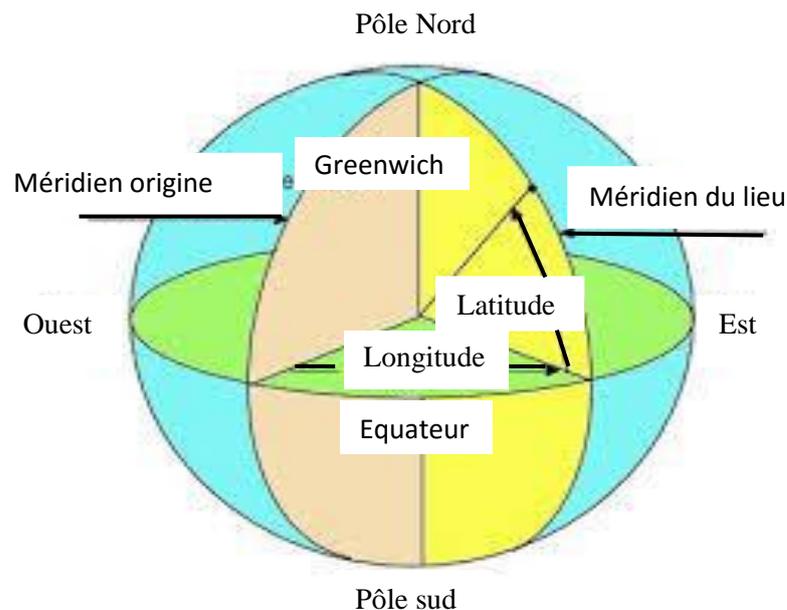


Figure.I.2. Coordonnées géographiques terrestres [3]

I.3.2. Coordonnées équatoriales :

Le mouvement du soleil est repéré par rapport à un plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles, la déclinaison δ et l'angle horaire ω .

I.3.2.1. La déclinaison du soleil δ :

La déclinaison est l'angle que fait la direction d'observation du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. Elle est exprimée en degrés, minute et seconde. Cet angle varie tout au long de l'année de façon symétrique de $-23^{\circ} 26'$ (solstice d'hiver le 22 décembre) à $23^{\circ} 26'$ (solstice d'été le 21 juin) et il est nul aux équinoxes (21 mars et 23 septembre).

Il peut être obtenu par la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \sin \left[2\pi \left(\frac{284+n}{365} \right) \right] \quad (\text{I.1})$$

n : est le numéro de jour de l'année à partir du premier Janvier.

I.3.2.2. Angle horaire du soleil ω :

C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, mesure la course du soleil dans le ciel.

L'angle horaire $\omega(^{\circ})$ est donné par la formule suivante :

$$\omega = 15(\text{TSV} - 12) \quad (\text{I.2})$$

TSV : est le temps solaire vrai en heure, se calcule par l'équation suivante ;

$$\text{TSV} = \text{TU} + \frac{L}{15} + \text{ET} \quad (\text{I.3})$$

$$\text{ET} = 9.8 \sin(2B) - 7.53 \cos B - 15 \sin B \quad (\text{I.4})$$

$$B = 2\pi \left(\frac{n-81}{365} \right) \quad (\text{I.5})$$

TU : Est le temps universel du méridien de GREENWICH (GTM) ;

ET : Equation du temps ;

B : Exprimé en radians, dépend du numéro de jour de l'année .

L'angle horaire au coucher est tout simplement l'opposé de l'angle horaire au lever.

Cette formule n'est pas valable pour les heures de lever et de coucher du soleil, il faut ainsi déterminer l'angle solaire du coucher, et au lever qui dépendent de la déclinaison et de la latitude du lieu

$$\omega_0 = \arcsin(-\tan(\delta) \tan(L)) \quad (\text{I.6})$$

L'angle solaire au coucher est tout simplement l'opposé de l'angle solaire au lever.

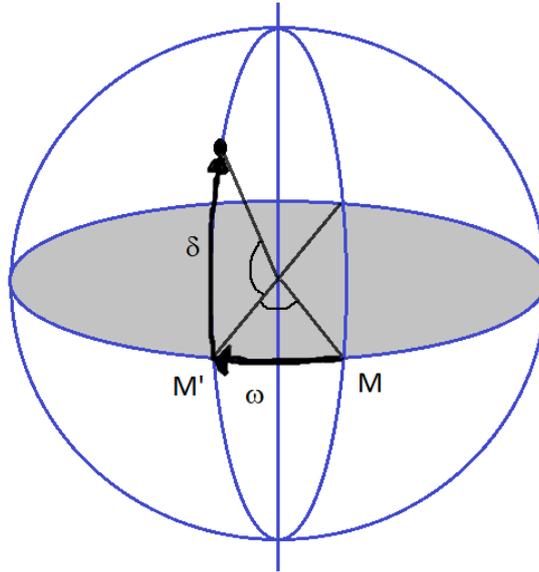


Figure. I.3.Coordonnées horaire [3]

I.3.3. Coordonnées horizontales :

Les coordonnées horizontales dépendent du lieu d'observation. Elles ont comme plan de référence le plan horizontal, perpendiculaire à la verticale du lieu. Un objet est repéré dans ce système de coordonnées par les composantes suivantes :

I.3.3.1. Hauteur du soleil h :

La hauteur angulaire du soleil, est l'angle compris entre la direction apparente du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu considéré. Sa valeur est nulle au lever et au coucher du soleil est maximale lorsque le soleil est au zénith. Elle varie au cours de la journée en fonction de la déclinaison δ de l'angle horaire ω , et de la latitude L , telle que :

$$\sin h = \cos \delta \cos \omega \cos L + \sin \delta \sin L \quad (\text{I.7})$$

I.3.3.2. Azimut du soleil a :

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction Sud ou Nord. Il est mesuré commençant par le Nord au par le Sud, soit vers l'Est soit vers l'Ouest, à travers un axe de 360° (l'azimut est compris entre -180° et +180°).

Dans l'hémisphère Nord, l'origine des azimuts correspond à la direction du Sud. L'angle azimutal est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est.

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (I.8)$$

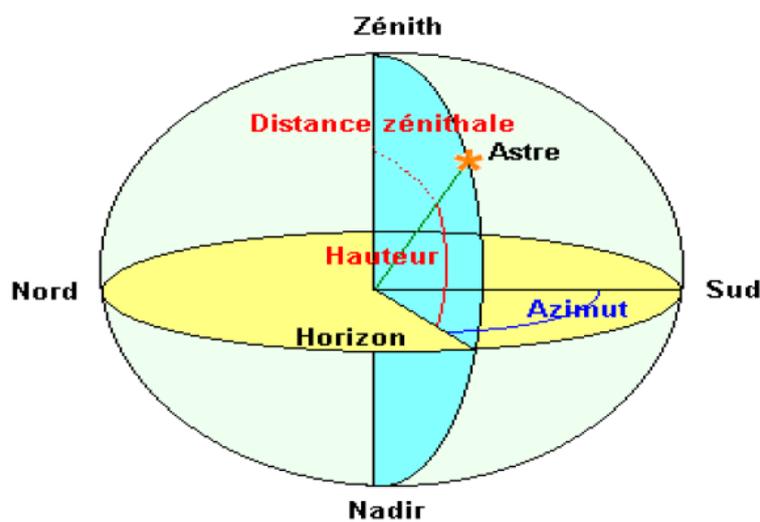


Figure.I.4. Coordonnées horizontales [4]

I.4. Le rayonnement solaire :

Le soleil émet en permanence, dans toutes les directions de l'espace, des rayonnements électromagnétiques composés de « grains » de lumière appelés photons. Ces rayonnements se propagent à la vitesse de la lumière C ; il lui faut donc en moyenne 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère. L'énergie, E_{ph} , de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ' .

$$E_{ph} = \frac{h'c}{\lambda'}$$

Où h' est la constante de Planck, $h' = 6.62.10^{-34}$ J.s

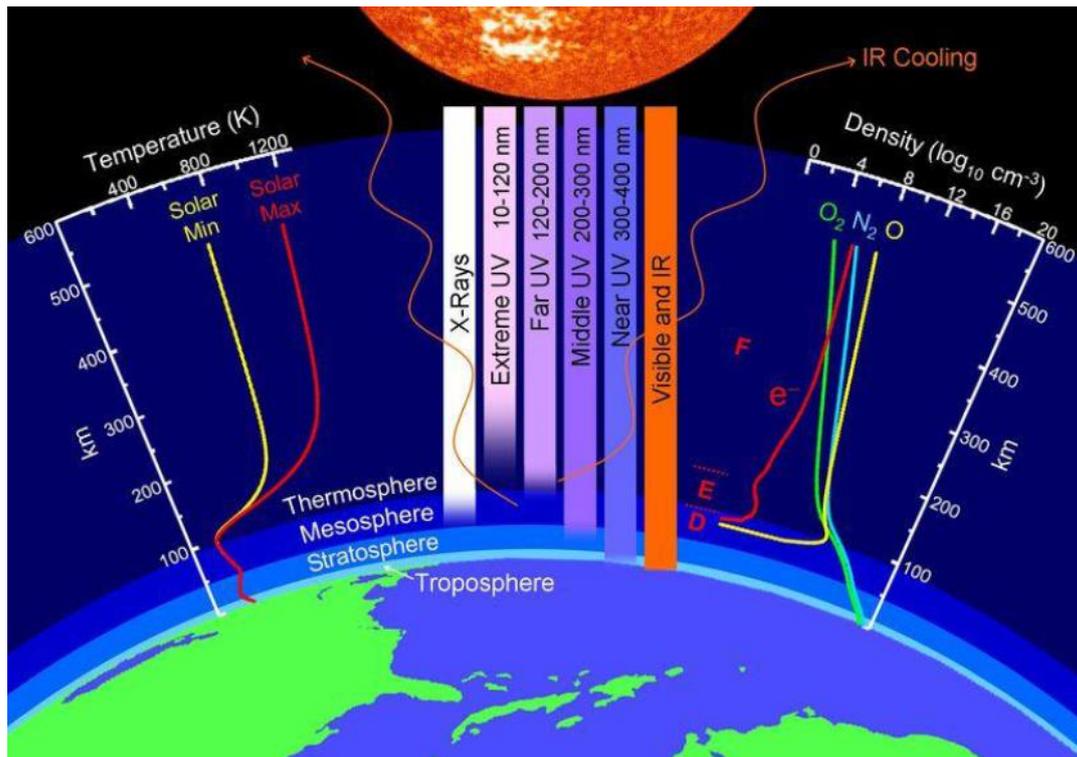


Figure I.5. Rayonnement solaire [5]

I.4.1. Rayonnement hors atmosphère [6]

Le rayonnement solaire extraterrestre couvre un très large domaine de longueurs d'ondes. Il ne dépend d'aucun paramètre météorologique, mais il est en fonction de quelques paramètres astronomiques et géographiques tels que : la latitude du lieu (L), la déclinaison solaire (δ) et l'angle horaire au coucher du soleil (ω_0). Sur une surface horizontale, et pour le jour n , le rayonnement extraterrestre G_0 est obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$G_0 = \frac{86400 I_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.034 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \right] [\omega_0 \sin L \sin \delta + \cos L \sin \delta \sin \omega_0] \quad (I.9)$$

I_{sc} : est la constante solaire égale 1367 w/m^2

n : est nombre du jour à partir du premier Janvier.

I.4.2. Rayonnement solaire arrivant au sol:[6]

Le calcul et les mesures par satellite montrent que la terre, qui est située à environ 150 millions de kilomètres du soleil, reçoit de sa part un rayonnement d'une puissance moyenne de 1000 W/m^2 , c'est la puissance reçue par une unité de surface qui serait perpendiculaire aux rayonnements juste au-dessus de l'atmosphère terrestre (à midi en temps sec, clair). En

traversant l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est absorbé ou diffusé, on distingue plusieurs composants:

➤ **Rayonnement direct**

C'est le rayonnement reçu directement du soleil. C'est ce type de rayonnement qui est utilisé dans les systèmes à concentration (centrales solaires thermodynamique : tour, fresnel, parabolique...)

➤ **Rayonnement diffus :**

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu).

➤ **Rayonnement réfléchi (albédo) :**

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

➤ **Rayonnement global :**

C'est la somme du rayonnement direct et diffus, c'est celui-ci qui est utilisé pour faire fonctionner les panneaux solaire thermique et photovoltaïque.

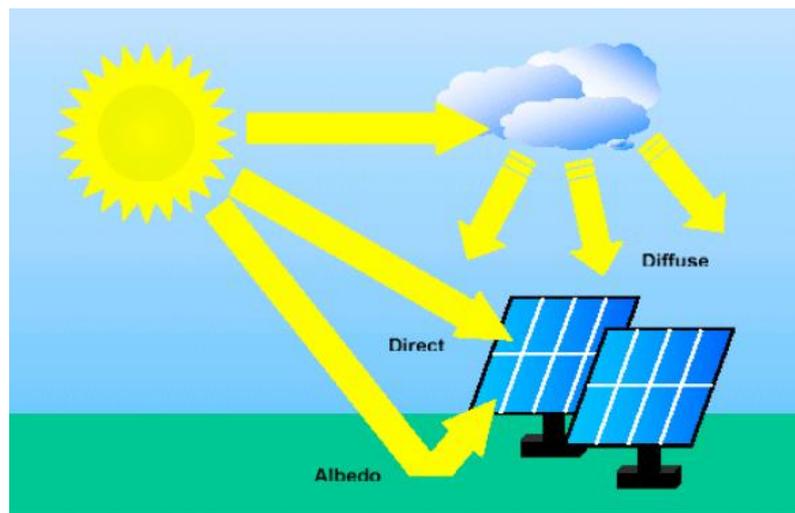


Figure.I.6. Composantes du rayonnement solaire reçu au sol [7].

I.5. La Constante solaire : [8]

La valeur de flux du rayonnement solaire reçu par une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite de l'atmosphère terrestre. Soit environ 80 km d'altitude, varie au cours de l'année avec la distance terre/soleil. Sa valeur moyenne est appelée la constante solaire.

$$I_{sc}=1367 \text{ W/m}^2$$

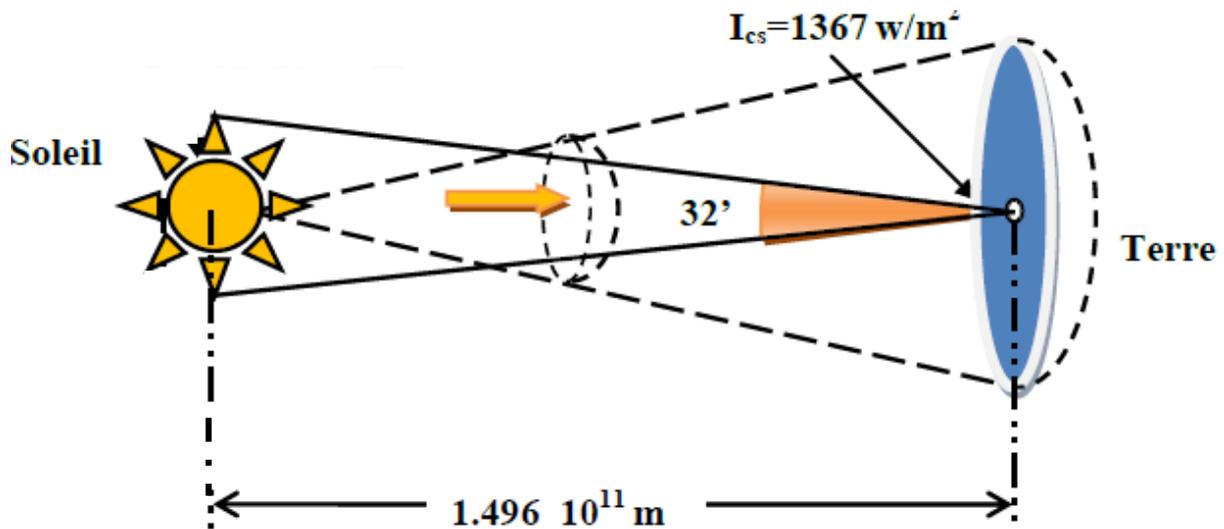


Figure.I.7. Constante solaire [8]

I.6. Irradiation journalière sur un plan horizontal : [9]

L'irradiation journalière sur un plan horizontal correspond au cumule journalier de l'éclairement solaire que reçoit une surface unitaire horizontale. Ce qui se traduit mathématiquement par l'intégration de l'éclairement horizontal pendant une journée (du lever au coucher du soleil). Ainsi, l'irradiation journalière sur un plan horizontal est obtenue par la relation suivante :

$$I_H = \int_{LeS}^{CoS} I_{sc} \cdot \sin(h) dt \quad (I.10)$$

Où : LeS , CoS correspondent respectivement aux heures de lever et coucher du soleil.

En remplaçant $\sin(h)$ par son expression donnée par la relation (I.7), on aura :

$$I_H = I_{sc} \cdot \int_{LeS}^{CoS} (\cos \delta \cdot \cos L \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin L) \quad (I.11)$$

Pour une journée et un lieu donné, δ et L sont fixés. D'autre part, une heure de temps correspond à une variation de 15° de l'angle horaire ω :

$$dt = \frac{12}{\pi} d\omega$$

Avec le temps t en heure et l'angle horaire ω en radians. L'intégration donne alors :

$$I_H = \frac{24}{\pi} I_{SC} \cdot (\sin\delta \sin L \cdot \omega_0 + \cos\delta \sin L \sin \omega_0) \quad (\text{I.12})$$

Avec : ω_0 est l'angle horaire au lever du soleil.

I.7. Irradiation journalière sur un plan incliné [9] :

Dans le cas où le plan est incliné d'un angle β par rapport à l'horizontale et orienté d'un angle α par rapport au Sud, alors, l'éclairement extraterrestre sur un plan d'inclinaison et d'orientation donnée, est comme suit :

$$I_i = \frac{24}{\pi} I_{SC} \cdot (\sin\delta \sin(L - \beta) \cdot \omega'_0 + \cos\delta \cdot \cos(L - \beta) \cdot \sin\omega'_0) \quad (\text{I.13})$$

Avec :

$$\omega'_0 = \text{arc}(-\tan\delta \cdot \tan(L - \beta)) \quad (\text{IV.14})$$

I.8. La masse d'air : [10]

On appelle masse d'air AM , la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. Elle est donnée en fonction de l'angle entre le soleil et le zénith.

$$AM \approx \frac{1}{\sin\theta_z}$$

Où :

θ_z : angle zénithal, en (Degré).

Le spectre solaire AM_0 correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement arrivant Au-dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, AM_1 pour un soleil vertical à la terre (le soleil est au zénith), et $AM_{1.5}$ pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith

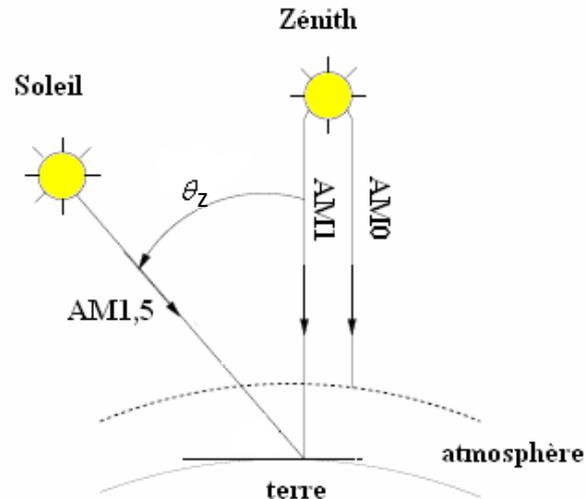


Figure I.8. Description du nombre de masse d'air [10]

I.9. Atténuation du rayonnement solaire :

L'atmosphère modifie le spectre du rayonnement solaire à travers les processus d'absorption par les différents gaz, la diffusion par les molécules d'air, les aérosols et les nuages.

a) L'absorption atmosphérique :

L'absorption par les gaz atmosphériques est dite sélective, car elle n'affecte que des radiations de longueurs d'ondes bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau (H_2O), à l'ozone (O_3), à l'oxygène (O_2), et au gaz carbonique (CO_2).

La vapeur d'eau qui est le constituant le plus important après l'air, présente plusieurs bandes d'absorption situées à des longueurs d'ondes supérieures à $0.65 \mu m$ [11]. La bande allant de 2.4 à $2.8 \mu m$ est la plus large ; de plus, à ce niveau, l'absorption est la plus forte. L'absorption propre à la vapeur d'eau est d'environ 10%. [12]

L'ozone est le principal absorbant dans l'ultraviolet. Il est caractérisé par une forte bande d'absorption à des longueurs d'ondes inférieures à $0.3 \mu m$ et une faible absorption entre 0.45 et $0.7 \mu m$.

L'oxygène a deux bandes étroites de faible atténuation dans le visible à 0.69 et $0.76 \mu m$. Le gaz carbonique absorbe le rayonnement dans cinq bandes se trouvant respectivement à 1.46 , 1.60 , 2.04 , 2.75 et $4.27 \mu m$.

b) La diffusion :

La diffusion est une redistribution du rayonnement solaire qui interagit avec les molécules gazeuses. Selon la taille des particules diffusantes par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident, on distingue deux types de diffusion : la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie.

La diffusion de Rayleigh affecte surtout les molécules d'air pur et sec comme l'azote et l'oxygène. C'est une diffusion sélective causée par les particules dont le diamètre est très inférieur à la longueur d'onde incidente. En moyenne, en prenant en compte la course du soleil et les différentes longueurs d'onde, environ 13% de rayonnement solaire incident subissent la diffusion de Rayleigh [13].

La diffusion de Mie désigne la diffusion par les particules dont la taille est de même ordre de grandeur que les longueurs d'onde, comme pour la vapeur d'eau et les aérosols.[14]

Les phénomènes d'absorption et de diffusion par les nuages réduisent considérablement le rayonnement reçu au sol surtout pour les longueurs d'ondes supérieures à 1 μ m. Les nuages sont constitués des particules dont les dimensions sont notablement supérieures aux longueurs d'ondes ultraviolets et visibles. La diffusion par les nuages est indépendante de la longueur d'ondes [15]. Le taux d'atténuation par les nuages dépend essentiellement de leur épaisseur. Leur nature et leur distribution dans le ciel. Une couche de nuage, aussi mince que possible peut renvoyer le rayonnement incident vers l'atmosphère. Quant à l'absorption du rayonnement par les nuages, elle est moins marquée. Les nuages les plus épais n'absorbent qu'environ 8% de l'énergie incidente.

I.10. Modèles d'évaluation d'irradiation totale :

Il existe plusieurs modèles pour l'estimation de l'éclairement solaire global, direct et diffus exprimés par des approches semi empiriques, les modèles les plus utilisés sont : le modèle de Hottel Capderou, et Kasten. Ces trois modèles donnent plus ou moins l'évolution de l'irradiation solaire sur un plan horizontal ou sur un plan incliné.

I.10.1 Modèle de Hottel :[16]

Ce modèle considère la notion d'atmosphère normalisée, définie par les concentrations des gaz, les conditions de pression, de température, d'humidité, de concentration de particules et des propriétés optiques. Ce modèle est valable pour des altitudes inférieures à 2.5 Km.

- L'intensité du rayonnement direct incident disponible à l'emplacement du capteur est estimé (en fonction de l'altitude A du lieu et de l'angle zénithal (θ_z) par :

$$I = C_s \cdot \tau_D \cdot \cos(\theta_z) \quad (\text{I.15})$$

$$\text{Où} \quad C_s = I_{sc} \left(1 + 0.034 \cos \left[\frac{360}{365} (n - 2) \right] \right)$$

C_s : Rayonnement terrestre sur une surface horizontale.

L'angle zénithal θ_z est l'angle entre la ligne de mire du soleil et la verticale du plan considéré.

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta) \cos(L) \cos(\omega) + \sin(L) \sin(\delta) \quad (\text{I.16})$$

$$\cos\theta = \sqrt{\cos^2\theta_z + \cos^2\delta \cdot \sin^2\omega} \quad (\text{I.17})$$

$$\tau_D = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-a_2}{\cos(\theta_z)}\right) \quad (\text{I.18})$$

Avec:

$$a_0 = a_0^* \cdot r_0 \quad (\text{I.19})$$

$$a_1 = a_1^* \cdot r_1 \quad (\text{I.20})$$

$$a_2 = a_2^* \cdot r_2 \quad (\text{I.21})$$

Les constantes suivantes sont relatives à une qualité standard de l'atmosphère.

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2$$

$$a_1^* = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2$$

$$a_2^* = 0.2711 - 0.01858(2.5 - A)^2$$

	r_0	r_1	r_2
Tropical	0.95	0.98	1.02
Midlatitude summer	0.97	0.99	1.02
Subarctic summer	0.99	0.99	1.01
Midlatitude winter	1.03	1.01	1.00

I.10.2. Modèle de Capderou : [17]

Le modèle de Capderou utilise le trouble atmosphérique pour estimer les composantes directe et diffuse de l'éclairement reçu sur un plan incliné. L'absorption et la diffusion provoquées par les constituants de l'atmosphère sont représentées par des facteurs de troubles. A partir de ces facteurs, on peut formuler les éclaircissements direct et diffus par ciel clair

En effet, Pour calculer l'angle horaire et la déclinaison, Capderou, dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, a utilisé les relations suivantes :

$$\omega = 15(TSV - 12)$$

$$\sin(\delta) = 0,398 \cdot \sin \left\{ \frac{360}{365} \cdot (n - 82) + 2 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (n - 2) \right] \right\}$$

L'azimut du soleil est donné:

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta)\cos(h)\sin(L) - \sin(\delta)\cos(L)}{\cos(h)}$$

Le facteur de trouble atmosphérique de Linke T_L^* par ciel clair est exprimé par la relation suivante:

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (I.22)$$

T_0 : est le trouble du à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixe de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau de quantité variable. Il est donné par la relation suivante:

$$T_0 = \frac{9.4 + 0.9 m_a}{m_a} \alpha_e \quad (I.23)$$

α_e : Représente le coefficient d'extinction après absorption par la vapeur d'eau.

m_a : La masse d'air optique (masse atmosphérique), qui représente la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer .Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations .Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante:

$$m_a = \frac{\text{pression}}{1013,25} \frac{1}{\sin(h) + 9.40 \cdot 10^{-4} \cdot [\sin(h) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (I.24)$$

La modélisation de ce paramètre en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques à permis à Capderou de proposer l'expression suivante :

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(L) + 0.1(2 + \sin(L))A_{he} - 0.2a - (1.22 + 0.14A_{he})(1 - \sin(h)) \quad (I.25)$$

$$A_{he} = \sin \left[\left(\frac{360}{365} \right) (n - 121) \right] \quad (I.26)$$

A : l'altitude de lieu.

A_{he} : est l'alternance hiver-été et n le numéro du jour.

T_1 : est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 et O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh. Il est normalement égal à 1, mais si on prend en compte l'effet de l'altitude du site, il est approché par la formule :

$$T_1 = (0.89)^A \quad (I.27)$$

Le trouble partiel T_2 est un terme relatif à la diffusion par les aérosols couplée à une légère absorption, qui dépend à la fois de la nature, des dimensions et de la quantité des aérosols. Il est donné en fonction du coefficient de trouble d'Angstrom β par l'expression suivante :

$$T_2 = 16\beta$$

A défaut de mesures du coefficient de trouble d'Angström, Capderou a adopté la formulation suivante :

$$T_2 = (0.9 + 0.4A_{he})(0.63)^A \quad (I.28)$$

- L'éclairement dû au rayonnement direct obtenu sur plan horizontal dépend uniquement du facteur de trouble de Linke. Il est donné par :

$$I_H = I_{SC} C_{t-e} \sin(h) \exp \left[-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^a} \sin(h) \right)^{-1} \right] \quad (I.29)$$

C_{t-s} : La correction de la constante solaire

$$C_{t-s} = 1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360}{365} n$$

- L'éclairement dû au rayonnement diffus obtenu sur plan horizontal dépend également du facteur de trouble diffusif : $T_1 + T_2 = T_L^* - T_0$. Il est donnée par :

$$D_H = I_{SC} \exp[-1 + 1.06 \log(\sin(h))] + a - \sqrt{a^2 + b^2} \quad (I.30)$$

$$a = 1.1 \quad (I.31)$$

$$b = \log(T_L^* - T_0) - 2.8 + 1.02(1 - \sin(h))^2 \quad (I.32)$$

- L'éclairement global incident sur un plan horizontal G_H est par conséquent la somme des deux rayonnements :

$$G_H = I_H + D_H \quad (\text{I.33})$$

I.10.3. Modèle de Kasten : [18]

D'après cette approche et sur une surface inclinée d'un angle (β) par rapport à l'horizontale et orienté d'un angle (γ) par rapport au sud, l'éclairement direct I est donné par :

$$I_{(\beta,\gamma)} = I_1(\sin\beta \cdot \cos(a - \gamma) + \cos\beta \cdot \sin h) \quad (\text{I.34})$$

Avec :

a : l'azimut

h : la hauteur angulaire

Pour estimer l'éclairement solaire I_1 , Kasten propose l'expression ci-dessous. Cette dernière tient compte du facteur de trouble atmosphérique T_L et de trajet optique atmosphérique m_h

$$I_1 = (I_0)_{\text{ext}} \exp\left[\frac{-m_h \times T_L}{0.9m_h + 9.4}\right] \quad (\text{I.35})$$

Avec :

$$(I_0)_{\text{ext}} = I_{SC} \left[1 - \frac{\sin\delta}{11.7}\right]$$

$$T_L = 2.5 + 16\beta + 0.5\ln(w)$$

β : Le coefficient d'angström

w : La hauteur d'eau condensable

Le tableau suivant, présente les valeurs de β et w pour trois états atmosphériques différents :

	β	w
Ciel pur	0.05	1
Ciel moyen	0.1	2
Ciel dégradé	0.2	5

Valeurs du coefficient d'angströms et de la hauteur d'eau condensable pour trois états atmosphériques

- La distance optique atmosphérique (la masse atmosphérique) est exprimée par la formule :

$$m_h = \frac{1-0.1A}{\sinh+0.15(h+3.885a)^{-1.253}} \quad (\text{I.36})$$

A : l'altitude du lieu (km)

- L'éclairement diffus $D(\beta)$ est donné par la relation :

$$D_\beta = \left[\frac{1+\cos\beta}{2} \right] D_H + \left[\frac{1+\cos\beta}{2} \right] a^* G_H \quad (\text{I.37})$$

- D_H : le rayonnement diffus reçu par un plan horizontal donné par :

$$D_H = \frac{(I_0)_{ext}}{25} \sqrt{\sin(h)} [T_L - 0.5 - \sqrt{\sin(h)}] \quad (\text{I.38})$$

- G_H : le rayonnement global reçu par un plan horizontale donné par :

$$G_H = (1270 - 56T_L) \sqrt{\sin h}^k \quad (\text{I.39})$$

Avec : $k = \frac{T_L+36}{33} \quad (\text{I.40})$

I.11. Conclusion :

Le rayonnement reçu par un capteur dépend de l'intensité du rayonnement de site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

L'étude du rayonnement solaire est indispensable pour le choix du site en vue d'une installation des centrales solaire.

Chapitre II:
Types de centrales
solaire

II.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes techniques et moyens de conversion de l'énergie solaire en une autre forme d'énergie et le principe de fonctionnement de chaque technique.

II.2. L'utilisation de l'énergie solaire dans le monde :

Les zones les plus favorables à l'utilisation de l'énergie solaire concentrée sont celles où l'ensoleillement direct est supérieur à 1 900 kWh/m²/an [19]. Les régions adaptées sont très nombreuses et recèlent un potentiel très important. Elles se situent principalement en Afrique du Nord ,et septentrionale au Proche et Moyen-Orient, en Australie, dans le sud-ouest des États-Unis, en Inde et encore en Asie centrale. Figure II .1

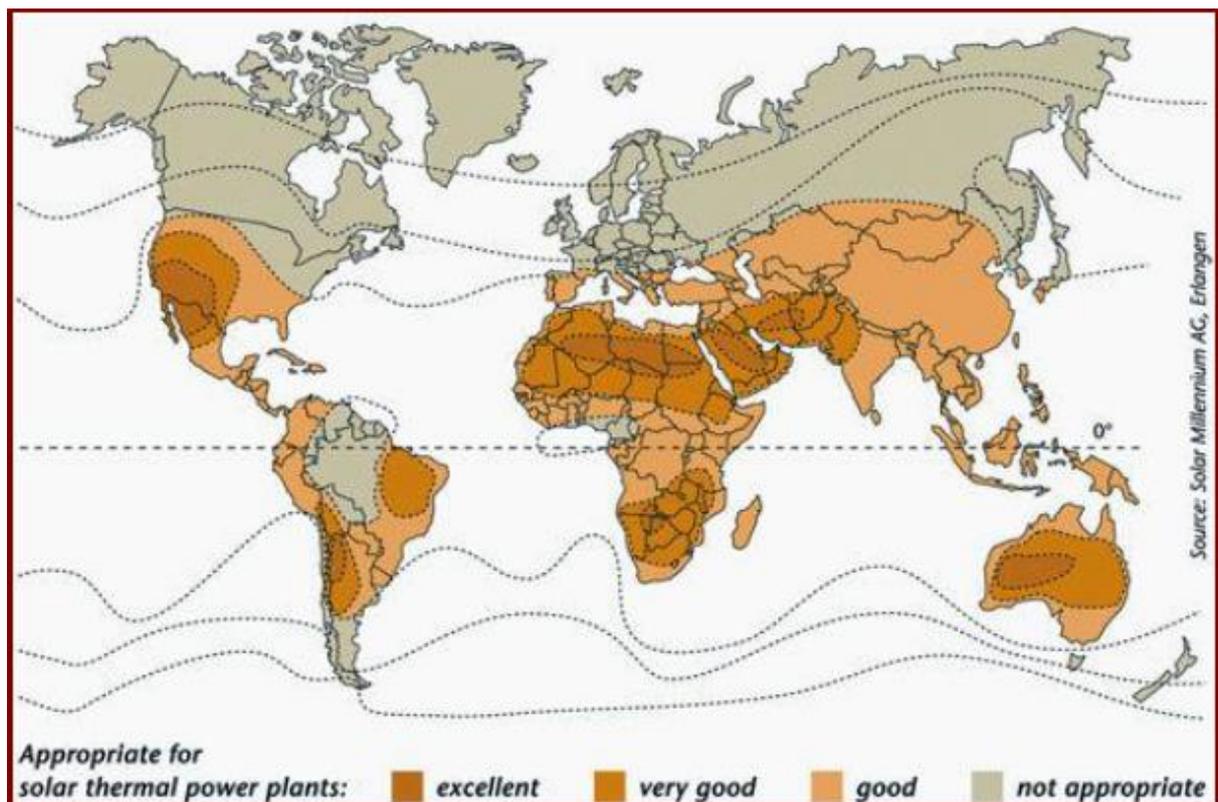


Figure. II. 1. Zones les plus favorables à l'utilisation de l'énergie solaire à concentration [19].

L'Algérie possède un gisement solaire parmi les gisements les plus élevés dans le monde. La durée moyenne d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de 3500 heures. Ce potentiel

peut constituer un facteur important de développement durable dans cette région s'il est exploité de manière économique [20].

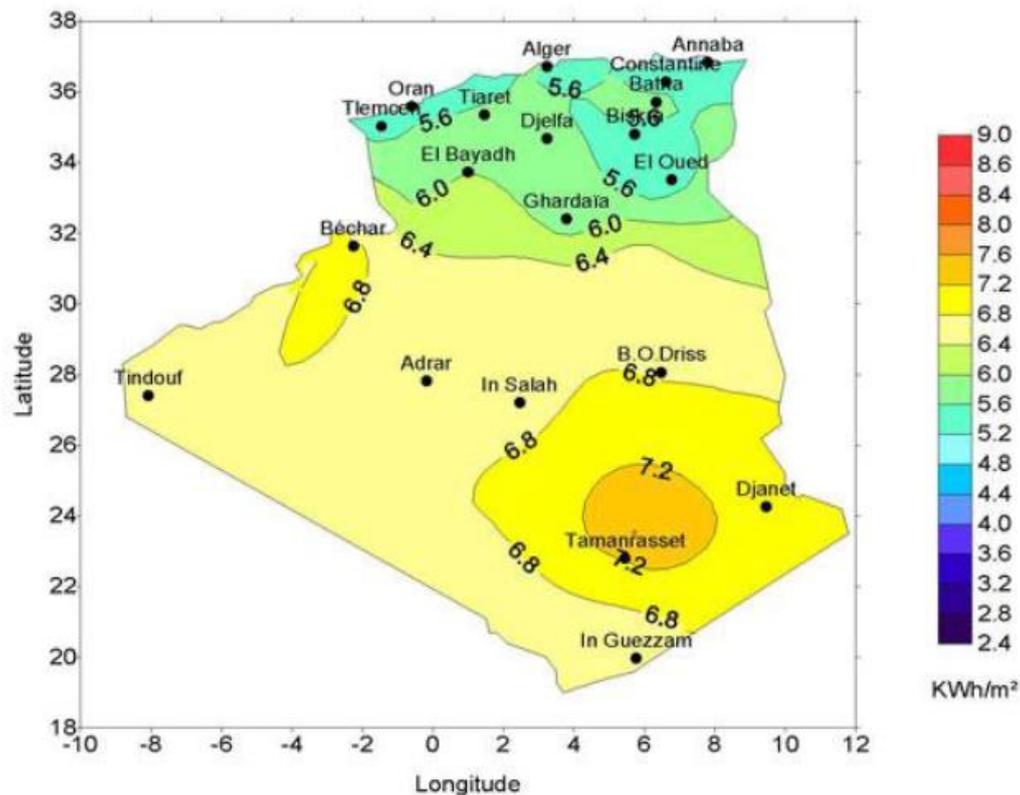


Figure.II.2. Irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [20].

II.3. Différents filière des énergies solaires:

Dans le domaine de l'énergie solaire on distingue plusieurs filières à savoir, le solaire thermique, le solaire thermodynamique et le solaire photovoltaïque.

Le principe de fonctionnement de ces filières diffère d'une technologie à une autre. Dans chaque filière on utilise des composants bien appropriés. Figure II.3

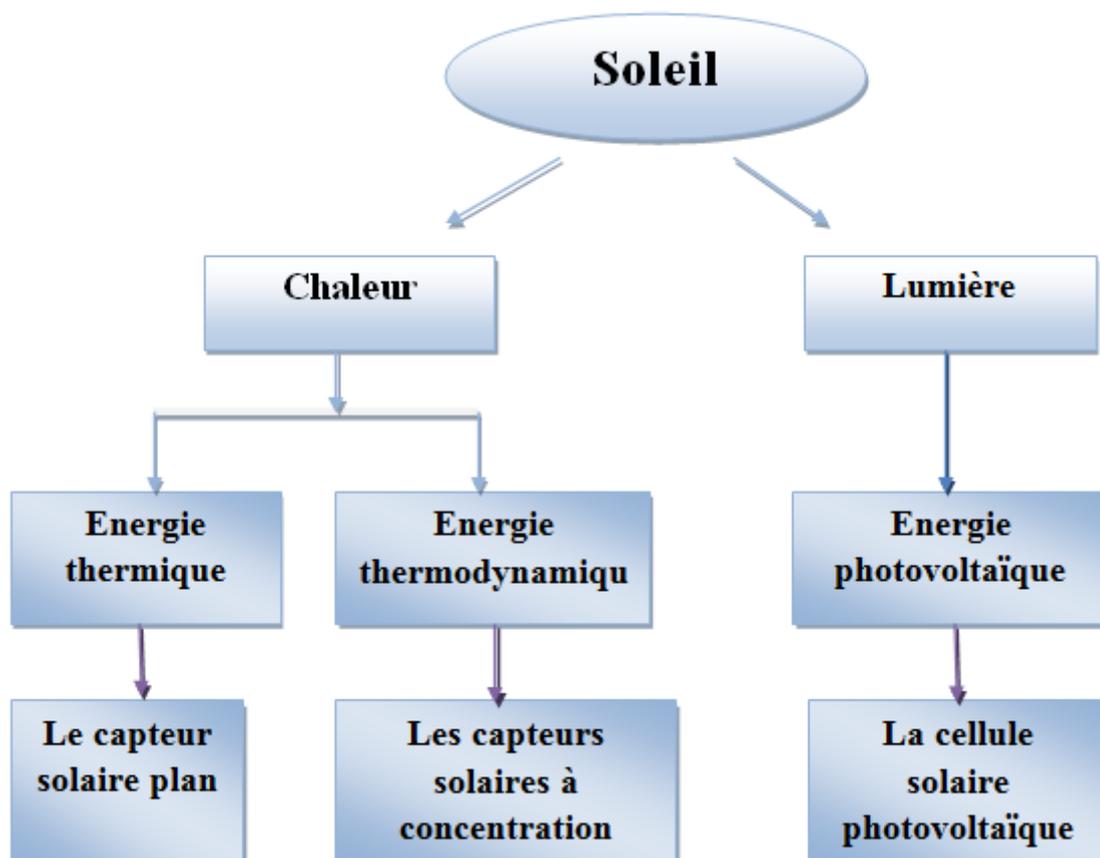


Figure II.3. Plan de l'utilisation de l'énergie solaire.

II.3.1. Le solaire thermique :

La conversion thermique de l'énergie du rayonnement solaire se fait par l'intermédiaire des capteurs solaires. Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du soleil et le transmettre à un fluide caloporteur. On distingue deux familles de capteurs solaires :

1-Les capteurs solaires plans, ils transforment l'énergie solaire en énergie thermique à basse température, généralement la température au niveau de la surface absorbante ne dépasse pas 130°, sans concentré le rayonnement. Ces dispositifs utilisent les composantes direct et diffus de rayonnement incident. Ils sont employés principalement pour la production d'eau chaude et le chauffage d'habitation ou de piscines.

2-La deuxième famille de capteur solaire est celle des concentrateurs solaire. Ces éléments permettent d'atteindre des températures plus élevées que celle rencontrées dans les capteurs

plans. L'énergie solaire convertie par ces concentrateurs solaire s'appelle solaire thermodynamique on détaillera par la suite.

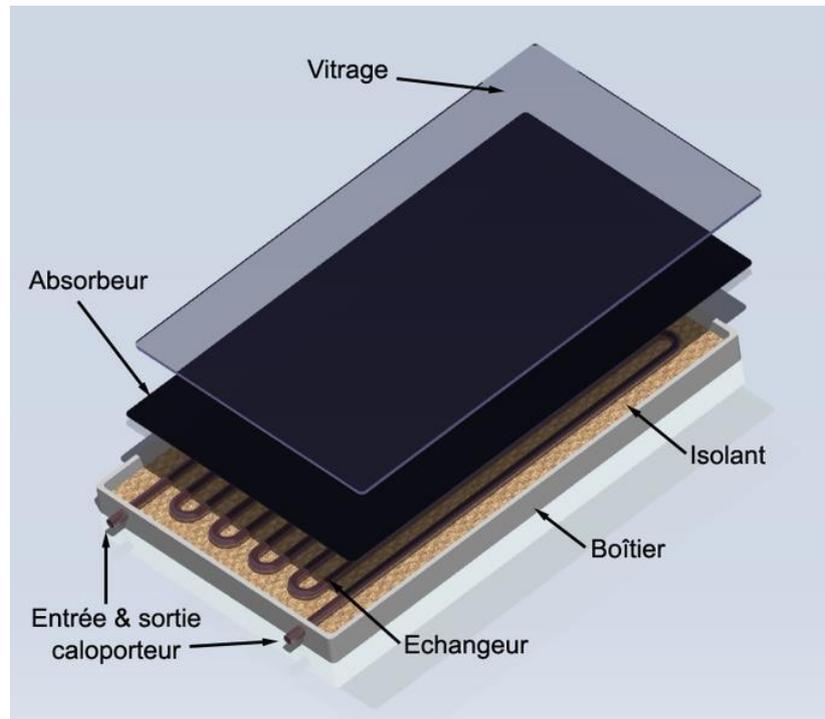


Figure II.4. Capteur plan [21]

II.3.2. Energie solaire photovoltaïque :

Est la transformation directe de la lumière en électricité à l'échelle atomique par des panneaux solaire constitués des matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, ils ont une capacité de transformer la lumière (Photons) en électricité (électrons). Le principe de cet effet est que la collision entre un photon et un semi-conducteur (silicium) produit des charges positives et négatives qui engendrent un courant. Le silicium est utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques qui produisent un courant continu. Pour être injecté dans le réseau, il doit être transformé en courant alternatif à travers un onduleur.



Figure .II.5. Exemple d'énergie solaire photovoltaïque [22]

II.3.3. Energie solaire thermodynamique :

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire n'est pas un processus direct. Le principe est de produire des températures exploitables pour les dispositifs thermodynamique de conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique puis électrique. Pour cela, le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne.

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

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

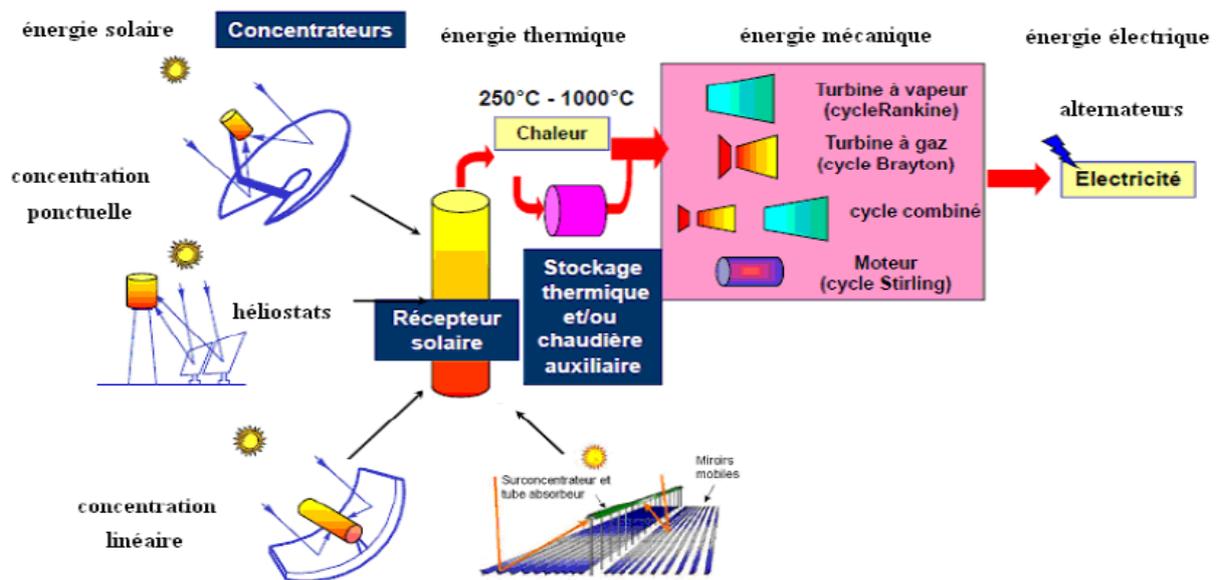


Figure.II.6.Schéma global du solaire thermodynamique

Le solaire thermodynamique permet de transformer l'énergie solaire en chaleur à température élevée, puis de convertir cette chaleur en énergie électrique. On distingue quatre grandes filières de centrales solaires à concentrations.

- Les centrales solaires à tour ;
- Les centrales à capteurs solaires paraboliques ;
- Les centrales solaires à miroir de Fresnel ;
- Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.

Ces quatre filières peuvent être divisées en deux catégories :

- Technologies à concentration ponctuelle qui concentre les rayons solaire sur un point (capteurs paraboliques, Les centrales à tour)
- Technologies à concentration linéaire qui concentre les rayons solaires sur un tube linéaire (concentrateurs cylindro-paraboliques, les concentrateurs miroir de Fresnel)

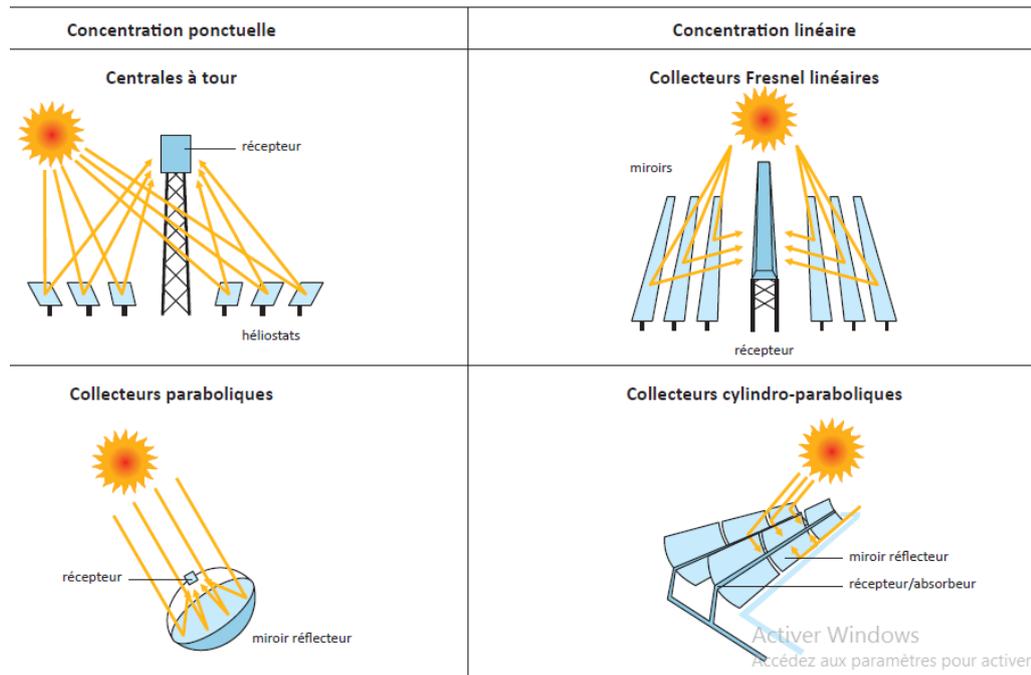


Figure.II.7. Les principaux systèmes de concentration [23]

II.3.3.1. Les centrales solaire à tour :

Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrent les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire.

Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 °C à 1000 °C [24]. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée vers le fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines. Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité.

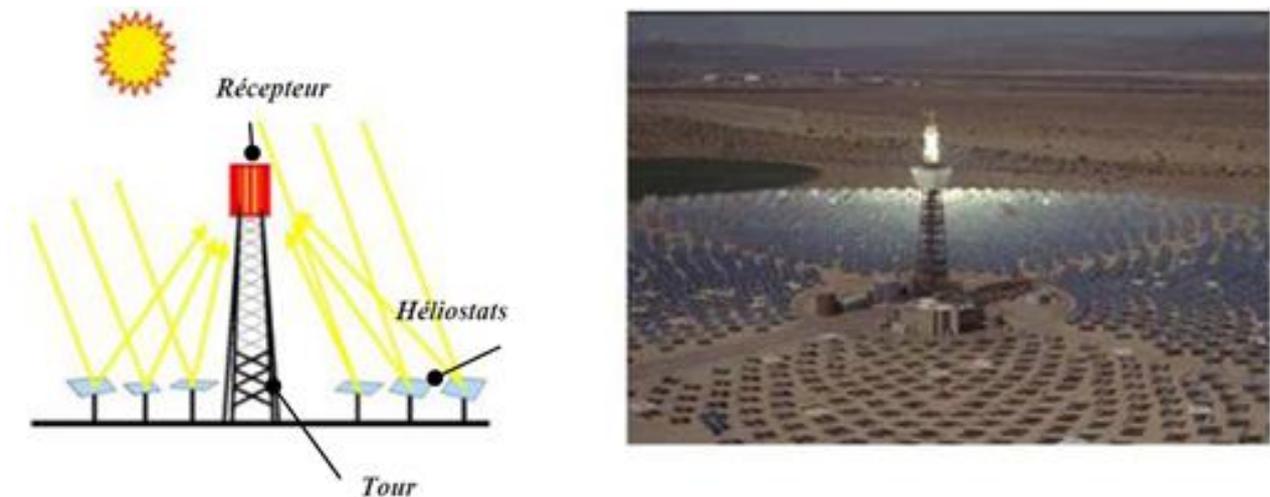


Figure.II.8. Les centrales à tour [25]

II.3.3.2. Les centrales solaire à collecteurs paraboliques :

Ayant la même forme que les paraboles de réception satellite, les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils s'orientent automatiquement et suivent le soleil sur deux axes afin de réfléchir et de concentrer les rayons du soleil vers un point de convergence appelé foyer. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui est monté en température sous l'effet de la concentration. Cela entraîne un moteur Stirling qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique puis en électricité. Le rapport de concentration de ce système est souvent supérieur à 2000 et le récepteur peut atteindre une température de 1000 °C [26]. Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Pour ce type de système, le stockage n'est pas possible.

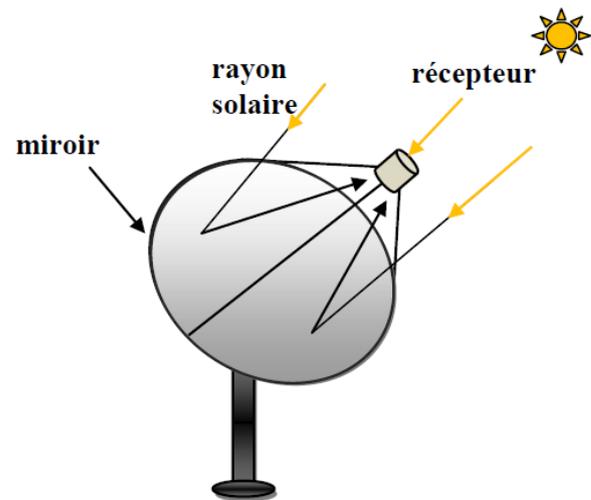


Figure.II.9. Les centrales à capteurs paraboliques [25]

II.3.3.3. Les centrales solaires à miroir de Fresnel :

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques repose sur la mise en forme du verre pour obtenir sa forme parabolique. Une alternative possible consiste à approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans.

C'est le principe du concentrateur de Fresnel. Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes. En circulant dans ce récepteur horizontal, le fluide thermodynamique peut être vaporisé puis surchauffé jusqu'à 500 °C [27]. La vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. Le cycle thermodynamique est généralement direct, ce qui permet d'éviter les échangeurs de chaleur.

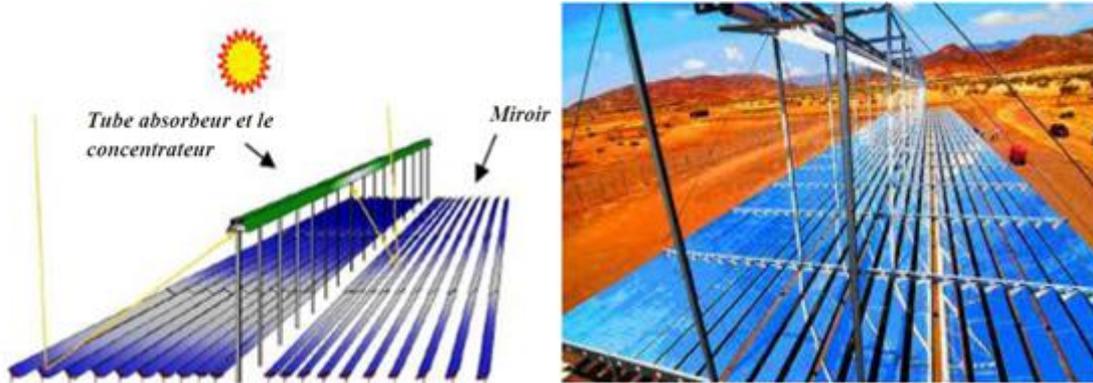


Figure. II. 10. Les centrales solaires à miroir de Fresnel [25]

II.3.3.4. Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques :

Ce type de centrale se compose de rangées parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube récepteur horizontal, dans lequel circule un fluide caloporteur dont la température atteint en général 400 °C [13]. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine ou un générateur électrique.



Figure.II.11. Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques [25]

II.3.3.4.1. La Poursuite Solaire : [28]

Le système de poursuite solaire consiste à contrôler le mouvement de rotation du concentrateur et à le commander par un programme informatique pour mettre la normale du collecteur face au soleil pendant toute la journée.

L'importance de ce système est de capter le rayonnement solaire parallèle venant directement du disque solaire (rayonnement direct).

Il existe deux types de poursuite solaire :

➤ Poursuite de type Nord-Sud :

Le montage nord-sud est le montage idéal pour assurer un suivi sidéral. Elle emploie une rotation autour d'un axe parallèle à l'axe polaire du globe terrestre qui assure la poursuite en hauteur (de haut en bas).

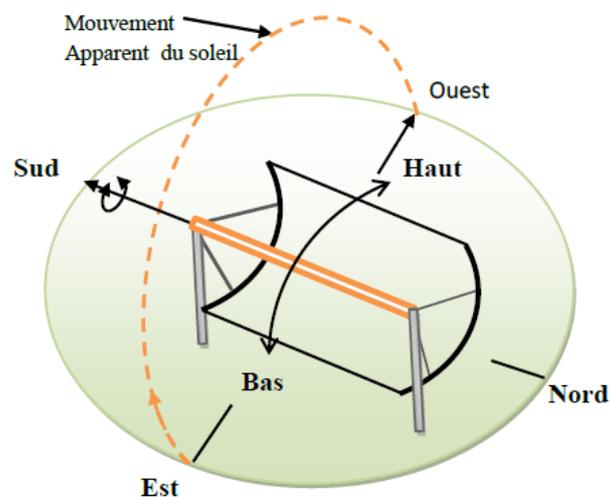


Figure.II.12. Montage d'un capteur cylindro-parabolique suivant la direction nord-sud

➤ Poursuite de type Est-Ouest :

Le montage est-ouest est plus utilisé pour un concentrateur cylindro parabolique sans dispositif de poursuite solaire. Il faut orienter le capteur vers le soleil deux ou trois fois par jour pour optimiser la réception du rayonnement. Le rendement de captation est moins bon qu'avec le montage est-ouest asservi en rotation.

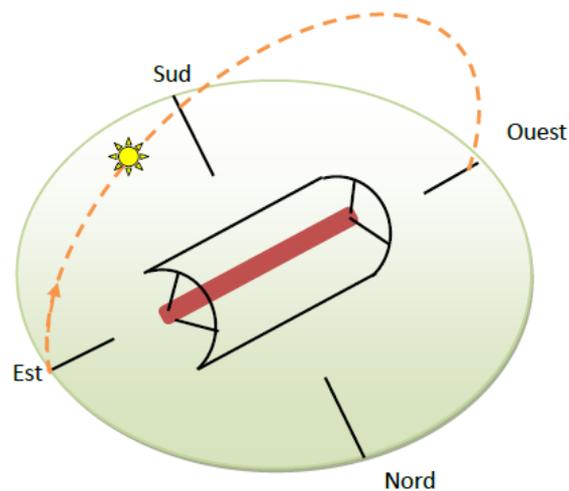


Figure.II.13. Montage d'un capteur cylindro-parabolique suivant la direction est-ouest

II.3.3.4.2. Caractéristiques d'un concentrateur cylindro-parabolique (CCP) :

Le collecteur cylindro-parabolique est le plus préféré des capteurs à concentration pour la vapeur d'eau et qu'on peut atteindre des températures très élevées sans abaissement du rendement du capteur. Il se présente comme un module ayant un réflecteur (miroir ou bien un matériau réfléchissant tel que l'aluminium) de forme d'un hémicylindre de courbure parabolique. Cette géométrie lui permet de focaliser les rayons solaires incidents vers une génératrice linéaire appelée plan focal ou est placé un tube absorbant dans lequel circule un fluide caloporteur.

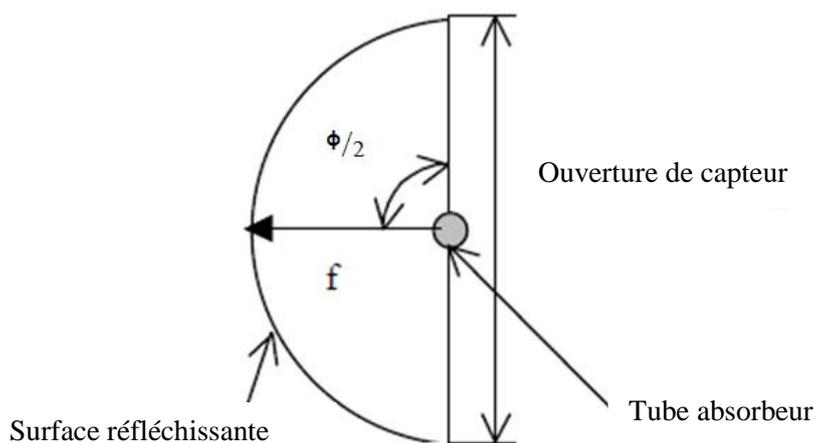


Figure II.14. Dimensions d'un concentrateur cylindro-parabolique [29].

Pour un concentrateur cylindro-parabolique l'équation de la courbure en coordonnées Cartésiennes est la suivantes :

$$x^2 = 4fy \quad (\text{III.1})$$

Ou f : la distance focale du CCP.

ϕ : Angle d'ouverture

L'ouverture W du concentrateur en fonction de l'angle d'ouverture (ϕ) est donnée par

$$\text{L'équation : } W = 2 \cdot r \cdot \sin(\phi) = 4f \tan(\phi) \quad (\text{III.2})$$

II.3.3.4.3. Les composantes du champ solaire :

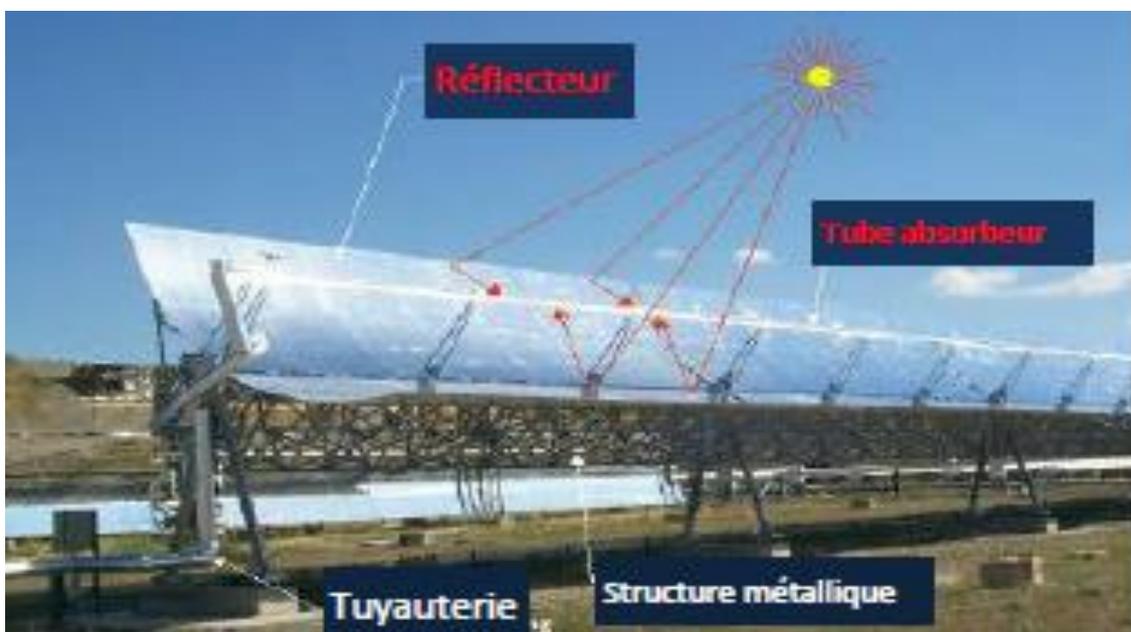


Figure .II.15. Capteur solaire cylindro-parabolique [30]

➤ Le réflecteur :

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

➤ Le tube collecteur (l'absorbeur) :

L'absorbeur est le composant principal dans le CCP, qui a pour fonction d'absorber le rayonnement solaire incident, de le convertir en chaleur et de transmettre celle-ci à un fluide caloporteur.

Le tube collecteur est caractériser par :

- Bonne absorption du rayonnement : son coefficient d'absorption doit être aussi élevé que possible afin d'éviter toute réflexion du rayonnement incident.
- Pertes thermiques limitées : La température du tube dépassant généralement 400°C, les pertes par échanges convectifs sont très importantes. Afin de les limiter, le tube est entouré d'une enveloppe de verre sous vide.

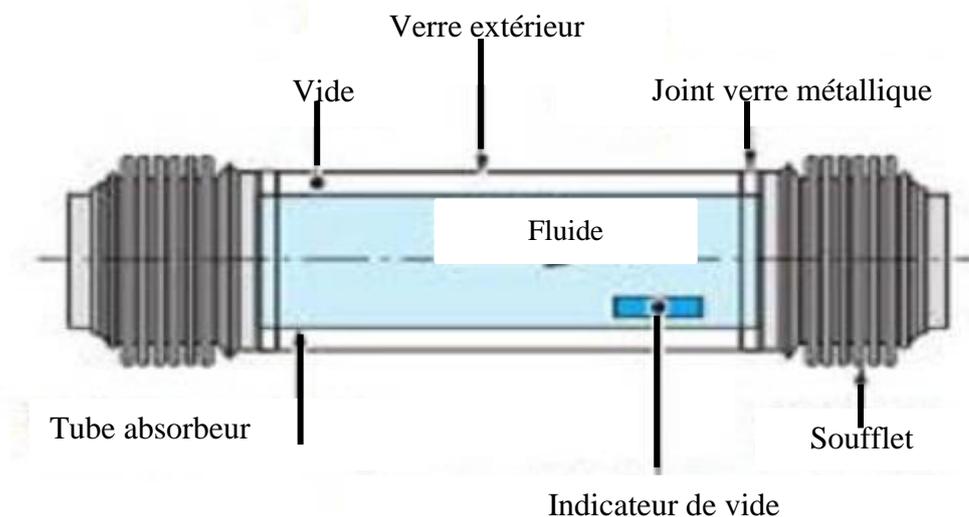


Fig. II.16. Le tube récepteur d'un concentrateur cylindro-parabolique [30]

Le fluide caloporteur :

Le fluide caloporteur est le fluide chargé d'emmagasiner l'énergie de la centrale sous forme de chaleur. En effet, le concentrateur utilise des tubes pour concentrer l'énergie solaire. C'est dans cet endroit que le fluide caloporteur est chauffé. Les fluides caloporteurs les plus utilisés sont les suivants :

- Sels fondus

- Huile synthétique
- Fluides organiques
- Eau et vapeur d'eau
- Air

II.3.3.4.Principales composantes d'une centrale solaire cylindro-parabolique :

Les composantes de base d'une centrale cylindro-parabolique sont :

1. Le champ solaire, qui représente l'équivalent de l'alimentation en combustible pour les centrales thermique.
2. Le système de transport et éventuellement de stockage de chaleur (vapeur d'eau ou autre fluide caloporteur selon la température de source chaude et le système utilisé)
3. Le système de conversion de chaleur en électricité à partir d'un cycle thermodynamique.

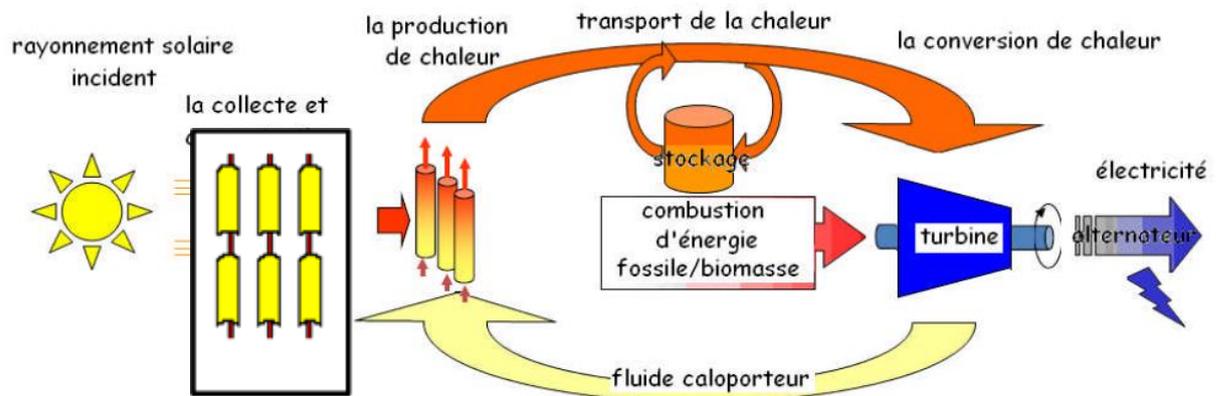


Figure.II.17. Les composantes de base d'une centrale solaire cylindro-parabolique.

II.3.3.4.5 Principe de fonctionnement d'une centrale à capteurs cylindro-paraboliques :

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, orientés sur l'axe nord-sud qui tournent autour de ce dernier pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal, où circule un fluide caloporteur qui servira à transporter la chaleur vers des échangeurs de chaleur.

La température du fluide peut monter jusqu'à 395°C ou plus. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne des turbines qui produisent de l'électricité. Certaines centrales sont désormais capables de produire de l'électricité en continu, nuit et jour, grâce à un système de stockage sous forme de chaleur sensible ou de chaleur latente à base d'une réaction réversible.

Avantage :

Source d'énergie inépuisable et gratuite ;

Pas d'émission de polluants ;

Peu fonctionner sans intermittence.

Inconvénients :

Nécessite une poursuite sensible et coûteuse pour une zone climatique peu ensoleillée ;

Surface sur terre importante.

II.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons montré que l'utilisation d'énergie solaire repose sur différentes technologies selon le type de solaire (photon, thermique ou thermodynamique).

Le choix de ces technologies dépend du domaine d'utilisation de l'énergie solaire (production d'eau chaude, courant continu ou courant alternatif de grand dispositif.)

**Chapitre III : Modélisation
mathématique d'un capteur
solaire cylindro-parabolique**

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on va effectuer l'analyse thermique, optique et la modélisation mathématique d'un capteur solaire avec effet de concentration de type cylindro-parabolique. Cette modélisation est employée pour déterminer le rendement global.

III.2. Notions d'optique géométrique :

III.2.1. Lois de Descart [31] :

C'est au savant français René Descartes que nous devons les lois décrivant la trajectoire d'un rayon de lumière rencontrant successivement deux milieux optiques distincts.

Soit deux milieux transparents, séparés par un dioptre (s), d'indices de réfraction n_1 et n_2 . Le rayon lumineux arrive au point O du dioptre sous un angle d'incidence i_1 que i_1 forme la direction du rayon incident P et la normale au dioptre au point d'incidence O.

i_2 est l'angle orienté du rayon réfracté P_2 avec la normale, et i_3 l'angle orienté de N avec le rayon réfléchi P_3 .

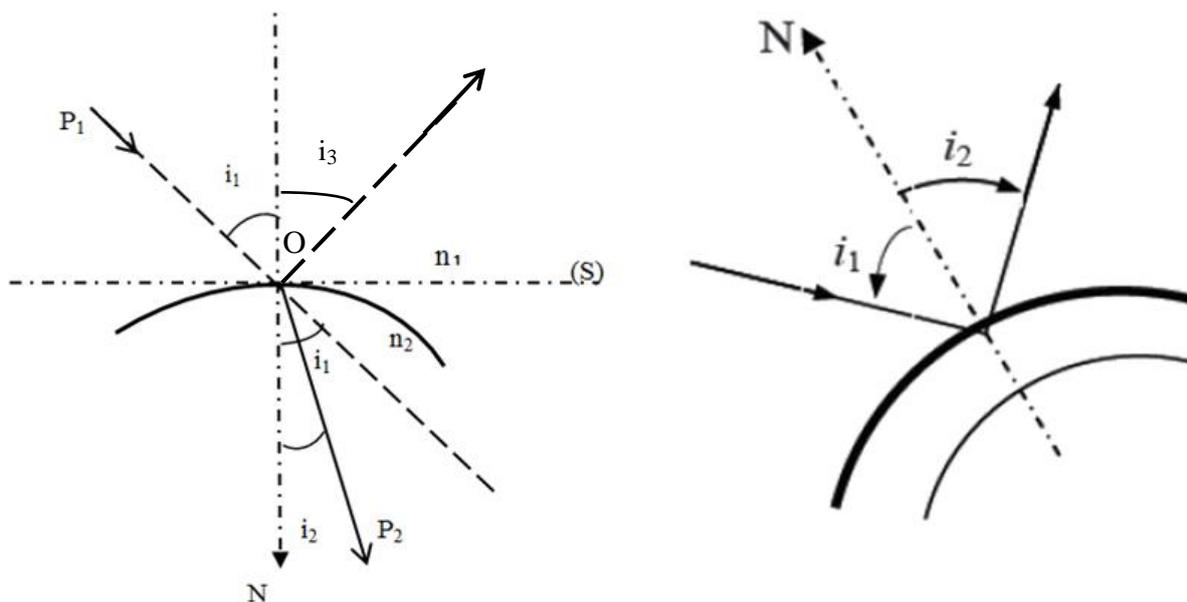


Figure.III.1. Réflexion et réfraction de la lumière [31].

1-Lois de réfraction:

- Le rayon réfracté est dans le plan, appelé plan d'incidence, défini par la normale au point d'incidence, la tangente au dioptre au même point et le rayon incident
- Les angles d'incidence et de réfraction sont reliés par la relation.

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$$

2- Lois de réflexion:

- Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans le plan d'incidence

$$i_1 = -i_2$$

III.3. La concentration :

Les grandeurs caractéristiques susceptibles d'être rencontrées lors de l'étude d'un concentrateur solaire sont résumées dans la figure :

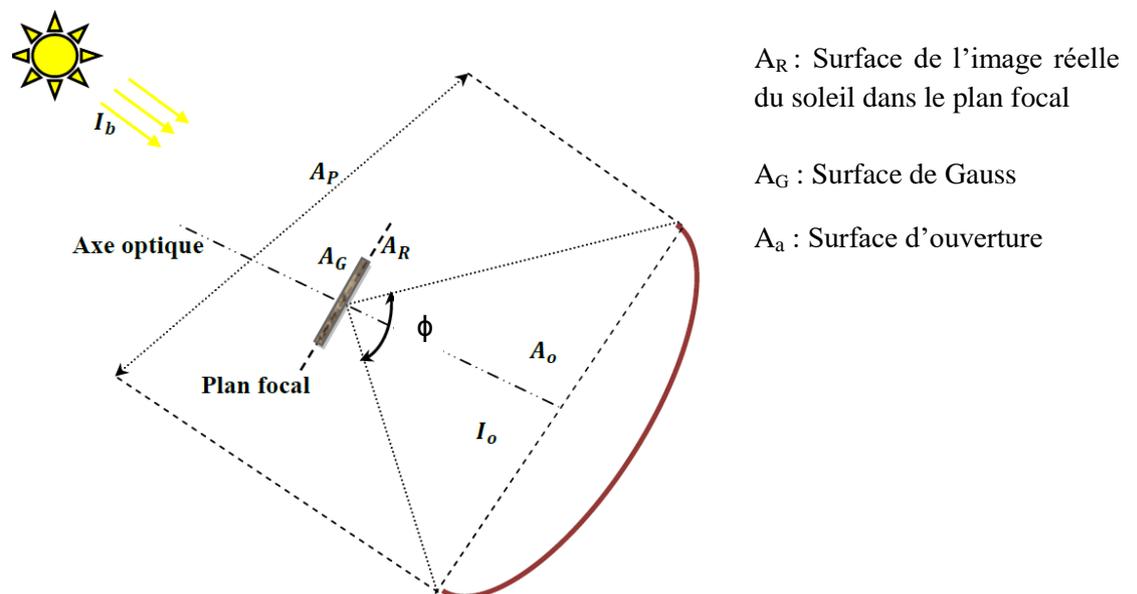


Figure.III.2. Schéma de principe d'un concentrateur solaire. [32]

III.3.1.Concentration idéale :

$$C_{idéal} = \frac{A_a}{A_G} \tag{III.1}$$

On appel l la longueur du concentrateur, la section d'ouverture s'écrit :

$$A_a = 4lftan\frac{\phi}{4} \tag{III.2}$$

L'image de gausse par surface :

$$A_G = f\varepsilon \tag{III.3}$$

Où ε est l'angle apparent du soleil

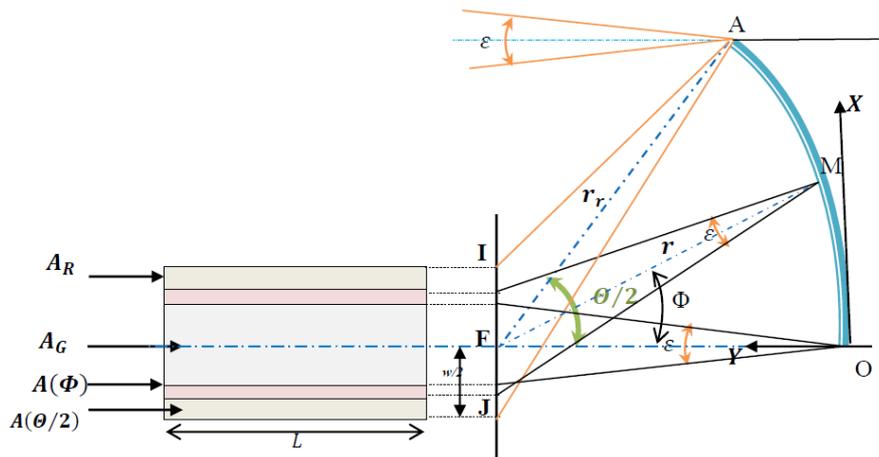


Figure.III.3. Projection sur le plan focal de l'image du soleil [33]

III.3.2.Concentration géométrique :

La concentration géométrique est donné par :

$$C_G = \frac{A_a}{A_R} \tag{III.4}$$

On posant : $FJ=W/2$ et $AF = r_r$

$$A_a = 2lr_r \sin\frac{\phi}{2} \tag{III.5}$$

$$A_R = Wl \tag{III.6}$$

$$W = \frac{r_r \varepsilon}{\cos \frac{\phi}{2}} \quad (\text{III.7})$$

$$\text{On trouve : } C_G = \frac{\sin \phi}{\varepsilon} \quad (\text{III.8})$$

III.3.3. Concentration optique :

La concentration optique, se calcul par :

$$C_0 = \frac{2}{\varepsilon} \sin \frac{\phi}{2} \quad (\text{III.9})$$

III.4. Détermination de rendement global [40]:

Le rendement énergétique global s'écrit sous la forme d'un produit de deux rendements dont le premier est le rendement optique η_{opt} qui traduirait les pertes exclusivement optiques (et géométriques dans le cas de la présence d'un dispositif de poursuite du soleil) .L'autre , c'est le rendement thermique η_{ther} qui tient compte des pertes par transfert thermique.

Donc ;

$$\eta_e = \eta_{opt} \eta_{the} \quad (\text{III.10})$$

III.4.1 Détermination du rendement optique du concentrateur :

III.4.1.1 Angle d'incidence :

L'angle d'incidence, θ , est l'angle qui définit la direction du rayonnement direct incident et la normale à la surface d'ouverture. Le rayonnement direct incident, I_b , est déduit du rayonnement direct normal I_n à la surface d'ouverture.

L'angle d'incidence dépend de la position du soleil, de l'inclinaison de la surface d'ouverture par rapport à l'horizontale et des coordonnées géographique de lieu voir figure. III.4.

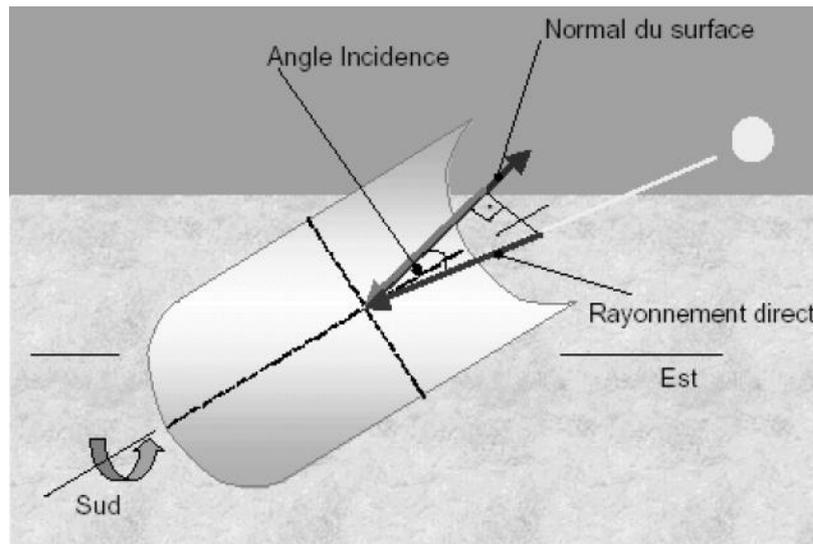


Figure.III.4. Angle incidence sur un capteur solaire [34]

Le rayonnement direct incident est donnée par :

$$I_n = I_b \cos(\theta) \quad (\text{III.11})$$

- Pour une poursuite de type Nord-Sud, l'angle d'incidence est déterminé à partir de la relation suivante : [34]

$$\cos(\theta) = [(\sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega))^2 + \cos(\delta) \sin(\omega)]^{1/2} \quad (\text{III.12})$$

L'angle horaire, ω , est donné par :

III.4.1.2.L'énergie absorbée :

La quantité d'énergie reçue par l'absorbeur est donnée par :

$$Q_{abs} = Q_u + Q_{per} \quad (\text{III.13})$$

Qui peut aussi se calculé par:

$$Q_{abs} = I_n \eta_{opt} A_a \quad (\text{III.14})$$

Notons que le flux direct incident I_b déduit du flux incident selon l'équation (III.11) :

$$I_b = \frac{I_n}{\cos(\theta)} \quad (\text{III.15})$$

Se calcul en utilisant le modèle de Hottel (déjà développer dans le chapitre I) :

$$I_b = I_{so} \tau_b \cos(\theta_z) \quad (\text{III.16})$$

$$I_{so} = I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi n}{365} \right) \right) \quad (\text{III.17})$$

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp \left(\frac{-a_2}{\cos(\theta_z)} \right) \quad (\text{III.18})$$

➤ L'angle zénithal est donné par :

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta) \cos(L) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(L) \quad (\text{III.19})$$

III.4.1.3. Effet géométrique :

La variation de la direction des rayons incidents sur la surface réfléchissante implique, conformément aux lois de Descartes, une variation correspondante des rayons réfléchis. Cette variation s'accompagne d'un déplacement de la « tache solaire », par rapport au tube absorbeur, lequel est responsable de la diminution de l'aire effective recevant le rayonnement concentré. Cet effet est quantifié en partant de considérations exclusivement géométriques, il est donné (par unité de surface) par l'équation suivante [35] :

$$\xi_{(\theta)} = 1 - \left(\frac{f}{l} \right) \left(1 + \frac{Wz}{48 f^2} \right) \tan(\theta) \quad (\text{III.20})$$

Avec :

$$f = \frac{W}{4 \tan\left(\frac{\phi}{4}\right)} \quad (\text{III.21})$$

ϕ : Angle d'ouverture de capteur

III.4.1.4. Effet isentropique :

Ce paramètre représente, en quelque sorte, une correction apportée au rendement optique à incidence normale abstraction faite de l'effet énergétique et géométrique lorsque l'angle d'incidence est différent de zéro. Il s'explique par le fait que les paramètres définissant $\eta_{\text{opt}(n)}$ sont isentropiques c'est-à-dire dépendants de la direction du rayonnement

donc de l'angle d'incidence. La forme de cette dépendance est donnée par des fonctions empiriques linéaires caractéristiques de chaque capteur. Pour un concentrateur modèle LS3, cette équation s'écrit comme suit [35] :

$$K_{LS3(\theta)} = 1 + 0.78042\theta - 0.58047\theta^2 + 0.950559\theta^3 - 0.069092\theta^4 \quad (\text{III.22})$$

Les effets étant indépendants, leur contribution conjointe s'obtient par leur produit algébrique ; ce qui donne l'expression générale du rendement optique.

$$\dot{Q}_{abs} = I_n \eta_{opt(n)} \xi_{(\theta)} K_{LS3(\theta)} \cos(\theta) A_a \quad (\text{III.23})$$

η_{optn} : est le rendement optique correspondant à une incidence normale de rayonnement direct est le produit des quatre paramètres suivant, il est noté $\eta_{opt(n)}$ (donné par le constructeur).

$$\eta_{optn} = \rho \alpha \gamma \tau \quad (\text{III.24})$$

- ρ : Réflectivité du miroir
- τ : Facteur de transmission du verre
- α : Absorptivité du tube absorbeur
- γ : Facteur d'interception

On aura, d'après l'équation (III.11)

$$\dot{Q}_{abs} = I_b (\eta_{opt(n)} \xi_{(\theta)} K_{LS3(\theta)} \cos(\theta)^2) A_a \quad (\text{III.25})$$

Le rendement optique ($\eta_{opt(\theta)}$) est donné par :

$$\eta_{opt} = \eta_{opt(n)} \xi_{(\theta)} K_{LS3(\theta)} \cos(\theta)^2 \quad (\text{III.26})$$

III.4.2. Détermination du rendement thermique du concentrateur :

On obtient l'expression de l'énergie utile en faisant un bilan énergétique sur le tube absorbeur.[36]

$$\dot{Q}_u = F_R A_a \left[I_n \eta_{opt} - \frac{U_L}{c} (T_{fi} - T_a) \right] \quad (\text{III.27})$$

Le rendement énergétique global est défini comme le rapport entre l'énergie (puissance) captée et l'énergie (puissance) utile transmise par l'absorbeur.

$$\eta_{en} = \frac{\dot{Q}_u}{I_n A_a} \quad (\text{III.28})$$

D'après (III.10) et (III.30) on aura :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_u}{I_n A_a} \frac{1}{\eta_{opt}} \quad (\text{III.29})$$

D'après (III.29) et (III.31) on aura :

$$\eta_{th} = F_R \left[1 - \frac{U_L}{I_n c} (T_{fi} - T_a) \frac{1}{\eta_{opt}} \right] \quad (\text{III.30})$$

III.4.2.1. Les pertes thermiques :[36]

En admettant pour le récepteur décrit précédemment qu'il n'existe aucun échange convectif entre le tube absorbeur et la couverture en verre, l'expression du facteur de perte globale du tube absorbeur s'écrira :

$$U_L = \left[\frac{D_{ro}}{(h_{cca} + h_{rca}) D_{co}} + \frac{1}{2K_c} \ln \left(\frac{D_{co}}{D_{ci}} \right) + \frac{1}{h_{rrc}} \right]^{-1} \quad (\text{III.31})$$

- h_{rrc} : coefficient d'échange radiatif entre l'absorbeur et la couverture
- h_{rca} : coefficient d'échange radiatif entre la couverture et l'environnement
- h_{cca} : coefficient d'échange convectif entre la couverture et l'environnement
- K_c : conductivité thermique de la couverture en verre
- D_{ci}, D_{co} son respectivement les diamètre interne et externe de la couverture

III.4.2.1.1. Le coefficient d'échange radiatif entre l'absorbeur et la couverture est donné par :

$$h_{rrc} = \sigma \frac{(T_R^2 + T_{ci}^2)(T_r + T_{ci})}{\frac{1-\varepsilon_r}{\varepsilon_r} + \left(\frac{1-\varepsilon_c}{\varepsilon_c} \frac{D_{ro}}{D_{ro}}\right) + \frac{1}{F_{rc}}} \quad (\text{III.32})$$

Avec :

- T_{ci} =Température de la surface externe de la couverture
- ε_r =émissivité de l'absorbeur
- ε_c = émissivité de la couverture
- F_{rc} =Facteur de forme ; il est égal à 1 pour les tubes coaxiaux

III.4.2.1.2. Coefficient d'échange radiatif entre la couverture et l'environnement :

$$h_{rc} = 4\sigma\varepsilon_c T_{cm}^3 \quad (\text{III.33})$$

- σ : constante de Stefan-Boltzmann

III.4.2.1.3. Coefficient d'échange convectif entre la couverture et l'environnement :

$$h_{cca} = \frac{Nu_c K_{ca}}{D_{co}} \quad (\text{III.34})$$

Pour le calcul du nombre de Nusselt, on évalue en premier lieu les propriétés physique de l'air à la température T_a , cela afin de calculer le nombre de Reynolds. Le nombre de Prandtl se calcul à la température T_{co} de la surface externe de la couverture ainsi qu'à la température ambiante T_a .

$$Re_{ca} = \frac{V_a D_{co}}{\nu_a} \quad (\text{III.35})$$

Le nombre de Nusselt est donné par $\frac{pr_{ca}}{pr_c}$

Si : $5 < Re_{ca} < 10^3$

$$Nu_{ca} = 0.5Re_{ca}^{0.5}Pr_{ca}^{0.38}\left(\frac{pr_{ca}}{pr_c}\right)^{0.25} \quad (III.36)$$

Si : $10^3 < Re_{ca} < 20^6$

$$Nu_{ca} = 0.26Re_{ca}^{0.6}Pr_{ca}^{0.38}\left(\frac{pr_{ca}}{pr_c}\right)^{0.25} \quad (III.37)$$

Si : $20^6 < Re_{ca} < 10^7$

$$Nu_{ca} = 0.23Re_{ca}^{0.8}Pr_{ca}^{0.38}\left(\frac{pr_{ca}}{pr_c}\right)^{0.25} \quad (III.38)$$

Pr_{ca} est le nombre de prandtl à la température ambiante et pr_c à la température de la couverture T_{co} .

III.4.2.1.4. Le coefficient d'échange convectif absorbeur/fluide caloporteur :

Est donnée par :

$$F_R = \frac{c_{pf}\dot{m}}{U_L A_r} \left[1 - \exp\left(\frac{-F' U_L A_r}{c_{pf}\dot{m}}\right) \right] \quad (III.39)$$

Où :

$$F' = \frac{1}{U_L \left(\frac{1}{U_L} + \frac{D_{ro}}{2K_r} \ln\left(\frac{D_{ro}}{D_{ri}}\right) + \frac{D_{ro}}{D_{ri} h_f} \right)} \quad (III.40)$$

K_r : conductivité de l'absorbeur

- **Calcul du coefficient d'échange convectif h_f entre l'absorbeur et le fluide caloporteur :**

$$h_f = \frac{Nu_f K_f}{D_{ri}} \quad (III.41)$$

$$Re_f = \frac{V_f D_{ri}}{\nu_f} \quad (III.42)$$

$$V_f = \frac{\dot{m}}{\rho_f A_{pf}} \quad (III.43)$$

$$A_{pf} = \frac{\pi D_{ri}^2}{4} \quad (\text{III.44})$$

ρ_f et ν_f sont respectivement la densité volumique et la viscosité cinématique du fluide caloporteur.

Le nombre de Nusselt est donné par : [37]

Si : l'écoulement laminaire : $Re_f < 2300$

$$Nu_f = 3.7 \quad (\text{III.45})$$

Si : l'écoulement est turbulent : $Re_f > 10^4$

$$Nu_f = 0.021 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.43} \quad (\text{III.46})$$

Le nombre de prandtl est évalué à la température T_{ri} de la face interne du tube .Il est donné par la fonction linéaire suivante : [37]

$$Pr_f = 1.577 \cdot 10^{-3} T_{ri}^2 - 0.261 T_{ri} + 12.501 \quad (\text{III.47})$$

Une autre relation peut être aussi utilisé qui est exprimée par : [38]

$$U_L = \left(\frac{1}{c_1 \left(\frac{T_{fi} - T_a}{1 + f_c} \right)^{0.25}} + \frac{D_{ri}}{D_{ro} h_v} \right)^{-1} + \frac{\sigma (T_{fi}^2 + T_a^2) (T_{fi} - T_a)}{[\varepsilon_r - 0.04(1 - \varepsilon_r) \frac{T_{fi}}{450}]^{-1} - \frac{D_{ri}}{D_{ro} h_v} + f_c \varepsilon_v} \quad (\text{III.48})$$

Où

Le facteur f_c tient compte du coefficient des pertes du au vent, et qui peut être obtenu par l'équation suivante :

$$f_c = D_{ri}^{-0.4} (0.61 + 1.3 \varepsilon_r) h_v^{-0.9} \exp(0.00325 (T_{fi} - 273)) \quad (\text{III.49})$$

C_1 : est donné par l'expression empirique suivante :

$$C_1 = \frac{1.45 + 0.96(\varepsilon_r - 0.5)^2}{(D_{ri}(\frac{1}{D_{ri}^{0.6}} + D_{ro}^{0.6}))^{1.25}} \quad (\text{III.50})$$

Où le coefficient par convection du vent est :

$$h_v = 4V_v^{0.58} D_{ro}^{-0.42} \quad (\text{III.51})$$

Et la température de sortie est donné par

$$T_{fs} = T_{fi} + \frac{\dot{Q}_u}{\dot{m}c_{pf}} \quad (\text{III.52})$$

III.5. Conclusion :

Chaque concentrateur est caractérisé par :

- Ses concentrations géométrique et optique ;
- Son rendement optique au niveau de réflecteur ;
- Son rendement thermique au niveau de l'absorbeur.

La modélisation mathématique d'un concentrateur cylindro parabolique nécessite la maîtrise des lois optique et thermique.

Chapitre IV : Résultats du programme et discussion

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter des différents résultats issu des tests effectués avec le programme donnant le rendement énergétique d'un concentrateur cylindroparabolique .Ce programme est élaboré à l'aide du logiciel EES.

Les données pour lesquelles les tests sont effectués sont mentionnées dans le tableau qui suit.

IV.2. Présentation du logiciel EES :

EES (Engineering Equation Solver), est un logiciel qui permet de résoudre des équations algébriques, équations différentielles, équations avec des variables complexes et de générer des graphiques de qualité de publication.

EES résout les systèmes d'équations automatiquement, ce qui libère l'utilisateur d'avoir développé leurs propres techniques itératives pour résoudre un ensemble d'équations non-linéaires.

Il y a beaucoup de fonctionnalités supplémentaires associées à EES; par exemple comme la vérification de l'unité, optimisation, intégration numérique, données de propriété de haute qualité, analyse de tracé et d'incertitude.

Ces caractéristiques font de l'EES un outil puissant pour développer des modèles mathématiques de nombreux types de systèmes d'ingénierie.

IV.3. Donnée du problème :

Paramètres géométriques du collecteur (m)	
Diamètre extérieur de l'absorbeur	0.07
Diamètre interne de l'absorbeur	0.065
Diamètre extérieur de vitre	0.115
Diamètre interne de vitre	0.109
Longueur de la surface d'ouverture	99
Largeur de la surface d'ouverture	5.07
Les paramètres optiques	
Réflectivité du miroir(ρ)	0.93
Facteur de transmission du verre(τ)	0.96
Absorptivité du tube absorbeur(α)	0.96
Facteur d'interception(γ)	0.94
Données de site	
<u>Le site HassiR'mel</u>	
Latitude (L) :	32.9°,
Longitude(λ) :	03.27°,
L'altitude : (A) :	750(m)

Le fluide caloporteur choisi, est le Biphenyl-DiphenylOxide (Therminol VP-1). Les propriétés thermo-physiques sont données par les corrélations suivantes [38].

Chaleur spécifique

$$C_p(f) = 1000 (1.509 + 0.002496 * T_{fm} + 0.0000007888 * T_{fm}^2)$$

➤ Conductivité thermique

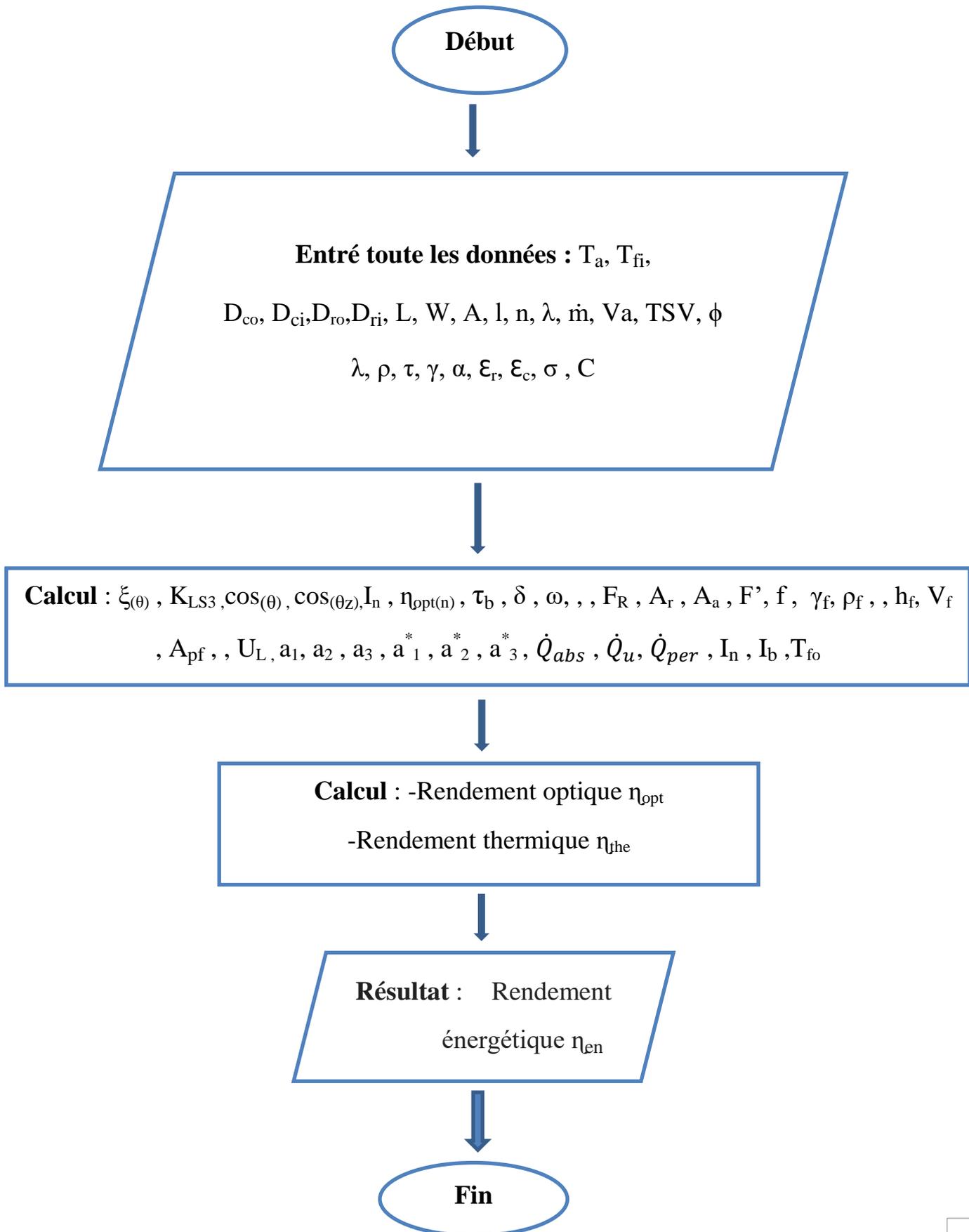
$$K(f) = 0.1381 - 0.00008708 * T_{fm} - 0.0000001729 * T_{fm}^2$$

➤ Viscosité cinématique

$$\nu_f = (-23 * 10^{-5} * T_{fm}^3 + 5.61 * 10^{-3} * T_{fm}^2 - 19.89 T_{fm} + 1822)^{-1}$$

$$\rho_f = -7.61 * 10^{-4} * T_{fm}^2 - 2.24 * 10^{-1} * T_{fm} + 1191$$

IV.4.Organigramme de programme :



IV.5. Résultats discussion:

Dans ce qui suis on a testé ce programme pour les données de site HassiR'mel dont la latitude est de 32.9°, longitude est 3.27 et l'altitude est de 750m pour la journée de 23 juin à midi TSV.

Les résultats obtenus sont :

Les grandeurs	U_L	I_n	I_b	\dot{Q}_{abs}	\dot{Q}_{per}	\dot{Q}_u	η_{opt}	η_{the}	η_{en}
Les valeurs	12.75	872.1	884.1	384239	47657	336582	0.77	0.73	0.56

IV.5.1. La variation de la concentration énergétique et géométrique en fonction d'angle d'ouverture :

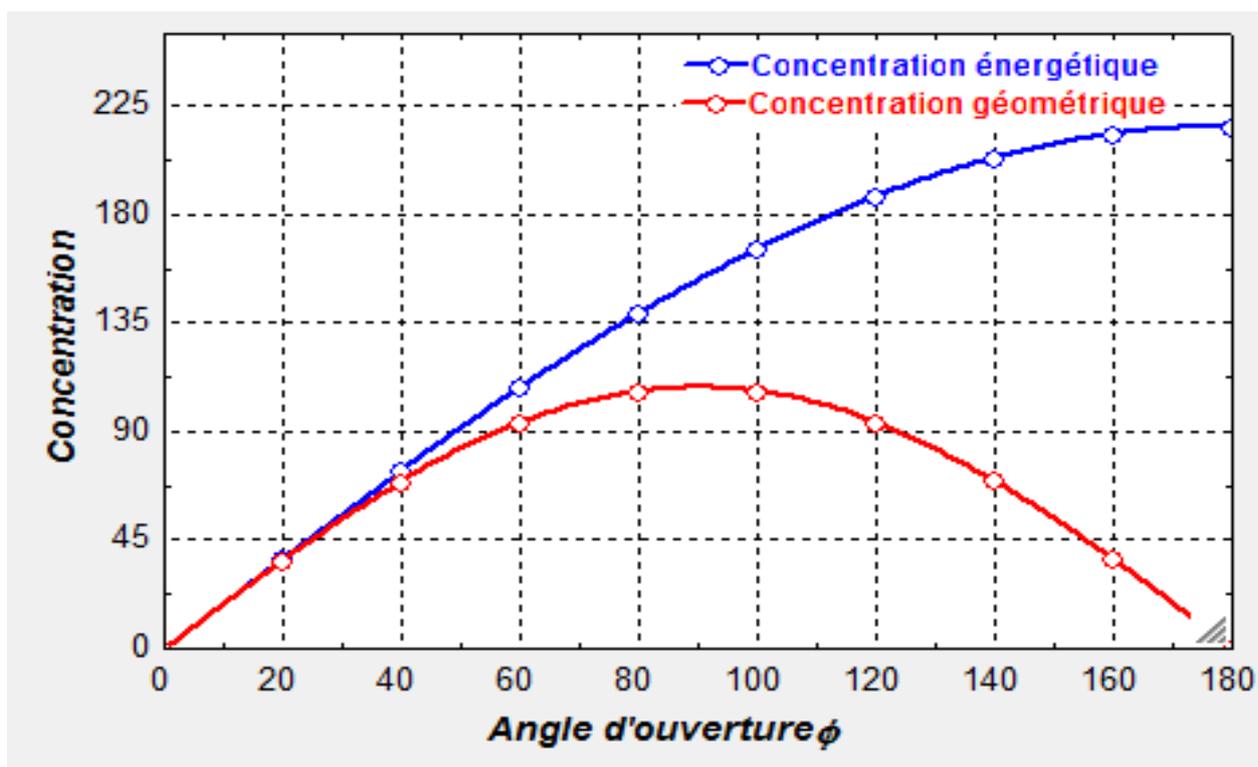


Figure (IV.1). Concentration énergétique et géométrique en fonction de l'angle d'ouverture.

On remarque que la concentration géométrique est maximale pour $\varphi = \pi/2$. Cela est due aux fait que, dépassant cette limité, la surface de l'image réelle croit, en raison de la forte inclinaison des rayons réfléchis par les points située à l'extrémité du réflecteur, d'une manière relativement plus importante que celle de la surface d'ouverture.

La concentration énergétique est maximale pour $\varphi = \pi$, elle est égale à 215. Cela s'explique par deux éléments .Le premier est que la surface de Gauss est indépendante de l'angle d'ouverture. Le second est que l'énergie reçue dans cette zone est proportionnelle, parce que additive à la surface réfléchissante donc à l'angle d'ouverture.

IV.5.2. Variation de la concentration et de rendement en fonction de la température du tube absorbeur :

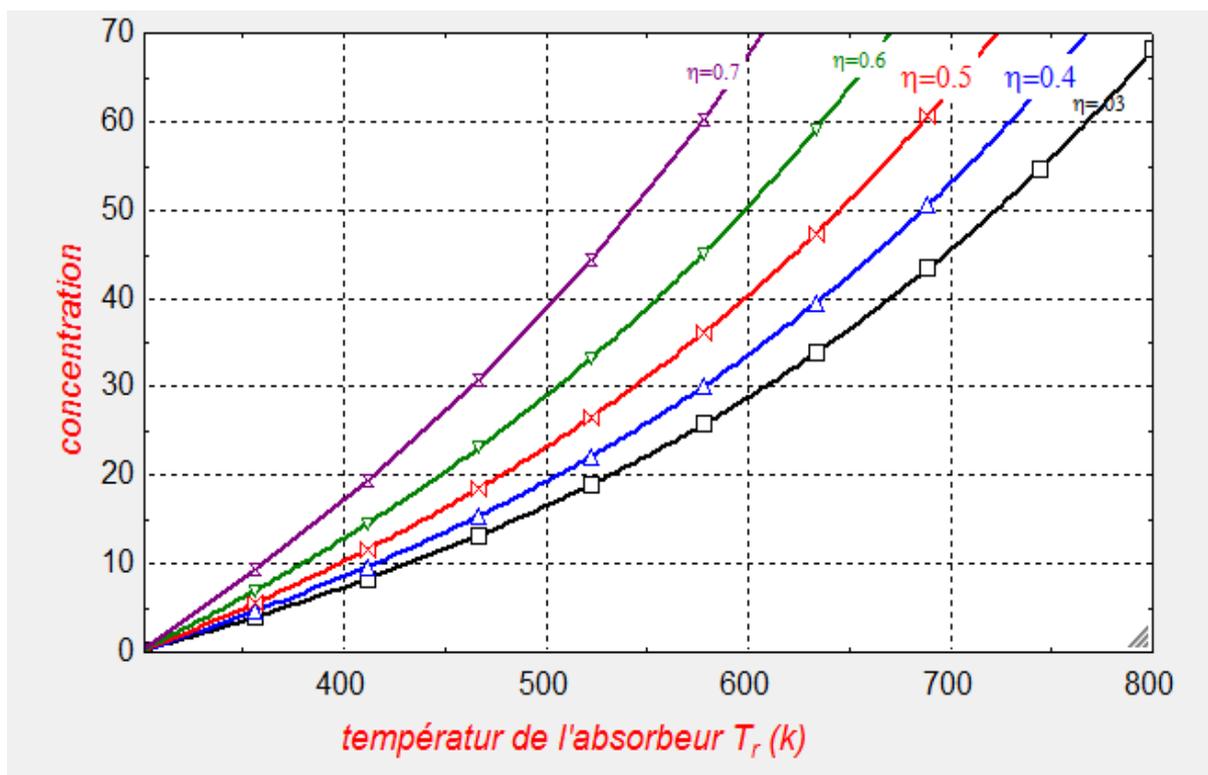


Figure. (IV.2). Variation de la concentration en fonction de la température pour différentes valeurs du rendement énergétique.

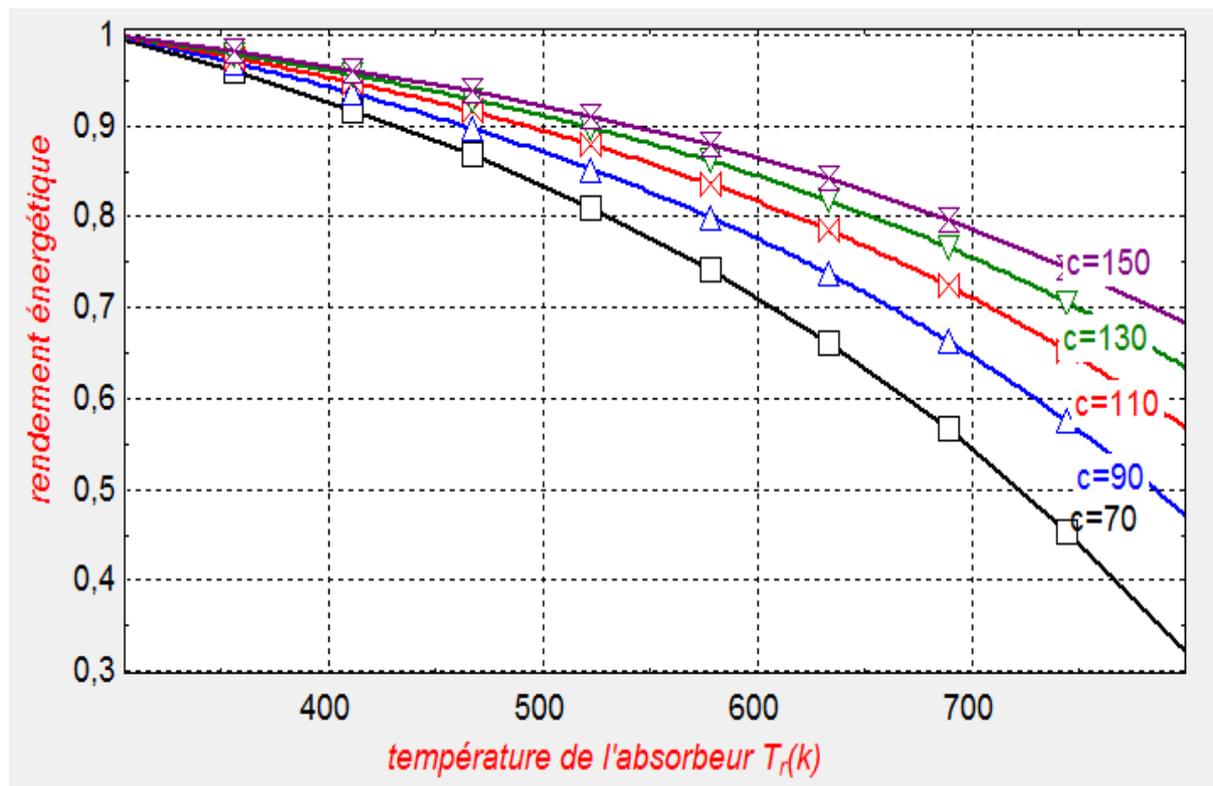
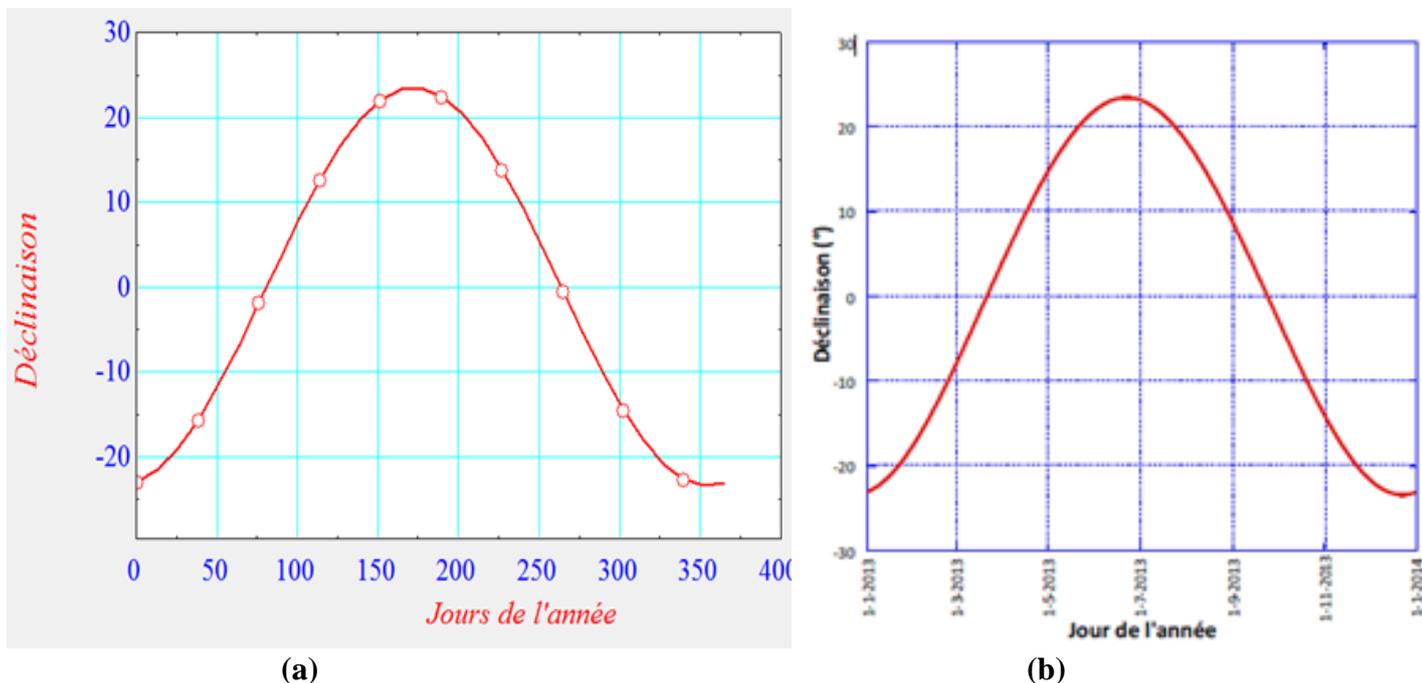


Figure. (IV.3). Variation du rendement énergétique en fonction de la température pour différentes valeurs de la concentration.

Dans la figure (IV.2), on remarque que la température du tube absorbeur augmente avec la concentration du système, ce qui est tout à fait compréhensible physiquement.

Mais par contre, sur la figure (IV.3), on constate que le rendement du concentrateur cylindroparabolique est d'autant plus faible que la température du tube absorbeur est élevée. Cela est prévisible à partir du moment que l'énergie perdue est en rapport de proportionnalité direct avec la température T_r du tube.

IV.5.3. Déclinaison solaire en fonction du jour de l'année :



(a) (b)
Figure. (IV.4).La déclinaison en fonction de n:
 (a)- Notre cas. (b)- résultats trouvés antérieurement [39].

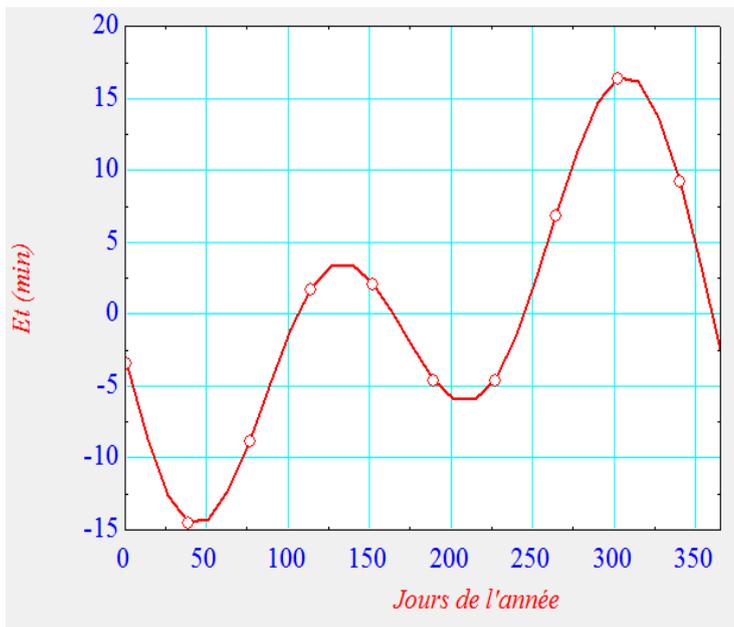
La figure (IV.4.a), montre que la déclinaison solaire varie de +23°27' (solstice d'été) à -23°27' (solstice d'hiver), ces résultats sont en bon accord avec les résultats de la figure (IV.4.b) qui ont été calculés grâce à la formule de Spencer [39], qui présente un maximum d'erreur de 0.0006 rad:

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cdot \cos(\Gamma) + 0.070257 \cdot \sin(\Gamma) - 0.006758 \cdot \cos(2\Gamma) + 0.000907 \cdot \sin(2\Gamma) - 0.002697 \cdot \cos(3\Gamma) + 0.001480 \cdot \sin(3\Gamma) \tag{IV.1}$$

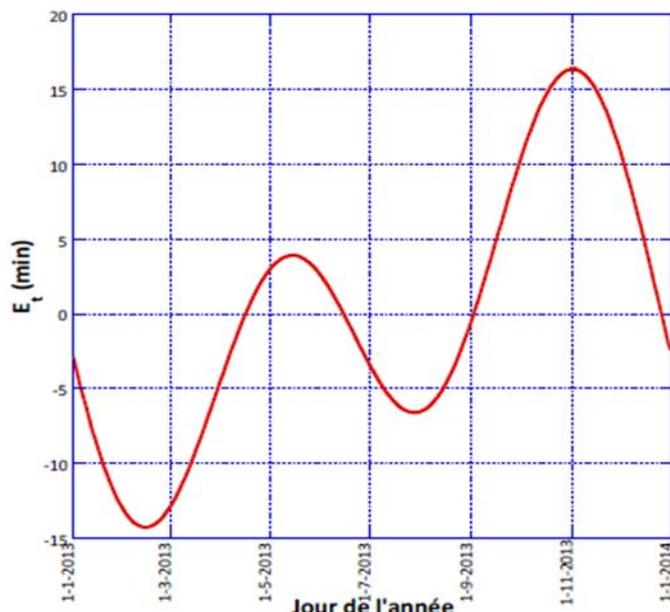
Où l'angle du jour Γ est l'angle entre le vecteur rayon du jour n et le vecteur rayon au premier janvier ($n=1$), n représente le jour de l'année (1 pour le premier janvier et 365 pour le 31 décembre).

$$\Gamma = \frac{n-1}{365.2425} \tag{IV.2}$$

IV.5.4. La variation de l'équation du temps en fonction du jour de l'année :



(a)



(b)

Figure (IV.5). L'équation du temps en fonction de n.

(a)- Notre cas. (b)- Résultats obtenus antérieurement [39].

D'après la figure (IV.5.a), on constate que l'équation du temps varie, au cours d'une année, au maximum de 17 minutes en moins à 14 minutes en plus, elle s'annule quatre fois par an, vers le 15 avril, le 13 juin, le 1^{er} septembre et le 25 décembre. Son maximum est atteint vers le 11 février, vaut 17 min, et son minimum atteint vers le 3 novembre, vaut 14 min. Ces résultats sont identiques avec les résultats de la figure (IV.5.b), qui ont été calculés précisément grâce à l'équation qui est donnée par la formule de Spencer [39] :

$$E_t = 0.0000075 + 0.001868 \cdot \cos(\Gamma) - 0.032077 \cdot \sin(\Gamma) - 0.014615 \cdot \cos(2\Gamma) - 0.040849 \cdot \sin(2\Gamma) \quad (IV.3)$$

IV.5.5. La variation de rendement énergétique en fonction de température ambiante :

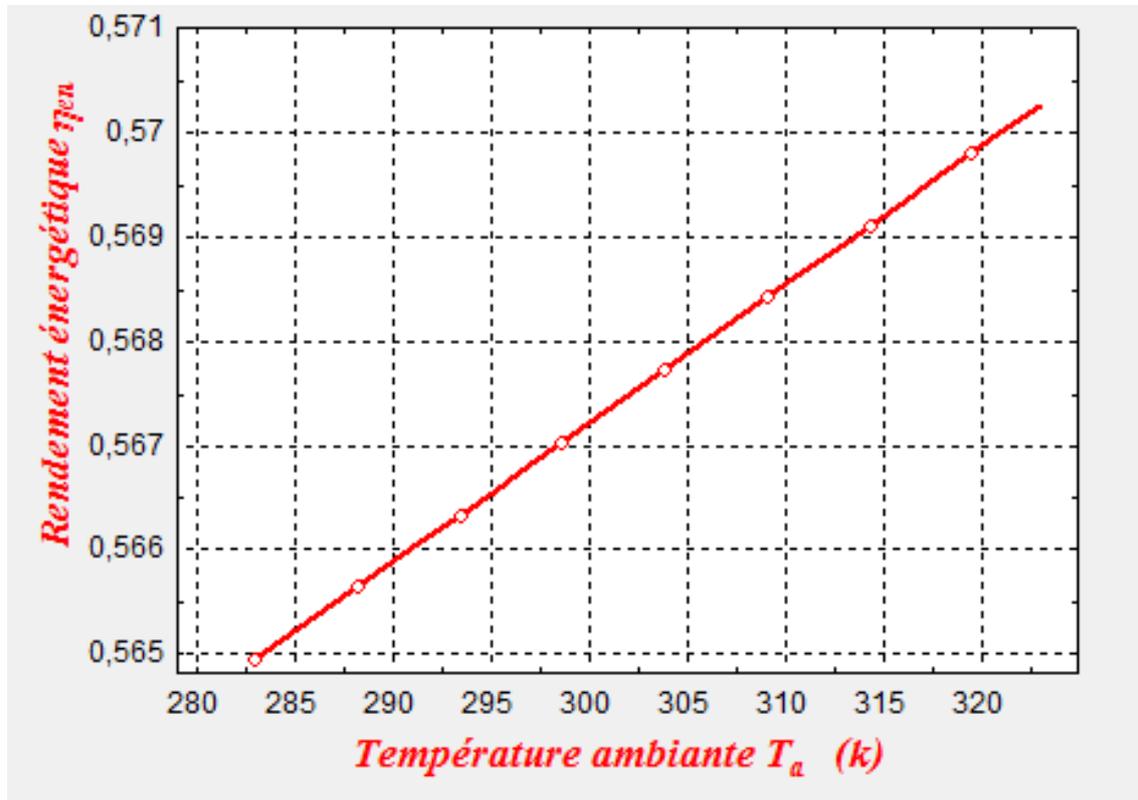


Figure (IV.6). Rendement énergétique η_{en} en fonction de la température ambiante T_a .

D'après la figure (IV.6), on constate que le rendement énergétique augmente avec la température ambiante. En effet, une température ambiante élevée conduit à un écart réduit entre la température du fluide caloporteur et celle de l'ambiance, cela se traduit par une diminution des pertes thermique, ce qui conduit à un rendement plus élevé.

IV.5.6. La variation de la puissance utile en fonction de température d'entrée du fluide :

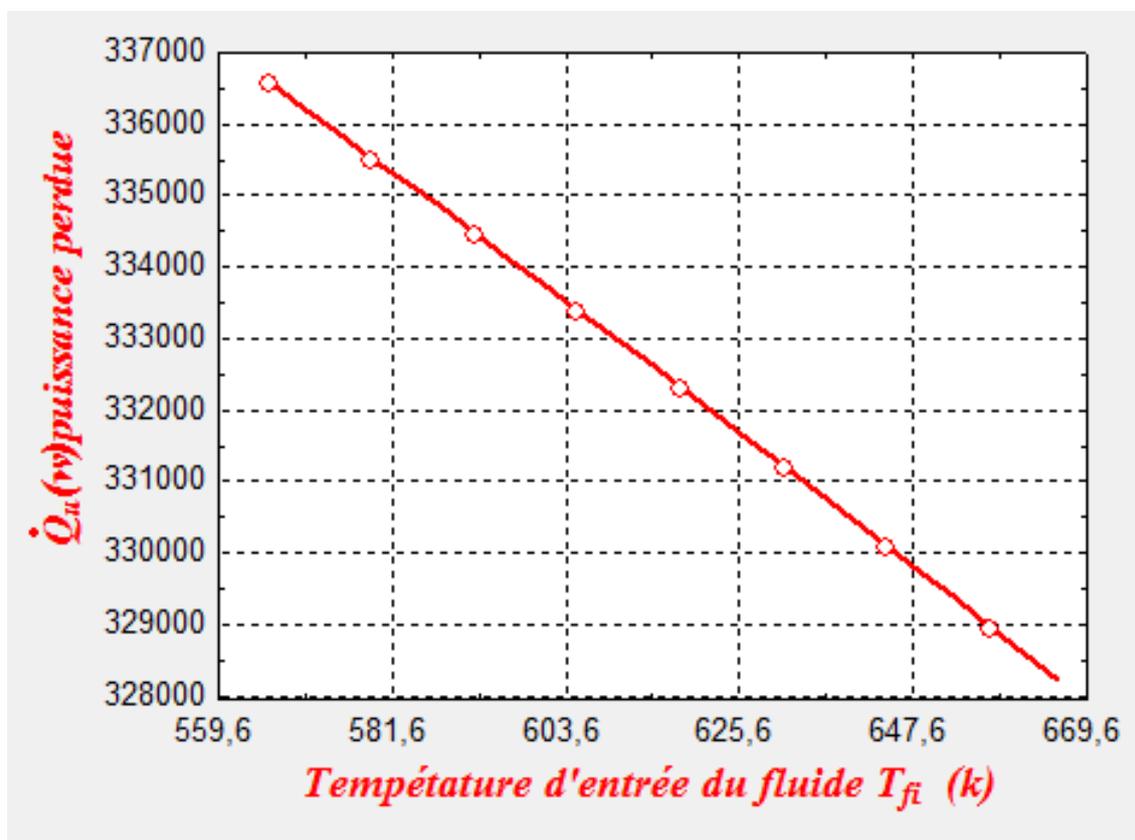


Figure (IV.7). La puissance utile (Q_u) en fonction de la température d'entrée du fluide T_{fi} .

La figure (IV.7), montre l'influence de la température d'entrée du fluide sur la puissance utile, on constate que l'augmentation de la température d'entrée du fluide fait diminuer la puissance utile et ça s'explique par l'augmentation de l'écart de températures entre celle du fluide à l'entrée et celle de l'ambiance ce qui induit à l'augmentation des pertes thermiques du capteur.

Cela signifie que dans les basses températures d'entrée, le fluide caloporteur absorbe le maximum de rayonnement solaire.

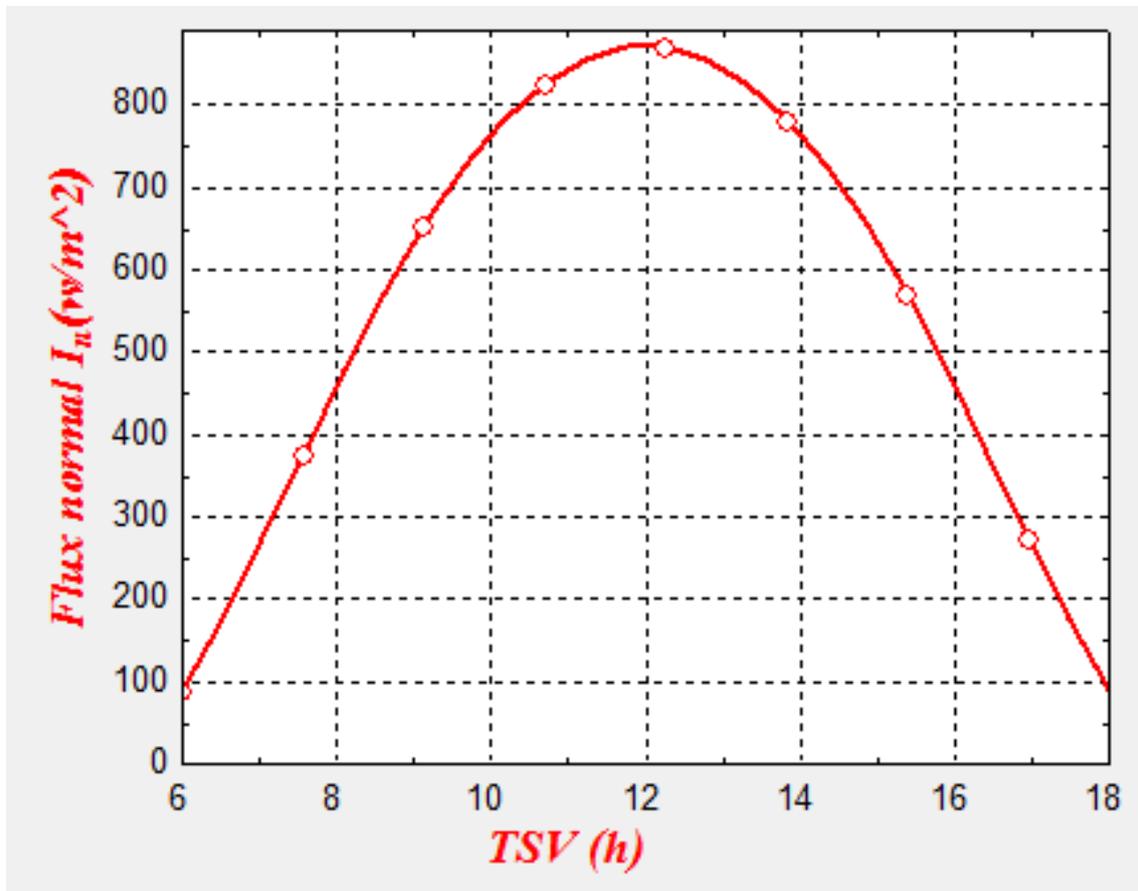
IV.5.7. La variation de flux normal, température de sortie du fluide et la puissance perdue en fonction du temps solaire vrai (TSV):

Figure (IV.8).Le flux normal I_n en fonction de TSV.

La figure (IV.8), montre l'évolution de flux solaire normal I_n en fonction du temps solaire vrais TSV, au cours d'une journée ensoleillée le flux normal augmente dès le lever du soleil pour atteindre une valeur maximale à midi solaire il décroît à nouveau jusqu'au coucher du soleil.

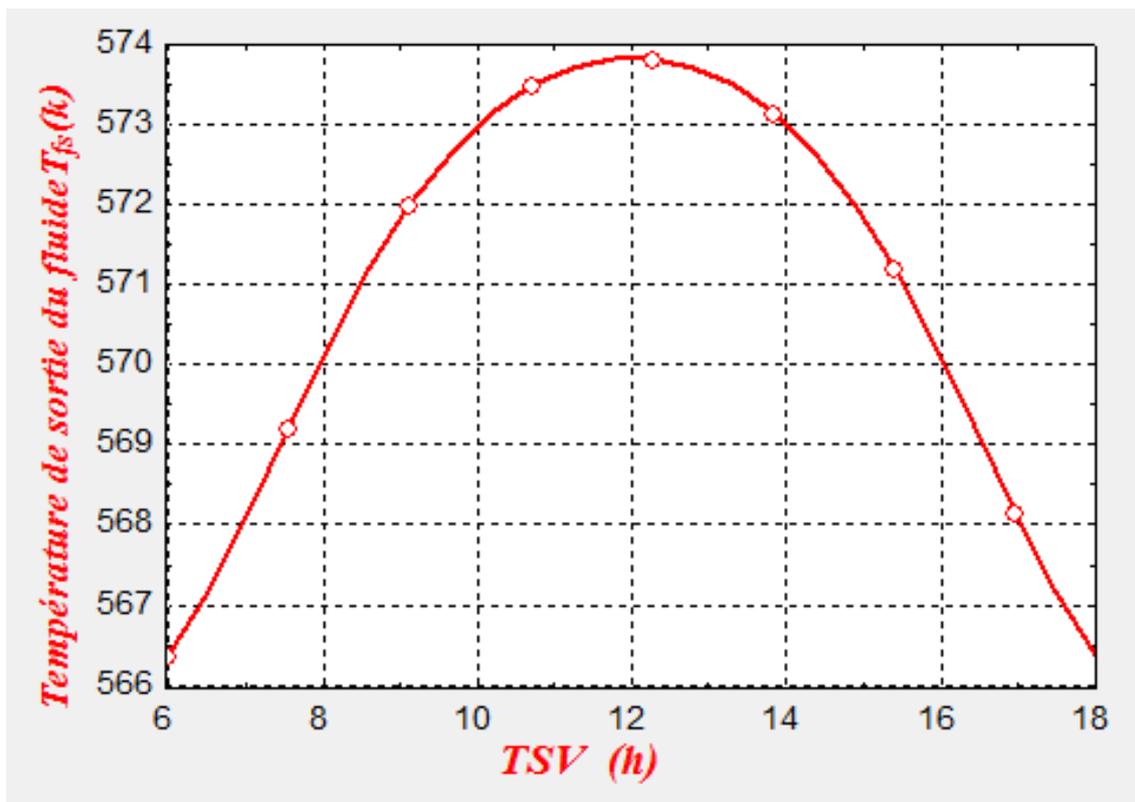


Figure (IV.9). Température de sortie du fluide T_{fs} en fonction de TSV.

La figure (IV.9), représente l'évolution de la température de sortie du fluide T_{fs} en fonction du temps solaire vrai TSV, on constate une augmentation de la température de sortie du fluide au lever du soleil due à l'accroissement de flux normal I_n jusqu' une valeur maximal à midi solaire vrai. Par la suite, température de sortie diminue jusqu'au coucher du soleil.

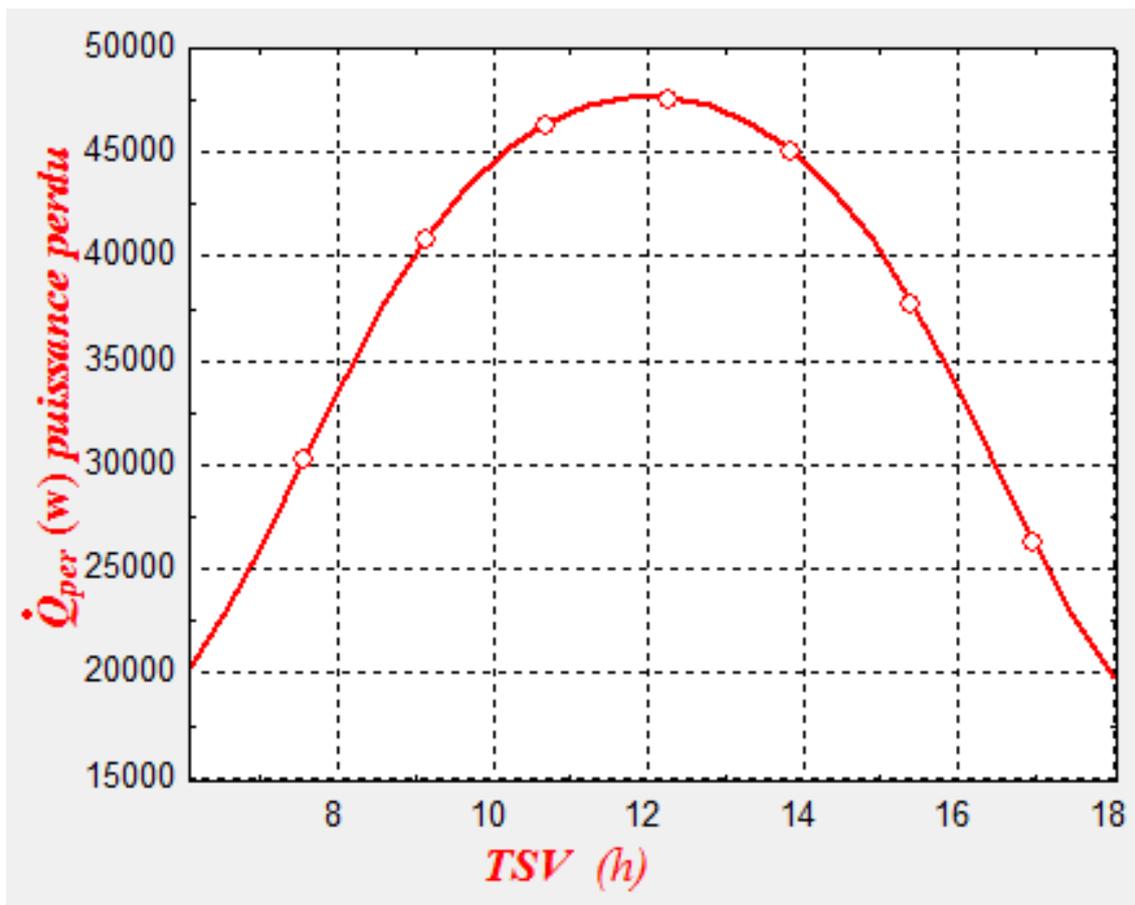


Figure (IV.10). Variation de la puissance perdue en fonction de TSV.

La figure (IV.10), montre que la puissance perdue croît de depuis le lever du soleil jusqu'à une valeur maximale de 47 kW à midi solaire vrai due à l'augmentation de flux solaire puis elle décroît lentement entre 12h et 18h jusqu'à une valeur minimal de 20 kW.

IV.5.8.la variation de rendement énergétique en fonction de temps solaire vrai :

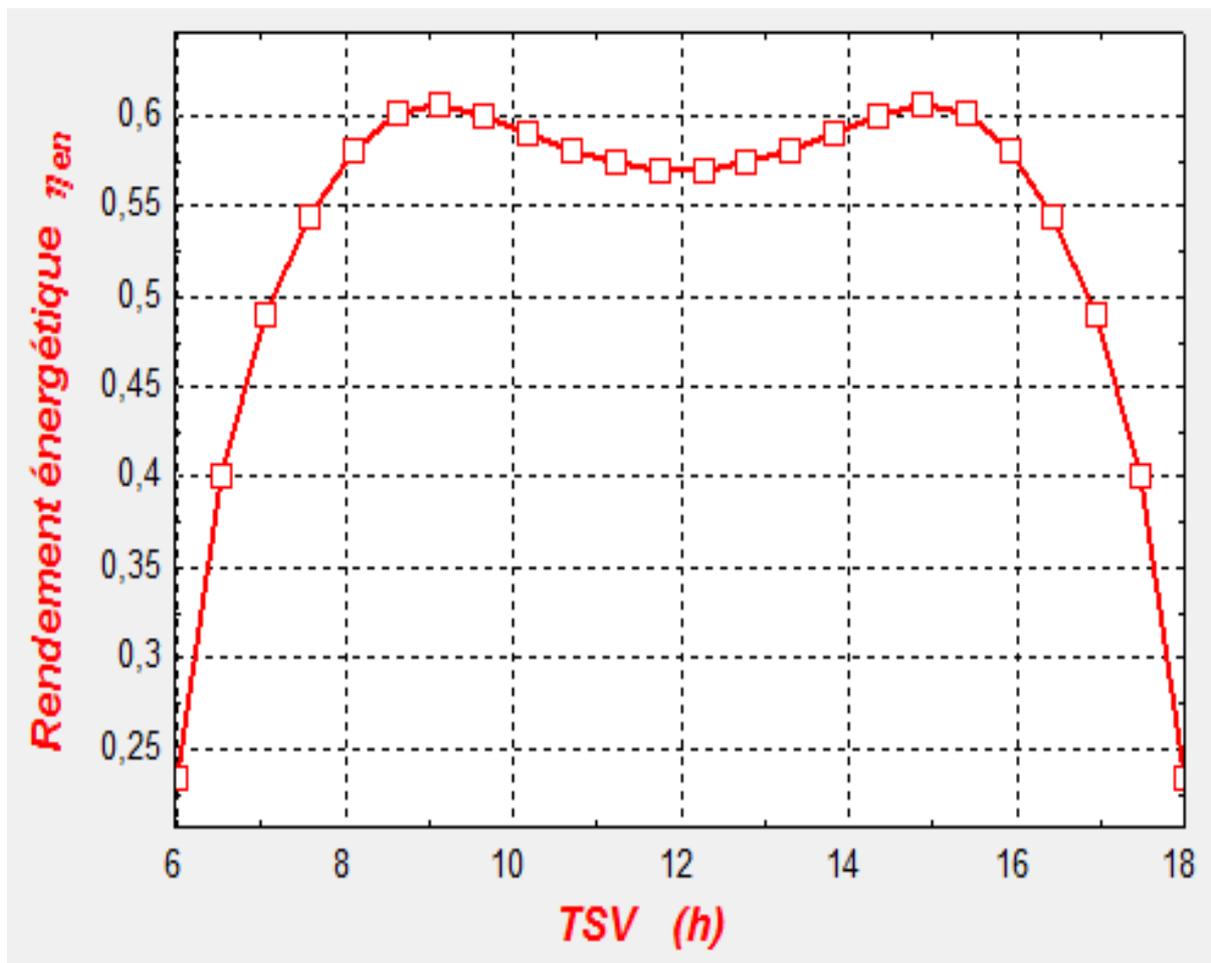


Figure (IV.11). Rendement énergétique η_{en} en fonction de TSV.

D'après la figure (IV.11), on distingue trois intervalles :

-Premier intervalle de 6h à 10h : on observe une augmentation de rendement énergétique jusqu' à atteindre une valeur maximale 0.6 due à l'augmentation de flux solaire normal.

-Second intervalle de 10h à 14h : on constate une faible diminution de rendement énergétique de 0.6 à 0.55 due à l'augmentation de l'écart de température entre l'absorbeur et l'extérieur ce qui augmente les pertes thermique.

-Troisième intervalle de 14h à 18h : le rendement augmente de 0.55 à 0.6 et il diminue à nouveau rapidement jusqu' une valeur minimale, cette diminution est due à la diminution de flux solaire normal.

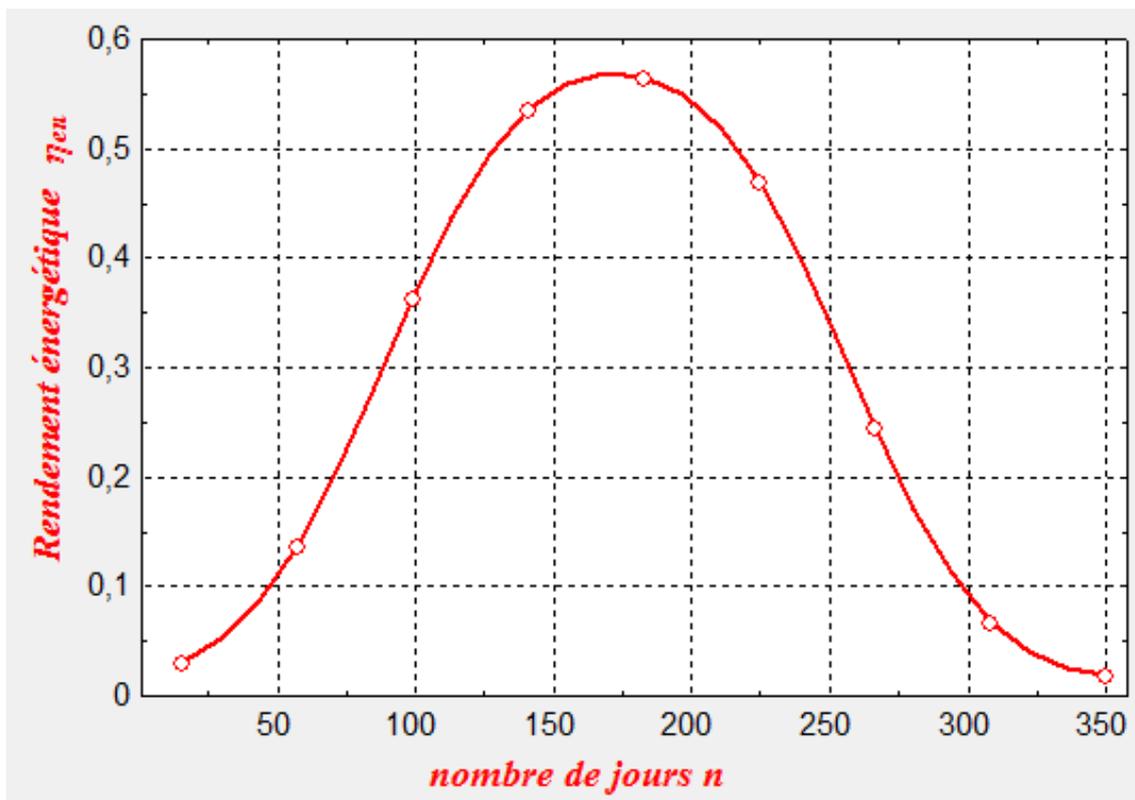
IV.5.9. Variation du rendement énergétique en fonction de nombre de jours (n) :

Figure (IV.12). Rendement énergétique en fonction du nombre de jours n .

La figure (IV.12), représente la variation du rendement énergétique en fonction de nombre de jours. On remarque que le rendement énergétique augmente dans les journées automnales et printanières jusqu'à atteindre une valeur maximale le 21 juin et il diminue dans les journées estivales et hivernales.

IV.5.10. L'influence d'angle d'ouverture sur le rendement énergétique :

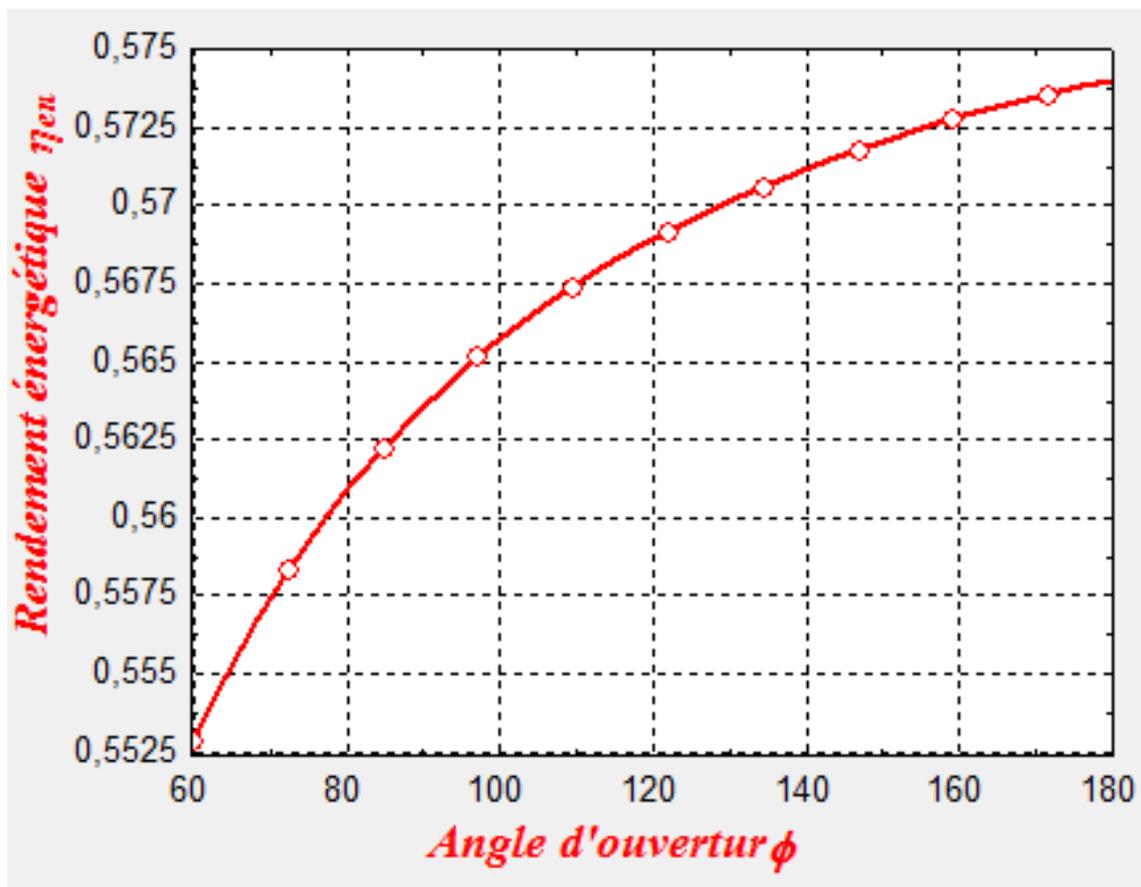


Figure (IV.13). Rendement énergétique η_{en} en fonction d'angle d'ouverture ϕ .

La figure (IV.13), montre que le rendement énergétique augmente avec l'augmentation de l'angle d'ouverture. En effet, l'angle d'ouverture du collecteur est choisi de manière à ce que le flux solaire incident soit concentré sur la surface de l'absorbeur.

IV.5.11. L'influence d'angle d'incidence sur le flux normal, et le rendement énergétique :

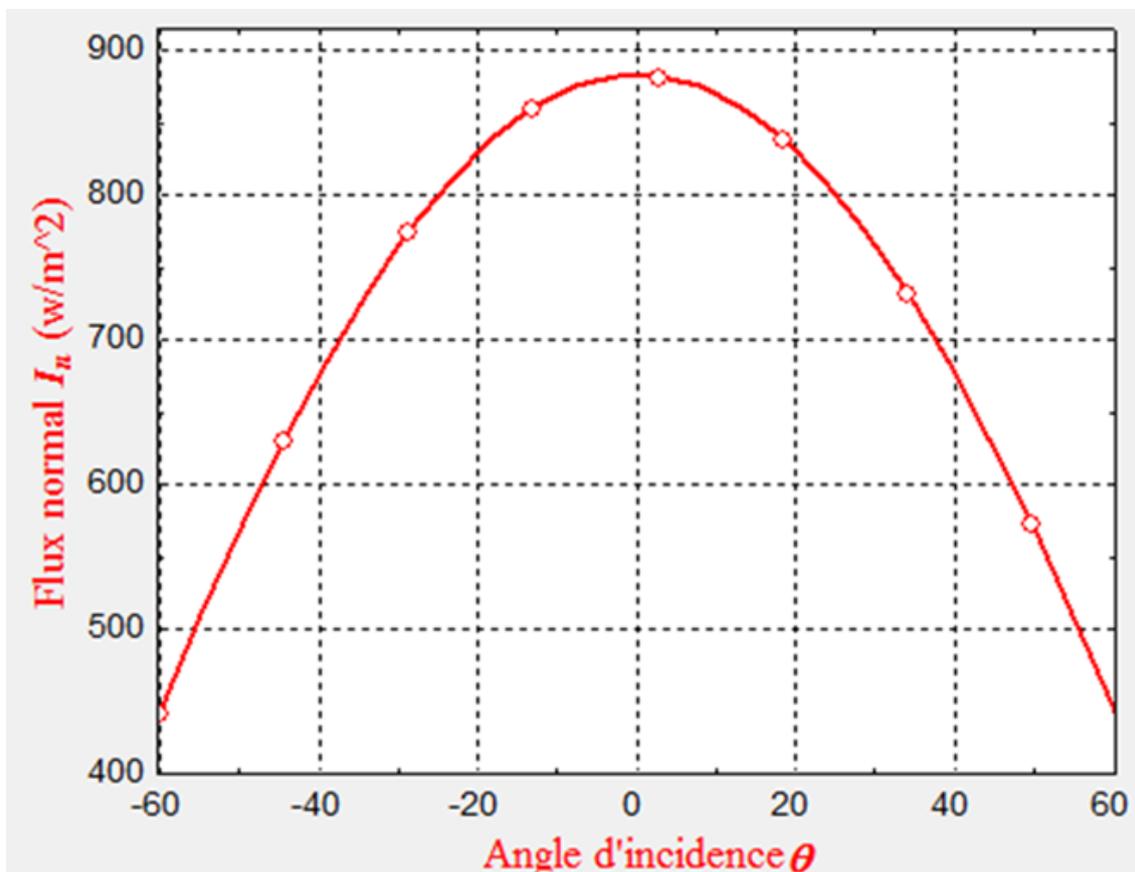


Figure (IV.14). Variation de flux normal I_n en fonction d'angle d'incidence.

La figure (IV.14), illustre les variations de flux solaire normal I_n en fonction d'angle d'incidence θ . On constate que le matin l'augmentation d'angle d'incidence de puis le lever du soleil ($\theta = -90^\circ$) engendre une augmentation de flux normal jusqu'à une valeur maximale (au zénith $\theta = 0^\circ$) dans cette position, le rayonnement normal incident est perpendiculaire à la surface du réflecteur. A partir de ($\theta = 0^\circ$), l'augmentation de l'angle d'incidence provoque la diminution de flux direct incident jusqu'à s'annuler au coucher du soleil ($\theta=90^\circ$).

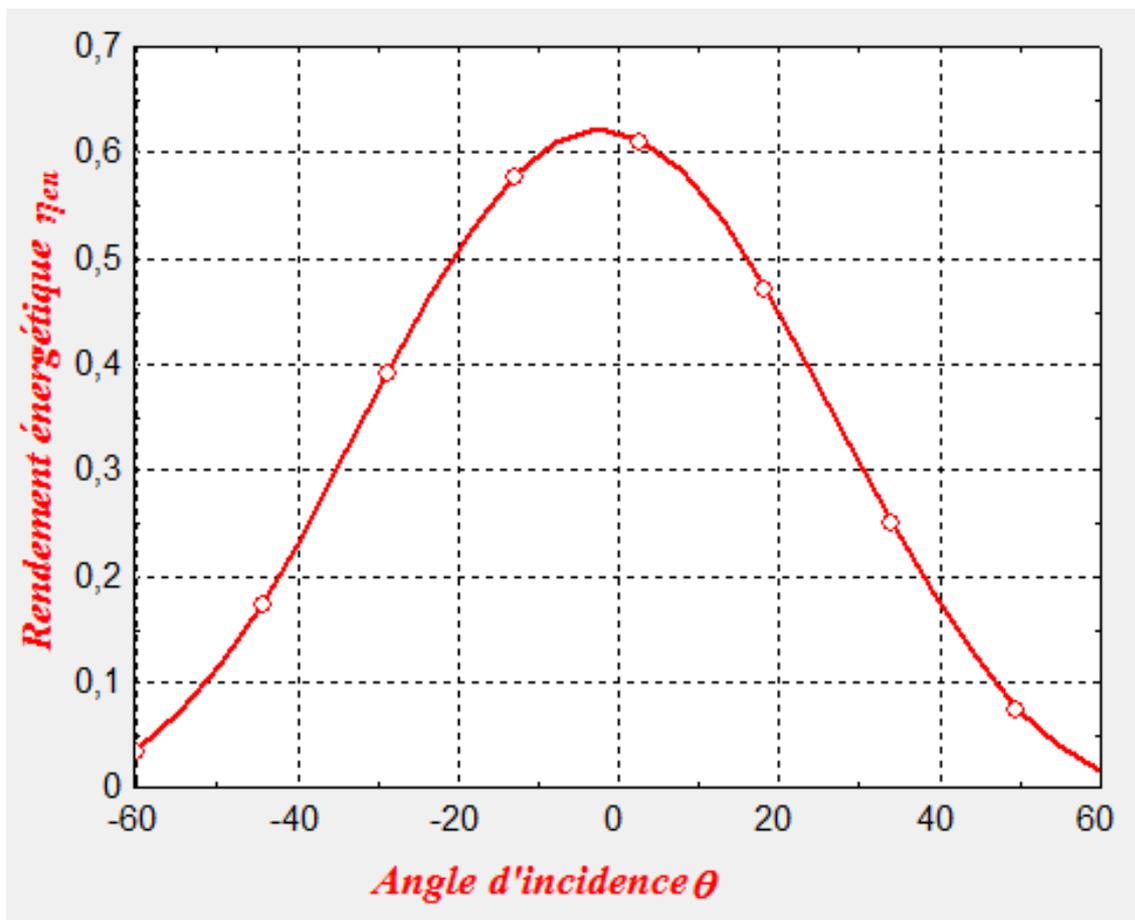


Figure (IV.15). Variation du rendement énergétique en fonction de l'angle d'incidence.

D'après la figure (IV.15), on remarque une augmentation du rendement énergétique par l'augmentation de l'angle d'incidence jusqu'à une valeur maximale 0.61 à $\theta = 0^\circ$, c'est-à-dire au zénith où le rayonnement est maximum, ensuite le rendement diminue avec l'augmentation de l'angle d'incidence.

Conclusion générale

La technologie des concentrateurs solaires offre un moyen prometteur pour l'usage de l'énergie solaire à grande puissance et à grande échelle.

Le concentrateur cylindro-parabolique présente la technologie solaire la plus mature actuellement. Il se distingue par sa simplicité ainsi que ses performances relativement élevées dans le domaine de la production de l'électricité. La détermination des performances d'un champ de concentrateur cylindro-parabolique dépend de plusieurs paramètres géométriques et optiques.

Dans ce travail nous avons proposé une modélisation mathématique d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique ainsi que un programme de calcul des performances de ce dernier.

Cette étude nous a permis de déduire que le rendement énergétique du concentrateur cylindro-parabolique est fortement lié non seulement aux paramètres optiques et géométriques de ce dernier mais aussi des paramètres géographiques du site d'implantation de la centrale et aux pertes thermiques au niveau de l'absorbeur.

Références bibliographiques

- [1] N.NOUAH N.DJENNAOUI et T.HASSONI Modélisation d'un capteur solaire cylindroparabolique Mémoire de Magister Bab Ezzouar 2014.
- [2] M. Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [3] Pierre Henri Communay: Héliothermiques; Le gisement solaire Méthodes et calculs.Groupe de Recherche et d'Édition-2002
- [4] Coordonnées célestes: sciences- physiques.ac-dijon.fr
[/astronomie/lexique_astronomique/lexique_astro/c/coordonnees_celestes.html](#) – s
- [5] M, Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985).
- [6] Retscreen, Photovoltaïque Background, International Renewable energy decision support centre, Resources Canada 2001-2002.
- [7] M. Iqbal .Une introduction au rayonnement solaire, Academic Press, New York (1983).
- [8] JA.Duffie . R.Miri , solar engineering of thermal processes , 2 ed, Inc, 1991.
- [9] J.Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [10] Alain Ricaud "Photopiles solaires", Edition Presses polytechniques et universitaires Romandes.
- [11] A. MEFTI, Contribution à la détermination du gisement solaire par traitement de données solaires au sol et d'image météosat , Thèse de doctorat d'Etat en physique, Spécialité, conversion thermodynamique, Université USTHB, 2007 .
- [12] M. BOULIFA, Estimation du rayonnement solaire par traitement d'images satellitaires, Utilisation de l'équation du transfert radiatif, Mémoire de Magister en électronique, Option Télédétection, 2005.
- [13] A. B. OUMBE NDEFOTSING, Exploitation des nouvelles capacités d'observations de la terre pour évaluer le rayonnement solaire incident au sol, Thèse de doctorat en Energétique, Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, Novembre 2009.
- [14] A .ANGSTROM , the parametres of atmospheric turbidity,Tellus XVI, 1, 64-75, 1964.

- [15] C. PERRIN de BRICHAMBAUT et C. VAUGE, Le gisement solaire, Evaluation de la ressource énergétique, technique de documentation, Librairie Lavoisier, Paris, France, 1982 .
- [16] M. Capderou : ‘Atlas solaire de l’Algérie’, OPU Alger 1988
- [17] M. Boubkir, A . Chaker et I. Zeghib, ‘ ’ contribution numérique à l’étude de rayonnement solaire incident sur un capteur plan.
- [18] SAID .BENTOUBA «Les énergies renouvelables dans le cadre d'un développement durable en Algérie willays du grand sud exemple » article Centre Universitaire de Béchar–Algérie, 11 et 12 Novembre 2006
- [19] source : Stine et Geyer, 2001
- [20] SAID .BENTOUBA «Les énergies renouvelables dans le cadre d'un développement durable en Algérie willays du grand sud exemple » article Centre Universitaire de Béchar–Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.
- [21] Pierre Henri Communay: Héliothermiques; Le gisement solaire Méthodes et calculs.Grope de Recherche et d’Edition-2002.
- [22] Dunode, 3eme edition « énergie solaire photovoltaïque » année 2006..
- [23] Pierre Bessemoulin et Jean Oliviéri, « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », La Météorologie 8esérie - n°31 - septembre 2000
- [24] Principe de fonctionnement de solaire thermodynamique, in: Syndicat des énergies renouvelables [on line] (2012) www.enr.fr [consulted juin 2012].
- [25] Richter C., Focus on Concentrating Solar Power The state of the art of the technology. http://www.ecosources.info/dossiers/Centrale_solaire_capteur_parabolique.
- [26] Les centrales à capteurs paraboliques [on line] (2008)
- [27] Renewable Energy Essentials: Concentrating Solar Thermal Power, International Energy Agency (IEA). (2009).
- [28] M.Kayouche , système de poursuite solaire, bilan énergétique et optimisation de réglage. Thèse de magister. Université de Constantine, 1996.

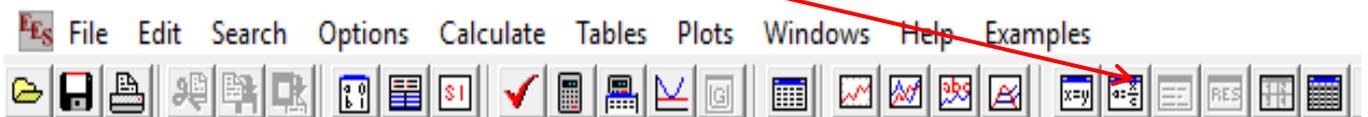
- [29] BENDERRADJI AMMAR, Etude théorique et expérimentale des performances d'un concentrateur Cylindro-Parabolique, thèse de magister, Batna 1996.
- [30] A. Gama, M. Haddadi et A. Malek, «Étude et réalisation d'un concentrateur cylindroparabolique avec poursuite solaire aveugle» Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 11, N°3 (2008) 437 – 451.
- [31] Josée Babonnaud, contribution à l'étude de la concentration de l'énergie par les héliostats focalisant, thèse de doctorat Paris VI, Marie et Pierre Curie
- [32] J. BERNARD. Énergie solaire calculs et optimisation. Édition ellipses, 2004.
- [33] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, le rayonnement solaire conversion thermique et applications Edition Tec-Doc, 1980.
- [34] THORSTEN A. STUETZELE, Automatic Control of the 30 Mwe SEGS VI parabolic trough plant, A thesis for the degree of the degree of master of science, University of Wisconsin – Madison. 2002.
- [35] Alrobei, H, Effectiveness of semi combined solar power plan available
[Htt://www.softinway.com/science/articles\(2004\)](http://www.softinway.com/science/articles(2004))
- [36] Duffie, J. solar engineering of thermal processes 2nd Ed, Wiley, New York (1991)
- [37] K. S. Ong, C. C. Chow Performance of a solar chimney, solar energy 74 117 .(2003)
- [38] F. Burkholder and C. Kutscher, 'Heat Loss Testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver Implemented in Engineering Equation Solver', National Renewable Energy Laboratory, Technical Report, NREL/TP-550-34169, 2003.
- [39]- C. Hua and C. Shen, Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system, in Proc. APEC, pp. 679–685, 1998.
- [40] D. Yogi Goswami, Frank Kreith, Jan F. Kreider, Principale of solaire Edition 2nd Taylor et Francis.

Démarrage



Equations Window :

Le système d'équation à résoudre est écrit dans cette fenêtre, c'est la fenêtre la plus importante du logiciel



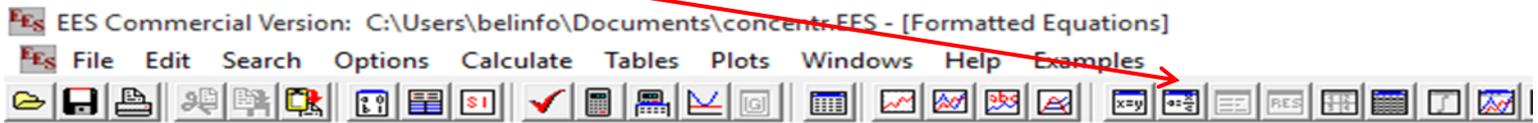
```

C=(sigma*(T_r^4-T_E^4)+h*(T_r-T_a))/((1-eta_e)*S)
S=800"WM^(-2)"
T_E=298"K"
T_a=298"K"
h=7,3*V^0,8
V=6"m/s"
T_r=500"K"
sigma=5,67*10^(-8)
eta_e=0,3

```

Formatted Equations :

Il est possible de visualiser les équations sous leur forme mathématique («formatter Equation») :



$$C = \frac{\sigma \cdot (T_r^4 - T_E^4) + h \cdot (T_r - T_a)}{(1 - \eta_e) \cdot S}$$

$$S = 800 \text{ WM}^{(-2)}$$

$$T_E = 298 \text{ K}$$

$$T_a = 298 \text{ K}$$

$$h = 7,3 \cdot V^{0,8}$$

$$V = 6 \text{ m/s}$$

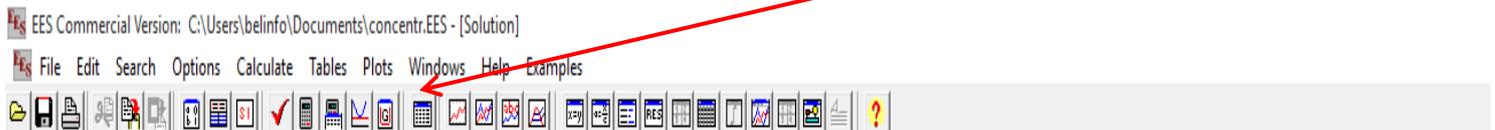
$$T_r = 500 \text{ K}$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$$

$$\eta_e = 0,3$$

Menu Calculate :

Ou utiliser le menu Calculate-Solve pour obtenir la solution suivante :



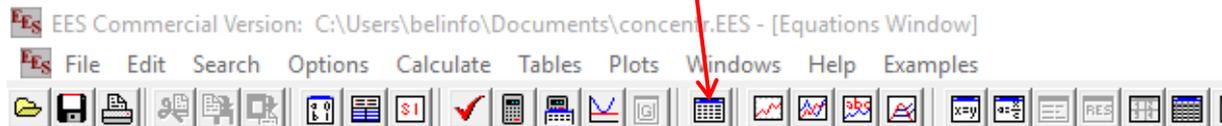
Unit Settings: [kJ][C]/[kPa]/[kg]/[degrees]

C = 16,57 $\eta_e = 0,3$ h = 30,61 S = 800 $\sigma = 5,670E-08$ $T_a = 298$ $T_E = 298$ $T_r = 500$ V = 6

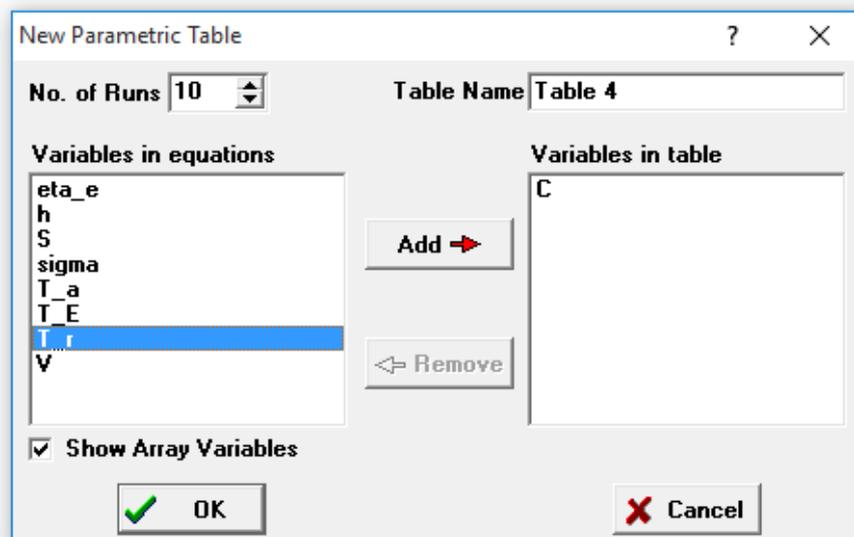
Calculation time = ,0 sec

Création d'une table paramétrique :

Afin de créer une table, il faut d'abord mettre les variables entre accolades, ensuite en cliquant sur « New parametric Table » on peut sélectionner les variables que l'on veut importer dans la table à l'aide du bouton « Add »



```
C=(sigma*(T_r^4-T_E^4)+h*(T_r-T_a))/((1-eta_e)*S)
S=800*WM^(-2)
T_E=298"K"
T_a=298"K"
h=7,3*V^0,8
V=6"m/s"
{T_r=500"K"}
sigma=5,67*10^(-8)
eta_e=0,3
```



Après avoir appuyé sur « ok » une table paramétrique vide de 10 lignes apparaît, on fixe la première et la dernière valeur de la variable et en cliquant sur l'option « Solver Table » du menu « Calculate »

The screenshot shows a software interface with a menu bar (File, Edit, Search, Options, Calculate, Tables, Plots, Windows, Help, Examples) and a toolbar. Below the toolbar is a table with columns labeled 'C' and 'Tr'. The table has 10 rows labeled 'Run 1' through 'Run 10'. A dialog box titled 'T_r: Column 2' is open, showing settings for the 'Tr' column. The dialog box has the following fields and options:

- First Row: 1
- Last Row: 10
- First Value: 300
- Last value: (empty)
- Repeat pattern every: 10 rows (checkbox is unchecked)
- Buttons: OK, Cancel, Clear Values, Set Values

On obtient le résultat suivant :

	C	² Tr
Run 1	0,131	300
Run 2	3,966	355,6
Run 3	8,276	411,1
Run 4	13,22	466,7
Run 5	18,99	522,2
Run 6	25,78	577,8
Run 7	33,82	633,3
Run 8	43,37	688,9
Run 9	54,7	744,4
Run 10	68,11	800

Création d'un diagramme :

A l'aide d'une table paramétrique, il suffit de sélectionner le type « XY Plot » sous l'option « New Plot Window » du menu « Plot » le menu suivant apparaît :

The screenshot shows the 'New Plot Setup' dialog box with the following settings:

- Tab Name:** Plot 4
- Description:** (empty)
- X-Axis:** C
- Y-Axis:** T_r
- Table:** Parametric Table, Table 4
- First Run:** 1
- Last Run:** 10
- Format X:** A 0
- Minimum X:** 300,0
- Maximum X:** 800,0
- Interval X:** 100,0
- Format Y:** A 4
- Minimum Y:** 0,00
- Maximum Y:** 70,00
- Interval Y:** 10,00
- Line:** (solid line)
- Symbol:** None
- Color:** (black)

Run	C	T _r
Run 1	0,131	300
Run 2	3,966	355,6
Run 3	8,276	411,1
Run 4	13,22	466,7
Run 5	18,99	522,2
Run 6	25,78	577,8
Run 7	33,82	633,3
Run 8	43,37	688,9
Run 9	54,7	744,4
Run 10	68,11	800

A partir de cette boîte de dialogue le processus est direct et relativement simple pour obtenir le diagramme suivant :

