

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE CONSTANTINE 1
FACULTE DES SCIENCES EXACTES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° d'ordre :

Série :

MEMOIRE

**Présenté pour obtenir le Diplôme de Magister en Physique
Spécialité : Energies Renouvelables**

THEME

**Contribution à l'Etude et a la Simulation
d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique**

PAR

BOUGUETAIA Nadia

Soutenu le :...../...../2013

Devant le Jury :

Président :	A. CHAKER	Prof.	Université Constantine 1
Rapporteur :	N. BELLEL	Prof.	Université Constantine 1
Examineurs :	M. DJEZZAR	Prof.	Université Constantine 1
	A. ZAATRI	Prof.	Université Constantine 1

DEDICACES

A Mes Parents

Mes Sœurs et mon Frère

Et à mes amis (e)

REMERCIEMENTS:

Je remercie toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail :

Je cite en particulier mon Encadreur Monsieur N.BELLEL Professeur au Département de Physique Université de Mentouri qui a accepté de diriger mon travail, et pour ses encouragements.

A Madame A.Chaker Professeur à l'Université de Mentouri au Département de Physique Energétique mon profond respect pour avoir accepté de présider le jury.

A Monsieur M. DJEZZAR Professeur à l'Université de Mentouri au Département Physique Energétique pour ses conseils et ses encouragements et qui m'honore en acceptant d'examiner ce travail.

A Monsieur A. ZAATRI Professeur à l'Université de Mentouri au Département de Génie-mécanique pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Résumé :

Cette étude porte sur la modélisation mathématique d'un concentrateur solaire de type cylindro-parabolique. Un bilan thermique a été établi respectivement sur le fluide caloporteur, sur le tube absorbeur et puis sur l'enveloppe du verre. Le système d'équation obtenu est résolu par la méthode des différences finies. On obtient les résultats pour une journée typique. La variation de la température du fluide caloporteur, du tube absorbeur et de l'enveloppe en verre, ainsi que les puissances et le rendement du concentrateur et des différents facteurs dans le but d'améliorer les performances du prototype.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

CHAPITRE I : Gisement Solaire.....	04
Introduction.....	05
I.1.2 Le Rayonnement Solaire.....	06
I.1.2.1 Généralités sur le Soleil.....	06
I.1.2.2. Constante Solaire.....	08
I.1.2.3. Translation et Rotation de la Terre.....	09
I.1.2.4. Le spectre solaire :.....	10
I.1.2.5. Rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère.....	12
I.1.3 La position du soleil.....	12
I.1.3.1. Les coordonnées géographiques terrestres [5].....	12
I.1.3.2. Déclinaison.....	14
I.1.3.3. L'équation du temps.....	15
I.1.3.4. Le temps solaire vrai et l'angle horaire du soleil.....	16
I.1.3.5. Hauteur angulaire du soleil.....	17
I.1.3.6. Azimut du soleil.....	17
I.1.3.7. Durée du jour.....	18
I.1.3.8. Décalage horaires.....	18
I.1.3.9. Fuseau horaire.....	19
I.1.4. Eclairage d'un récepteur plan.....	20
I.1.4.1 Rayonnement diffus.....	22
I.1.4.2. Eclairage Global.....	22
I.1.5. L'Importance du Gisement Solaire Algérien.....	23

CHAPITRE II : LES CAPTEURS A CONCENTRATION.....	25
Introduction.....	25
II.1 Description de la Concentration.....	25
II.2 Détermination de la Concentration Géométrique.....	27
II.3 Concentration Géométrique Maximale.....	29
II.4 Concentration Sphérique.....	30
II.5 Concentrateur Parabolique.....	33
II.6 Les Centrales Solaires.....	37
II.7 La Poursuite Solaire.....	37
CHAPITRE III : BILAN ENERGETIQUE.....	40
Introduction.....	40
III.1. Concentration Idéale.....	41
III.2. Concentration Géométrique.....	41
III.3. Etude Théorique du Concentrateur Cyllindroparabolique.....	42
III.3.1. Performances Optiques d'un Concentrateur Cyllindroparabolique.....	42
III.3.1.1. Taux de Concentration.....	42
III.3.1.2. Facteurs Optiques.....	42
III.3.1.3. Rayonnement Absorbé.....	43
III.3.1.4. Température de Sortie du Fluide Caloporteur.....	43
III.3.1.5. Rendement d'un Concentrateur Solaire.....	43
III.4. Montage.....	43
III.5. Bilan Thermique.....	44
III.5.1. Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.....	44
III.5.2. Entre l'Absorbeur et l'Enveloppe en Verre.....	45
III.5.3. Bilan Thermique entre l'Enveloppe du Verre et l'Environnement	45
* Présentation des nœuds de notre système.....	46
* Hypothèses utilisées dans le modèl de calcul.....	46
III.5.4. Différents Mode de Transfert de Chaleur.....	47
III.5.4.1. Transfert de Chaleur entre l'Absorbeur et le Fluide Caloporteur.....	47
III.5.4.2. Transfert de Chaleur entre l'Absorbeur et l'Environnement du Verre.....	47
III.5.4.3. Transfert de Chaleur entre l'Enveloppe du Verre et l'Environnement.....	49
III.6. Pertes Thermiques.....	49
III.6.1. Pertes Par Conduction.....	50
III.6.2. Pertes par Convection.....	50

III.6.3.Pertes par rayonnement.....	51
III.7. Discrétisation des Equations.....	52
* Structure du code de calcul.....	55
* L’organigramme de calcul.....	57
 CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS	
IV.1. Introduction.....	59
IV.2. Les Caractéristiques du Prototype.....	59
IV.3. Les Caractéristiques des matériaux utilisés.....	59
IV.4. Les Résultats Numériques.....	60
IV.5. La Validation des Résultats avec l’expérimental.....	76
IV.6. Conclusion Générale.....	78
Références Bibliographiques.....	79
Annexes.....	81

NOMENCLATURE

TSV : Temps solaire vrai	[heure]
TSM : Temps solaire moyen	[heure]
ET : Equation du temps	[minute]
h : Hauteur angulaire solaire	[degré]
a : Azimut	[degré]
E : Emittance	[W/m ²]
I : Eclairage solaire direct	[W/m ²]
D : Rayonnement Diffus	[W/m ²]
G : Rayonnement Global	[W/m ²]
Io : Energie solaire reçue par une surface horizontale	[W/m ²]
Patm : Pression atmosphérique	[Pa]
θ : Angle d'ouverture du concentrateur	[degré]
S* : Eclairage direct dans la section d'ouverture du concentrateur,	
S ₀ : Section d'ouverture	
S _p : Section de passage	
S* : Surface de l'image réelle du soleil dans le plan focal.	[m ²]
Q _G * : Flux solaire moyen dans l'image de Gauss	[W/m ²]
C : Concentration géométrique	
η : efficacité du concentrateur	
C _e * : Concentration effective	
Tc : Température de Concentrateur	[K]
γ : Facteur optique du collecteur (Interception)	
cos θ : Angle d'incidence	(degré)
h : Hauteur angulaire du lieu	
ρ : Facteur de réflexion du miroir du concentrateur	
τ : Facteur de transmission du miroir	
C : Taux de concentrateur	
σ' : Paramètre d'erreur aléatoire universel	
σ : Déviation de la distribution du rayonnement direct	
B' : Paramètre non aléatoire universel due aux erreurs angulaire	

B : Angle entre le rayon réfléchi du centre de soleil et la normal à l'ouverture	
d' : Paramètre d'erreurs non aléatoire universel due au mal positionnement de l'absorbeur dans le plan focal($d'=dr/d_{abs}$)	
A_r : Surface du récepteur	[m ²]
T_S : Température de sortie de fluide caloporteur	[K]
Q_{conv} : Perte de transfert par convection	[W]
Q_{ray} : Perte de transfert par rayonnement	[W]
Q_{cond} : Perte de transfert par conduction	[W]
ε : Emissivité de surface de l'absorbeur	
ε_C : Emissivité de verre du couvert	
F_{rc} : Facture de forme entre le récepteur et le couvert qui est égal à 1	
A_O : Surface d'ouverture du concentrateur cylindro-parabolique	[m ²]
τ_a : Coefficient transmission absorption	
τ : Coefficient de Stefan Boltzman ($5,667 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{K}^4$)	
D_e, D_i : Diamètre extérieur et intérieur de l'absorbeur	[m]
S_G : donnée par les rayons paraxiaux (image de Gauss)	[m ²]
A_{abs} : Surface de l'absorbeur	[m ²]
A_v : Surface du vitrage	[m ²]
T_{abs} : Température de l'absorbeur	[K]
V : Vitesse du vent	[m/s]
$Q_{absorbée}$: Puissance absorbée par l'absorbeur	[W]
$Q_{gagnée}$: Puissance gagnée par le fluide	[W]
$Q_{externe}$: Puissance perdue	[W]
ρ : Densité	[kg/m ³]
c : Chaleur spécifique	[J/kg.K]
v : Débit volumique	[m ³ /s]
δ : La déclinaison du soleil	[degré]
ω : L'angle horaire du soleil	[degré]

Introduction :

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. Ces atouts, alliés à des technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables mais de manière encore très inégale selon le type de ressources considérées. La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche. Aussi est-il important que chacun de nous surveille au plus près sa propre consommation d'énergie.

Les énergies renouvelables (ER) ont le vent en poupe, mais depuis quelques années seulement. Les États, les industriels, ont longtemps négligé ces énergies naturellement offertes par la planète au profit d'énergies immédiatement plus rentables, mais aussi plus coûteuses pour l'environnement. Aujourd'hui le vent a tourné, et les énergies renouvelables, lentement, trouvent des applications adaptées et économiquement viables dans de multiples domaines.

Certes, les années qui viennent s'annoncent prometteuses pour les énergies propres. Entre 1993 et 1998, les capacités " renouvelables " mondiales ont crû de 2,4 % par an. La lutte contre le changement climatique, le développement de la production d'électricité décentralisée et le progrès technique devraient donner un formidable coup de fouet à ces jeunes filières. Toutefois, de nombreux experts, estiment que la part des renouvelables, même si elle augmentera dans les années qui viennent, restera globalement faible. D'une part, parce que les ressources d'énergies fossiles sont encore considérables : 40 ans de réserves prouvées de pétrole, 62 ans pour le gaz, 400 ans pour le charbon. D'autre part, parce que les ER resteront probablement toujours plus chers que les énergies classiques, tant le prix de ces dernières n'intègre pas leurs coûts environnementaux. Aussi est-il important, pour préserver notre environnement, de veiller dès à présent à réduire notre consommation d'énergie. Selon une étude réalisée par le ministère en mars 2000, cette consommation augmentera chaque année de 1,4% par an

L'énergie solaire est transmise à la Terre à travers l'espace sous forme de particules d'énergie, les photons et de rayonnement.

L'énergie solaire peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés.

L'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). En utilisant la chaleur transmise par rayonnement plutôt que le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes d'énergie solaire comme les cellules photovoltaïques.

Deux principes fondamentaux sont appliqués et éventuellement parfois combinés :

- capter l'énergie des rayons solaires grâce à un corps noir;
- concentrer le rayonnement solaire en un point (four solaire).

* Notre étude est consacrée à la concentration solaire et plus précisément le concentrateur cylindro-parabolique et qui comporte les chapitres suivants :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude gisement solaire.
- Le deuxième chapitre porte une étude bibliographique de la concentration solaire ainsi les différents types de concentrateurs solaires.
- Le troisième chapitre porte sur une étude sur le concentrateur cylindro-parabolique, bilan énergétique, mise en équation du système et résolution par la méthode des différences finis.
- Le quatrième chapitre exploitation et interprétation des résultats. On finira notre étude par une conclusion générale.
- La partie annexes comprend notamment les propriétés thermo physiques de l'eau, et la méthode des différences finis et les appareils et méthodes de mesures du rayonnement solaire.

Chapitre I

1.1 Introduction

L'énergie solaire est l'énergie qui provient du rayonnement solaire, directement à travers l'atmosphère.

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires.

L'énergie solaire est donc à l'origine de toutes les énergies sur Terre à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice.

L'Homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie Alimentaire, énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou énergie de la Biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'énergie électrique et l'énergie thermique obtenue à partir de cette dernière.

De cela on constate que le gisement solaire c'est les éléments qui décrivent la révolution du rayonnement solaire au cours d'un temps précis pour cette cause il est utilisé dans des espaces variés tel que la météorologie, les applications énergétiques, et l'agriculture dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin d'éléments d'irradiation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs exploit.[7]

Bien qu'il existe un réseau de stations d'évaluation du gisement solaire, le nombre de ces stations est très limité. En Algérie, comme le réseau Chems d'où la station de mesure du rayonnement solaire du CDER à Bouzariah qui assure la mesure de la composante globale du rayonnement solaire chaque 5minutes au cour de la journée. Le nombre de ces stations étant minime et c'est pour cela que divers modèles ont été proposés pour estimer le gisement solaire à une échelle locale ou régionale. Ces modèles s'étendent des codes de calcul les plus complexes et les plus élaboré.

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

I.2 Le Rayonnement Solaire

I.2.1 Généralités sur le Soleil

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse avec un diamètre de 1,39. 10⁹m et est à distance moyenne de 1,49. 10¹¹m de la terre. Comme vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant il ne tourne pas comme un corps solide; une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 aux régions polaires. Le soleil est considéré comme un corps noir avec une température effective de 5777K. La température des régions intérieures centrales est de l'ordre de 8.10⁶ à 40.10⁶ K et la densité est estimée à 100 fois celle de l'eau. Le soleil est en effet, un réacteur de fusion continu avec ses constituants sous forme gazeuse retenue par des forces gravitationnelles, plusieurs réactions de fusion est déclenché pour intensifier l'énergie rayonnée par le soleil. Le processus le plus important est la transformation de l'hydrogène en hélium par une réaction thermonucléaire. Cependant, comme la masse du noyau de l'hélium est moins lourde que celle de quatre protons d'hydrogène, la masse perdue dans la réaction thermonucléaire est convertie en énergie. [4]

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

Dans la structure schématique du soleil illustré dans la figure I.1, il est estimé que 90% de l'énergie est générée dans la région du disque solaire située entre 0 et 0,23R, ou R le rayon du soleil, qui représente 40% de la masse du soleil. A distance de 0,7R du centre, la température diminue d'environ 130 000 K et la densité de 70 kg/m³ ; Là, le processus convectif du soleil devient important et la zone comprise entre 0,7 et 1, 0R est appelée : zone convective. Dans cette zone, la température diminue d'environ 5000 K et la densité d'environ 10⁻⁵ kg/m³. [12]

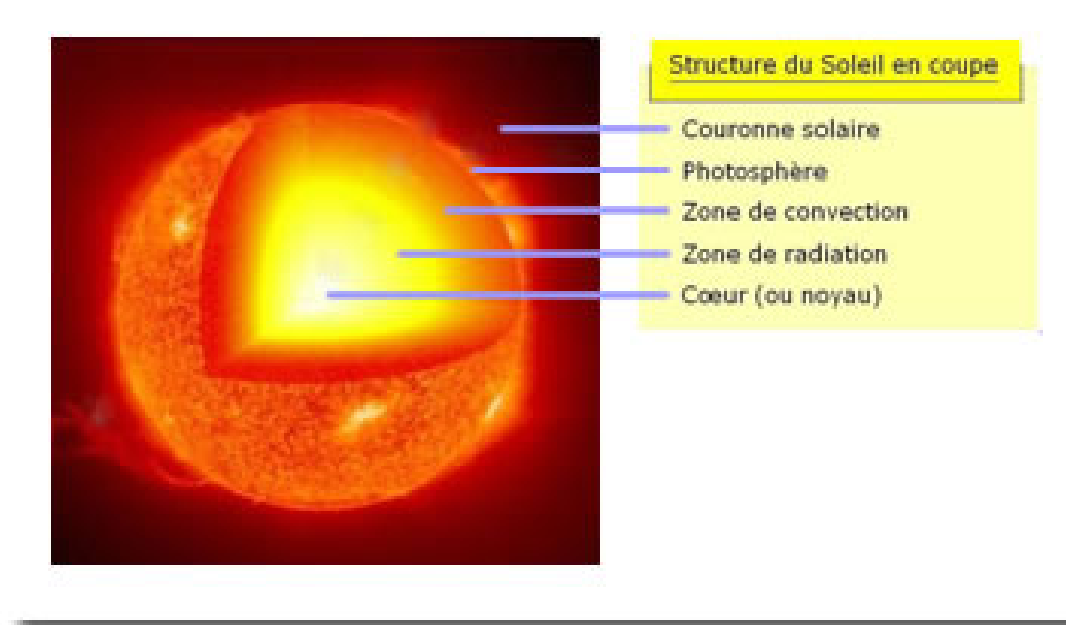
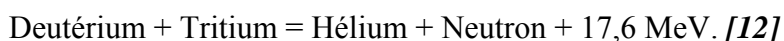


Fig. I.1 La structure du soleil [image de wikipédia]

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

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

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



I.2.2. Constante Solaire

La **constante solaire** exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de 1 m^2 située à une distance de 1 ua (distance moyenne Terre-Soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère. Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère. Sur Terre : Cette distance a une faible variation au cours de l'année, compte tenu de la légère anomalie de l'orbite terrestre qui est d'environ 1,7%. La constante solaire est une valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sa valeur est estimée à 1367 W/m^2 . [4]

Objectif :

- Dans un premier temps, on cherche à déterminer la quantité d'énergie reçue au sol chaque seconde par unité de surface de la planète Terre.
- Ensuite, on détermine la constante solaire en corrigeant la mesure précédente.
- On rappelle que la constante solaire (pour la Terre) est la puissance rayonnée reçue hors atmosphère par un disque de 1 m^2 placé perpendiculairement au rayonnement solaire à une distance de 1 u.a. du Soleil. Elle s'exprime en W.m^{-2} . [27]

Moyen :

On utilise une propriété du rayonnement solaire : son aptitude à chauffer un corps. On base donc le dispositif expérimental sur une méthode calorimétrique permettant de déterminer l'énergie reçue par un cylindre de laiton pour en déduire la puissance rayonnée reçue au sol par m^2 comme le définit la figure I.2

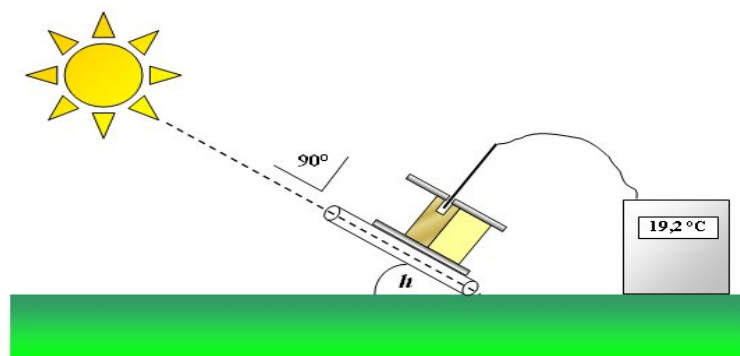


Fig I.2 : Mesure de la constante solaire [image de wikipédia]

I.2.3 Translation et Rotation de la Terre

Le nombre de **rotations de la Terre** sur elle-même est de 365,2425 par an environ, soit 366,2425 jours sidéraux (rotation par rapport au système de référence céleste). Comme la Terre n'est pas rigoureusement un solide massif indéformable, le concept de vitesse de rotation angulaire doit être soigneusement défini par des géodésiens et des astronomes, puis mesuré. Ce service est effectué par l'IERS (*International Earth Rotation Service*), qui met en ligne toutes les données connues.[6]

La vitesse de rotation oscille de manière irrégulière. Dans la période de rotation (longueur du jour), on observe principalement une variation saisonnière d'environ 1 millième de seconde (ms) et des changements décennaux (entre 10 et 70 ans) de l'ordre de 5 ms. De plus, les actions du soleil et de la Lune, sur le soulèvement de la marée produisent un couple retardateur qui induit une augmentation séculaire de la durée du jour d'environ 2 ms/siècle et un éloignement de la Lune de 3,84 cm/an.

Par rapport aux étoiles l'axe de rotation balaye en 25 800 ans un cône axé sur les pôles du plan de l'écliptique (l'axe perpendiculaire à l'orbite terrestre), dont le demi-angle au sommet - l'obliquité de l'écliptique - vaut environ $23^{\circ}26'$. À ce mouvement, la précession, se superposent de petites oscillations périodiques, les nutations, dont la principale, en 18,6 ans, a une amplitude de 20". La précession-nutation est provoquée par l'action gravitationnelle conjointe de la Lune et du Soleil sur le bourrelet équatorial de la Terre, et de ce fait l'objet de modèles relativement précis, donnant la position spatiale de l'axe de rotation à la milliseconde de degré près.

On peut dissocier les mouvements de la terre en considérant séparément le mouvement par rapport au centre de masse (rotation) et le mouvement de ce centre de masse par rapport à lui-même (déplacement).

- **Rotation de la terre**

En un jour, la terre effectue une rotation complète d'Ouest en Est autour de son axe ; c'est la base du système horaire. De cette rotation découle la succession des jours et des nuits. [6]

- **Révolution de la terre**

La terre accomplit un tour entier autour du soleil en 365,25 jours suivant une orbite elliptique, sans que la vitesse moyenne de ce mouvement est d'environ 30 km/s. La distance entre les centres de ces deux astres change d'une grandeur minimale au Périhélie (1,47.

1011m), aux environs du 2 janvier, à une grandeur maximale, à l'Aphélie (1,52 .1011m), aux environs du 3 juillet, la valeur moyenne étant appelée unité astronomique (UA). Les mouvements de la terre autour de son axe et autour du soleil son distingué dans la figure 1.3

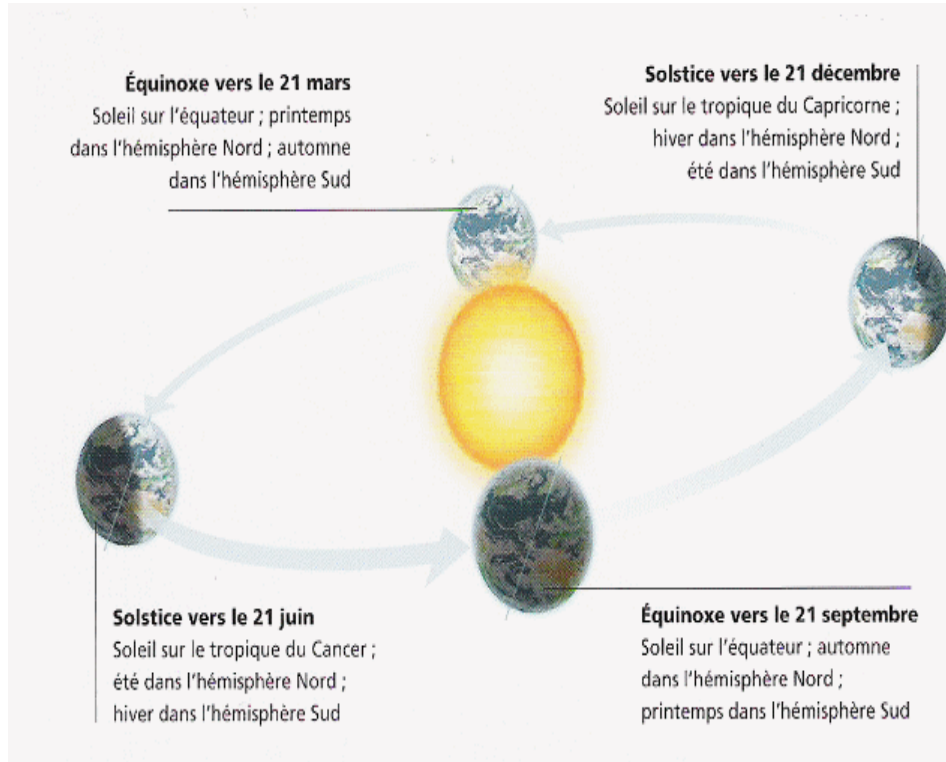


Fig. I.3 Image du mouvement de la terre autour du Soleil [image de wikipédia]

I.2.4 Le spectre solaire :

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

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (I-1)$$

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

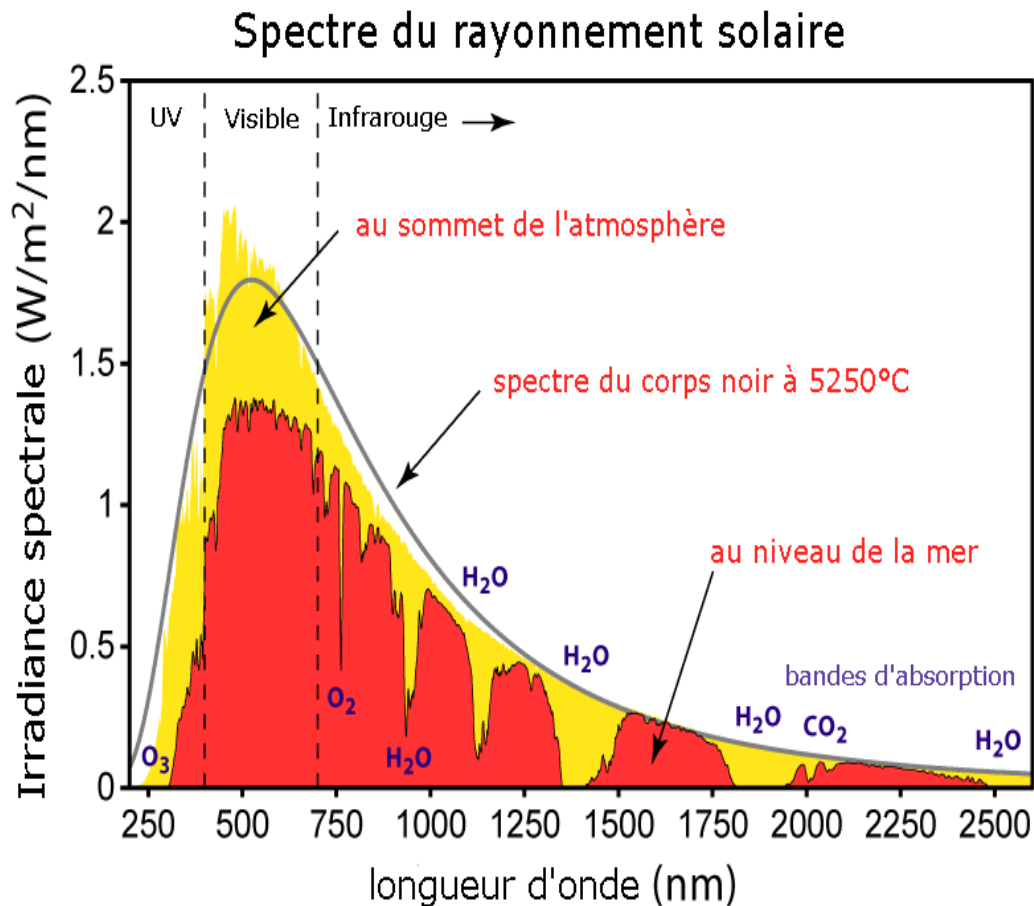


Fig. I.4 Spectre du rayonnement solaire [6]

On remarque que L'émission d'ondes électromagnétiques par le Soleil est bien modélisée par un corps noir à 5800 Kelvin, donc par la loi de Planck. Le pic d'émission est dans le jaune ($\lambda=570 \text{ nm}$), et la répartition du rayonnement est à peu près pour moitié dans la lumière visible, pour moitié dans l'infrarouge, avec 1% d'ultraviolets¹. [6]

Arrivé au niveau de la mer, c'est-à-dire ayant traversé toute l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire a subi plusieurs « filtrations ». On peut repérer notamment sur le spectre ci-contre les bandes d'absorption de l'ozone (connu pour stopper une bonne partie des ultraviolets), du dioxygène, du dioxyde de carbone et de l'eau

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

L'émission de rayonnement électromagnétique du soleil s'énonce par une puissance moyenne de 1367 W/m². Dans un plan perpendiculaire au rayonnement, qui varie de $\pm 3,4\%$ environ au cours de l'année. (365jrs), Le calcul du rayonnement extraterrestre peut être accompli par la formule approximative Suivante [5]

$$I = I_{SC} \left[1 + 0,034 \cos \left(\frac{360}{365,25} \right) n \right] \quad (I-2)$$

I.3 La position du soleil

En effet, la position du soleil varie constamment, à la fois pendant la journée, mais aussi pendant les différentes périodes de l'année.

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

I.3.1 Les coordonnées géographiques terrestres [10]

Lieu, on entend la latitude, la longitude et le niveau de la mer. Pour se repérer à la surface de la planète, on peut utiliser un autre système appelé « repères cartographiques ».

Pour se localiser sur la terre, il est nécessaire d'utiliser un système géodésique du quel découlent les coordonnées géographiques

- **Latitude Ø**

La **latitude** est une valeur angulaire, expression du positionnement nord –sud d'un point sur terre.

- La latitude est une mesure angulaire s'étendant de 0° à l'équateur à 90° aux pôles.
- Ce plan coupe la surface terrestre suivant un cercle approximatif (les irrégularités du cercle sont liées aux variations d'altitude), sauf aux pôles où ce cercle se réduit à un point.
- Plus la latitude s'écarte de 0° , plus on s'éloigne du plan de l'équateur, cependant la latitude n'est pas une mesure proportionnelle à la distance entre les deux plans, mais proportionnelle à la distance la plus courte pour rejoindre l'équateur en parcourant la surface terrestre soit vers le nord géographique soit vers le sud géographique. En effet, la distance au plan de l'équateur ne varie pratiquement pas près des pôles même si la latitude varie beaucoup, au contraire des plans de latitude près de l'équateur où la variation de la distance inter-plan est maximale.[10]

- **Longitude λ**

La longitude est une valeur angulaire, expression du positionnement est-ouest d'un point sur Terre.

- Tous les lieux situés à la même longitude forment un demi-plan limité par l'axe des pôles géographiques, coupant la surface de la terre sur un demi-cercle approximatif dont le centre est le centre de la Terre, l'arc allant d'un pôle à l'autre. Un tel demi-cercle est appelé méridien.[10]
- À la différence de la latitude (position nord-sud) qui bénéficie de l'équateur et des pôles comme références, aucune référence naturelle n'existe pour la longitude.
- La longitude est donc une mesure angulaire sur 360° par rapport à un *méridien de référence*, avec une étendue de -180° à $+180^\circ$, ou respectivement de 180° ouest à 180° est.
- Le méridien de référence est le méridien de Greenwich (qui sert aussi de référence pour les fuseaux horaires).

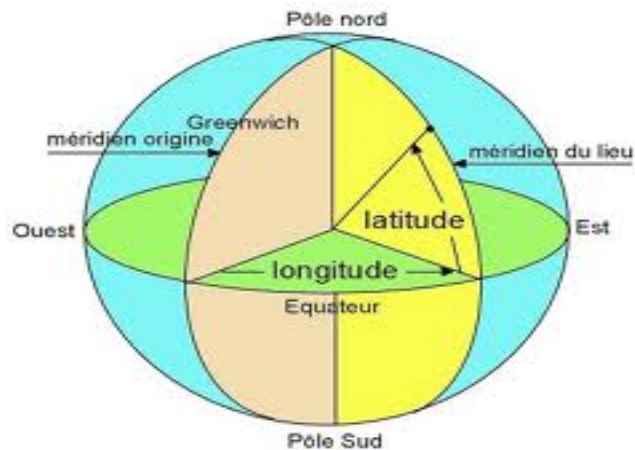


Fig. I.5 Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné

• Méridien

Est un demi grand cercle imaginaire tracé sur le globe terrestre reliant les pôles géographiques. Tous les points de la Terre situés sur un même méridien ont la même longitude. On parle également d'arc de méridien entre deux latitudes.

I.3.2 Déclinaison δ

Le plan de l'orbite terrestre autour du soleil s'appelle plan de l'écliptique. La Terre tourne elle-même autour de l'axe polaire, qui est incliné à $23,5^\circ$ par rapport à la perpendiculaire avec le plan de l'écliptique tout au long de l'année. La rotation de la Terre autour de son axe provoque les variations diurnes du rayonnement. La position de l'axe par rapport au soleil est la cause des variations saisonnières du rayonnement solaire. L'angle entre la ligne qui relie les centres du soleil et de la Terre d'une part et le plan équatorial d'autre part change constamment. Cet angle est appelé déclinaison solaire. Pour le solstice d'hiver (22 décembre), il est de $+23,5^\circ$ alors que pour le solstice d'été (22 juin) , la déclinaison est de $-23,5^\circ$. [10]

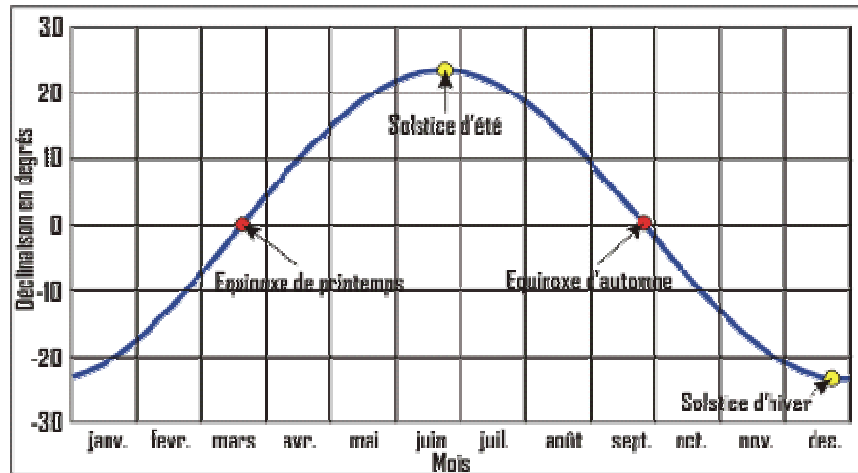


Fig.I.6 Variation annuelle de la déclinaison Solaire [10]

I.3.3 L'équation du temps ET

C'est l'écart entre le temps solaire moyen TSM et le temps solaire vrai TSV selon le jour de l'année considéré [4]

$$ET = TSV - TSM \tag{I-3}$$

La figure I.9 montre la variation de ET durant l'année donnée par la formule suivante

$$ET = 0.258\cos x - 7.416\sin x - 3.648\cos 2x - 9.228\sin 2x \tag{I-4}$$

Avec : $x = \frac{360(N-1)}{365.25}$

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

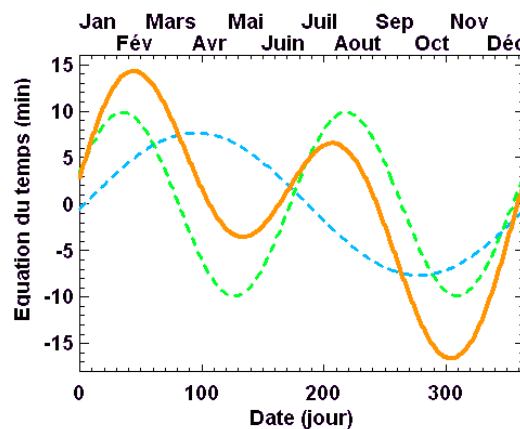


Fig.1.7 Variations annuelles de l'équation du temps

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

La notion du temps solaire vrai TSV a une liaison avec l'angle solide ω , qui représente l'arc compris entre le rayonnement solaire incident et le plan méridien du lieu. Cet angle augmente de quinze degrés (15°) par heure. La valeur zéro degré (0°) est atteinte au passage du soleil à la verticale (zénith) du plan méridien (midi solaire vrai = 12 h TSV). [4]

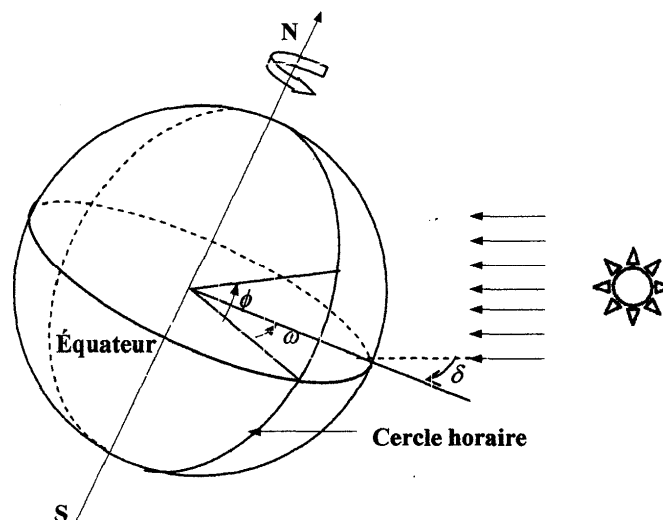


Fig. I.8 L'angle horaire et la déclinaison

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

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

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

Où ω est mesuré en degrés et TSV en heures.

- Le temps solaire moyen TSM

Le temps solaire moyen est basé sur un soleil moyen fictif qui se déplacerait à vitesse constante tout au long de l'année. Cette moyenne est de 24 heures

Il est défini par les coordonnées angulaires d'un soleil fictif qui serait animé d'une vitesse constante sur l'Ecliptique.[4]

- Le temps solaire vrai TSV

est une mesure du temps basée sur la définition de midi solaire : c'est l'instant où le Soleil atteint son point de culmination, en un endroit donné de la Terre il est défini par les différentes coordonnées angulaires du soleil. Il est lié au temps solaire moyen TSM par l'équation du temps ET avec un maximum de 16 minutes.[6]

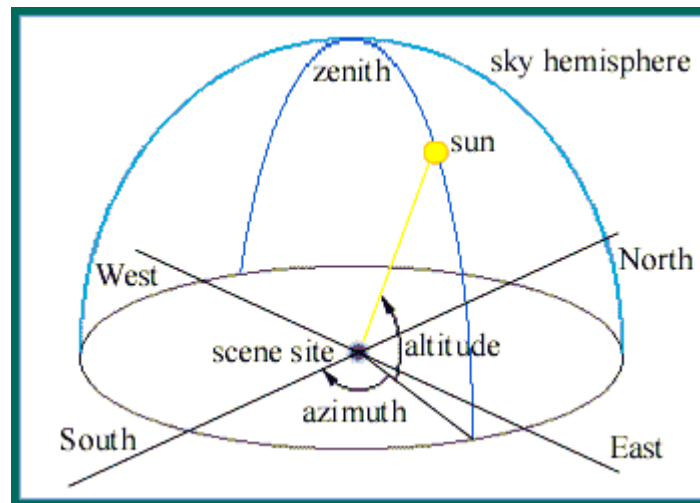


Fig. I.9 Angles solaires

I.3.5 Hauteur angulaire du soleil h

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

$$\sinh = \sin\theta\sin\delta + \cos\theta\cos\delta\cos\omega \quad (\text{I-6})$$

I.3.6 Azimut du soleil a

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut est essentielle pour déterminer l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale, l'azimut ne correspond nul à la direction sud

dans l'hémisphère nord et la direction nord dans l'hémisphère sud. L'orientation Est correspond à l'azimut $a = -90^\circ$, et l'orientation Ouest à $a = +90^\circ$. [10]

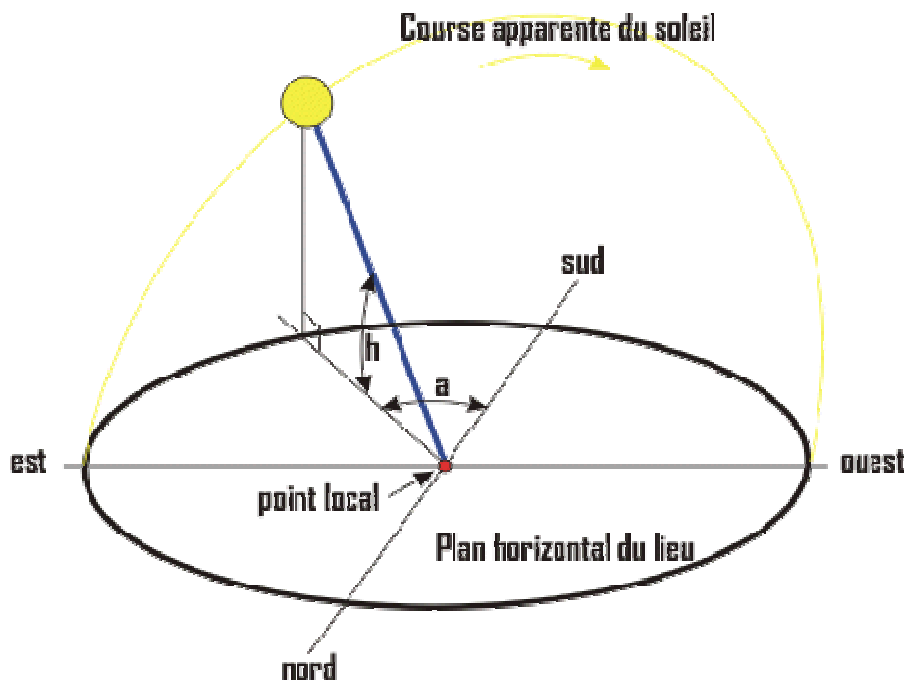


Fig. I.10 Représentation de l'azimut du soleil. .[10]

L'azimut a est défini par les relations suivantes :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cosh} \quad (\text{I-7})$$

Où

$$\cos a = \frac{\sin \phi \sinh - \sin \delta}{\cos \phi \cosh} \quad (\text{I-8})$$

Ou bien

$$\cos a = \frac{\sin \phi \cos \delta \cos \omega - \cos \phi \sin \delta}{\cosh} \quad (\text{I-9})$$

I.3.7 Durée du jour

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

$$\cos \omega_1 = - \tan \phi \tan \delta \quad (\text{I - 10})$$

Où ω_1 est l'angle horaire du soleil à son lever (et, au signe près, à son coucher).

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

$$dj = \omega_c - \omega_l \quad (\text{I-11})$$

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

$$dj = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (\text{I - 12})$$

I.3.8 Décalage horaires

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

- La différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile

TCF correspondant au fuseau horaire adopté par le pays :

$$C = TL - TCF \quad (\text{I-13})$$

L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire méridien De Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire fixé.[4]

I.3.9 Fuseau horaire

Secteur de la surface terrestre compris entre deux méridiens distants de 15° de longitude et pour lequel, par convention, l'heure indiquée par le fuseau diffère d'un nombre entier d'heures de celle indiquée par le temps universel.[1]

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

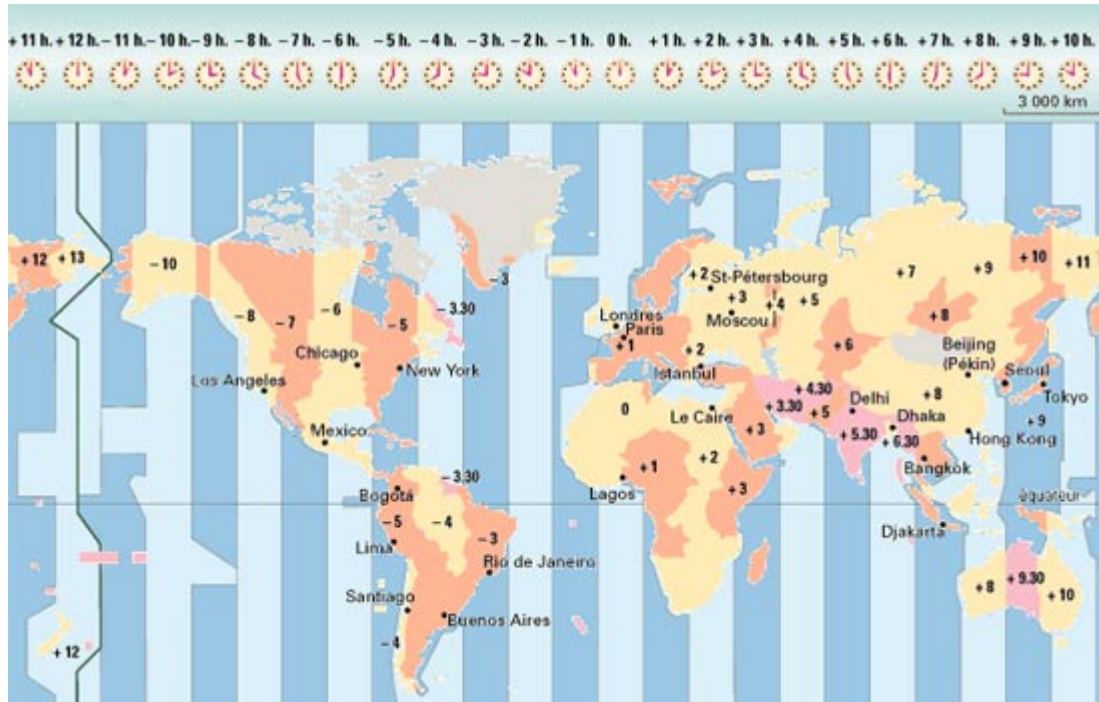


Fig.1.11 Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich

I.4 Eclairage d'un récepteur plan

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

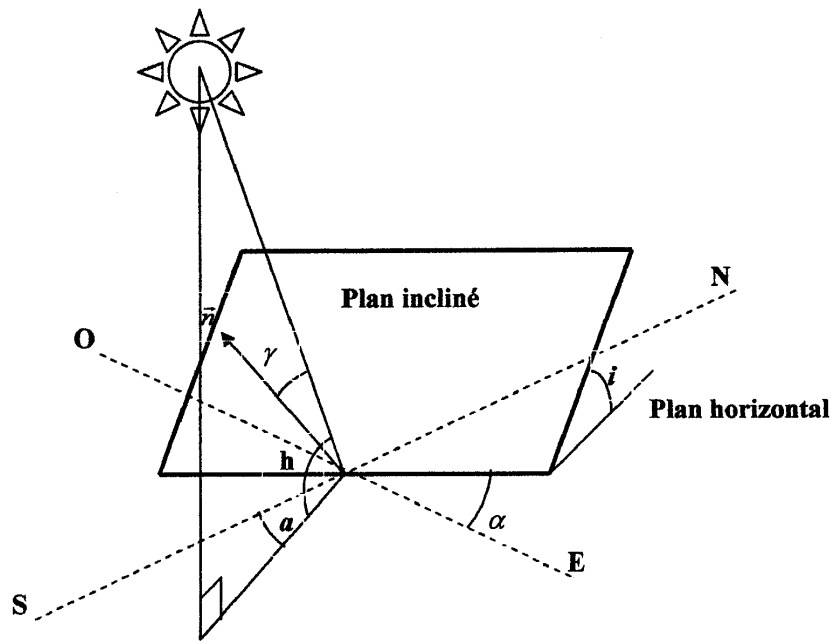


Fig. I.12 Inclinaison et orientation d'une surface réceptrice [10]

L'inclinaison sur l'horizontale est désignée par l'angle i compris entre 0° et 90° et par le plan azimutal a compris entre -180° et 0° vers l'Est et entre 0° et 180° vers l'Ouest. L'éclairement lumineux (W/m^2) est maximal lorsque le rayonnement est perpendiculaire au plan ($\gamma = 0$). L'angle d'incidence θ augmente jusqu'à être le rayonnement à incidence rasante

($\gamma = 90^\circ$).

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

$$I = I \cos \gamma \quad (I-14)$$

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

$$\cos \gamma = \cos h \sin i \cos(a - \alpha) + \sin h \cos i \quad (I-15)$$

I.4.1 Rayonnement diffus

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

I.4.2 Eclairement Global

Eclairement énergétique solaire reçu par une surface horizontale à partir d'un angle solide .[1]

$$G=I+D$$

(I-16)

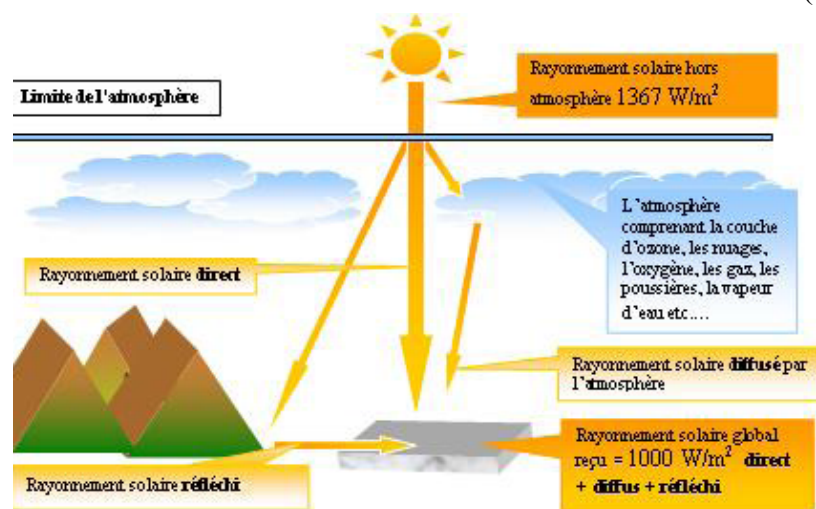


Fig I.13 – Composition du Rayonnement Solaire

$$G = I \cos \gamma + D_{\text{ciel}} + D_{\text{sol}}$$

(I-17)

I.5. L'importance du gisement solaire Algérien :

La ressource en rayonnement solaire direct est considérable à l'échelle planétaire et particulièrement à l'échelle nationale

L'Algérie possédant un gisement solaire important, de part son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ $1\text{Kw}/\text{m}^2$. L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les $6\text{Kw}/\text{m}^2$ et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de $2500\text{ Kw}/\text{m}^2$ [3]

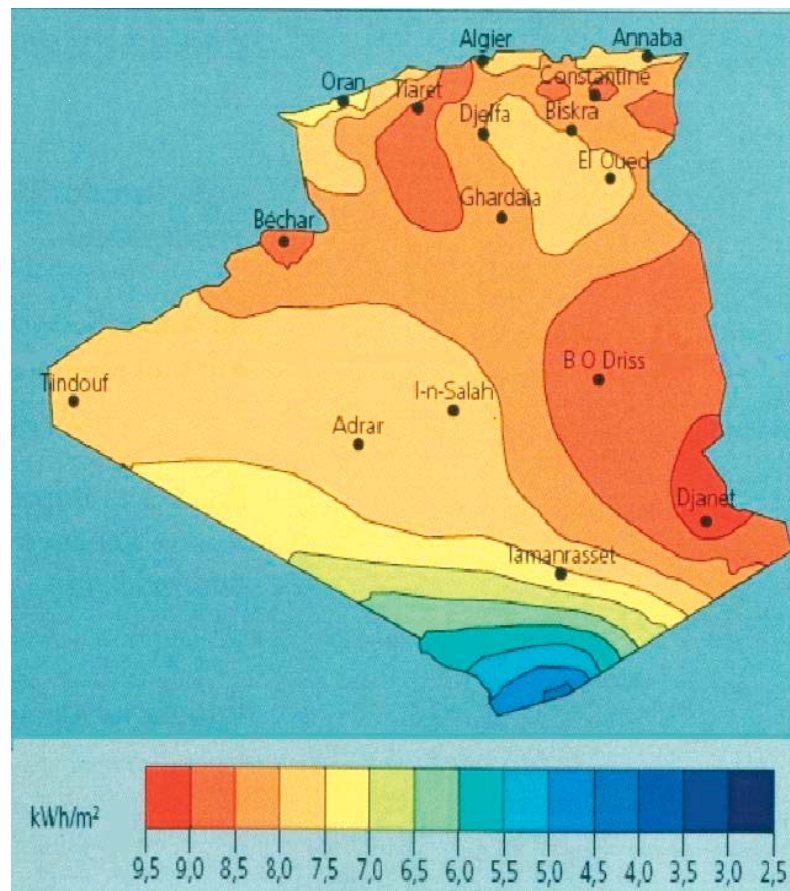


Fig. I -14 Le rayonnement solaire en Algérie

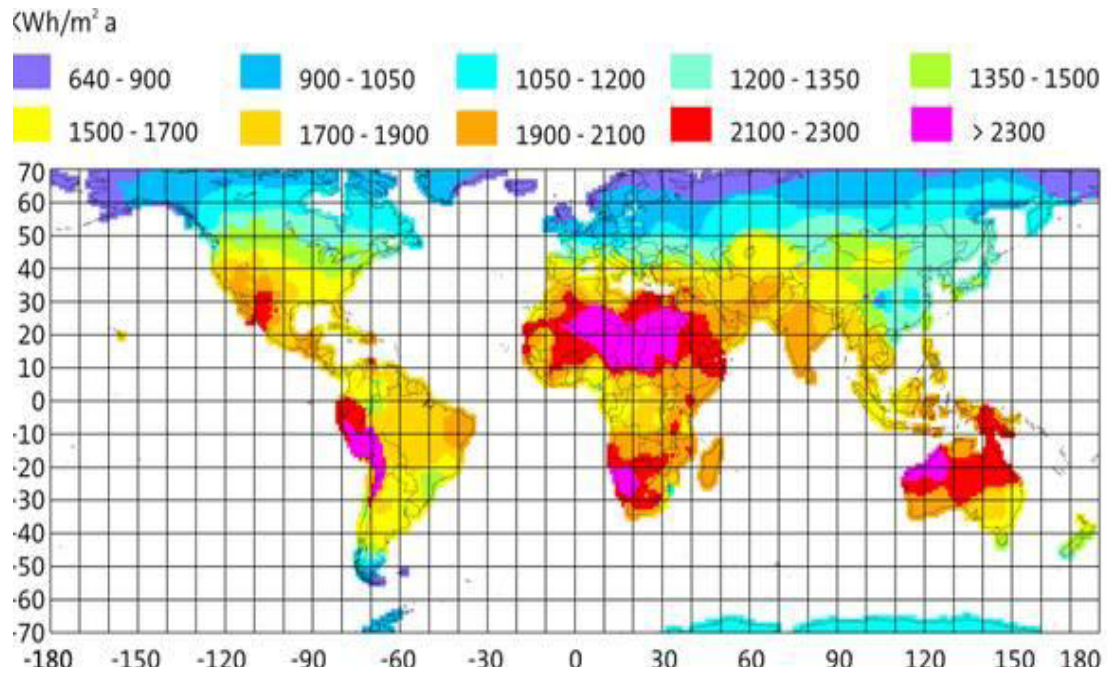


Fig I-15 La répartition rayonnement solaire à travers le monde [12]

Chapitre II

Introduction

Le principe de la concentration d'énergie est important car il rend la vie beaucoup plus facile. On dispose en effet avec le soleil d'une énorme quantité d'énergie potentiellement utilisable et, une fois concentrée, une masse d'énergie est bien plus simple à stocker, transformer et déplacer. Même s'il y a des exceptions, un accès à de très fortes concentrations d'énergie permet dans la plupart des cas de faire à peu près ce qu'on veut avec un minimum de puissance. [17]

De ce fait des capteurs solaires à concentration sont appliqués, l'énergie solaire arrive sur une grande surface réfléchissante et réfléchi sur une plus petite surface avant qu'elle ne soit transformée en chaleur ce qui inciterait des températures plus augmentée. La majorité des collecteurs à concentration peuvent concentrer que le rayonnement solaire parallèle venant directement à partir du disque du soleil (Rayonnement direct)

II.1. Description de la concentration :

II.1.1. Concentrateur solaire :

On détermine les différentes dimensions géométriques que l'on peut trouver dans la représentation des capteurs à concentration. [1]

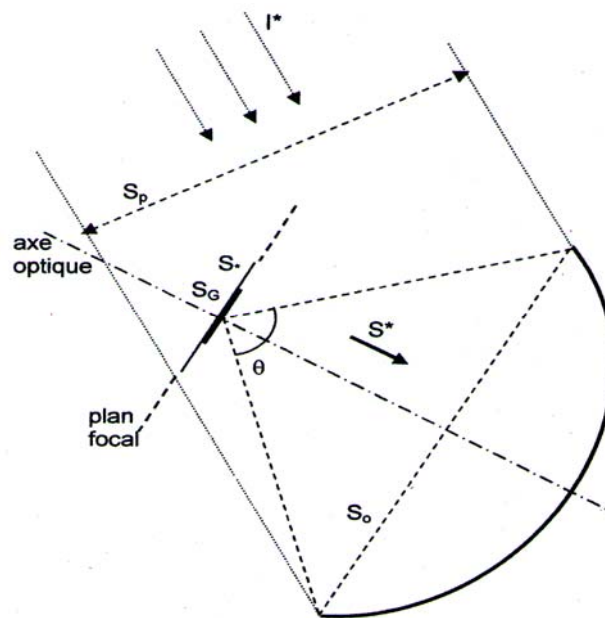


Figure II.1 – Schéma d'un concentrateur solaire

- θ angle d'ouverture du concentrateur
- I^* éclairement solaire,

- S^* éclaircissement direct dans la section d'ouverture du concentrateur,
- S_0 section d'ouverture du concentrateur caractérisée par l'angle θ , S_p section de passage du rayonnement solaire entrant dans le concentrateur. S_p se confond avec S_0 quand l'axe optique du concentrateur est dirigé vers le soleil, S_G surface de l'image de Gauss du soleil; c'est l'image nette du soleil dans le plan focal donnée par des rayons paraxiaux, c'est-à-dire des rayons proches de l'axe optique.
- S_* surface de l'image réelle du soleil dans le plan focal.

II.1.2. le plan focal :

On détermine un réflecteur à 2 dimensions c'est un cylindre, de longueur infinie.

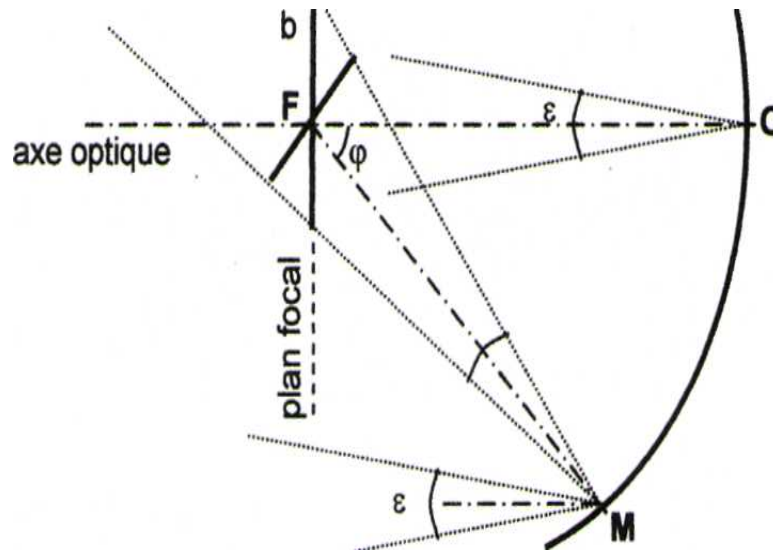


Figure II.2 – schéma d'un plan focal dans un concentrateur cylindrique.

La largeur b de l'image dans le plan focal est présentée par :

$$b = \frac{2r \tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}{\cos \varphi}$$

II.2 Détermination de la Concentration Géométrique. [11]

II.2.1. concentrateur a trois dimension :

On démontre un concentrateur à trois dimensions, avec un angle d'ouverture θ , et un axe optique positionné vers le Soleil [1]

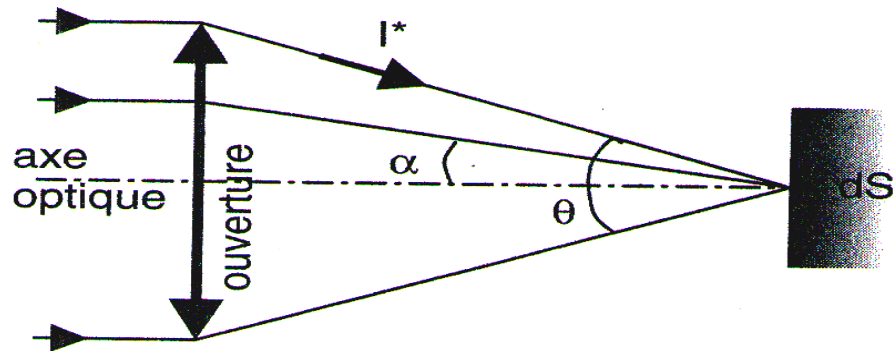


Figure II.3 – Schéma d'un concentrateur a trois dimensions [1]

dS , est la place du flux q^* qui est interpréter par :

$$q_* = \rho_0^{0/2} I^* \cos \alpha d\Omega$$

où I^* représente l'intensité du rayonnement par unité de surface et par unité d'angle solide ($W/m^2 \cdot sr$).

II.2.2. la concentration sur une surface réceptrice :

On présente la Concentration, sur une surface réceptrice du rayonnement direct. [1]

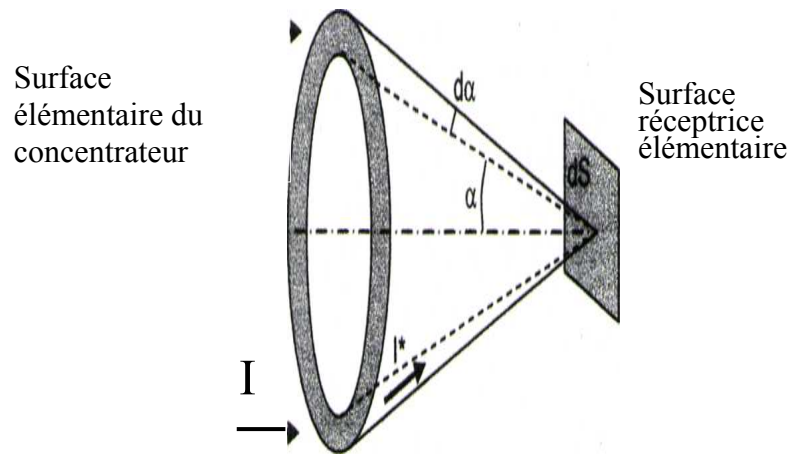


Figure II.4 – Concentration, sur une surface réceptrice du rayonnement direct. [1]

L'angle solide s'écrit :

$$d\Omega = 2 \pi \sin \alpha \, d\alpha.$$

II.2.3. L'angle solide :

On détermine de l'angle solide $d\Omega$ dans le cas d'un concentrateur à deux dimensions. [1]

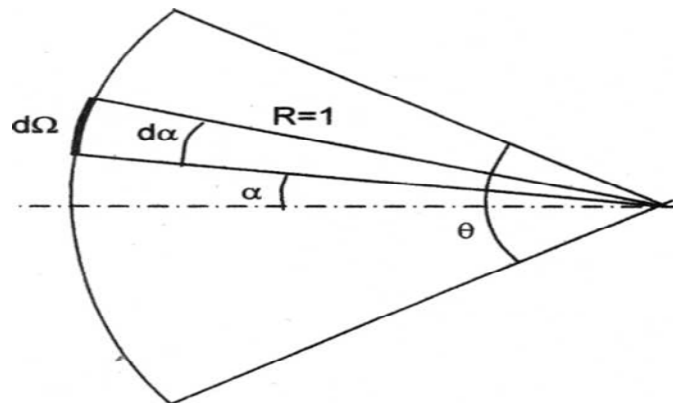


Figure II.5 – Schéma d'un concentrateur à deux dimensions.[1]

II.3. Concentration Géométrique Maximale C_{max} . [11]

Soit une source de rayonnement de surface diffuse S_s , un système optique d'ouverture S_o concentre le rayonnement sur un récepteur S_r (cf. figure II.7).

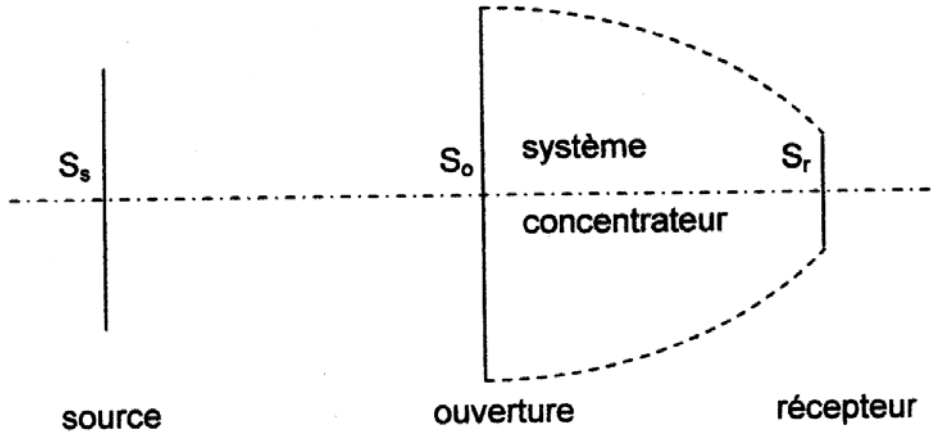


Figure II.6 –système d'un concentrateur

$$S_s F_{s_o} = S_o F_{o_s}$$

En considérant la surface S_r diffuse, on peut écrire :

$$S_s F_{s_r} = S_r F_{r_s}$$

La définition de la concentration géométrique C donne, dans le cas optimum pour lequel la surface réceptrice est réduite à l'image du Soleil ($S_r = S_*$) :

$$C = \frac{S_0}{S_*} = \frac{S_0}{S_r} = \frac{F_{so}}{F_{sr}} \frac{F_{rs}}{F_{os}}$$

Dans le cas idéal, tout rayonnement entrant dans le système atteint le récepteur. On a donc

$$F_{so} = F_{sr}$$

Et comme on a toujours $F_{rs} < 1$, on peut écrire l'inégalité suivante :

$$C < \frac{1}{F_{os}}$$

Qui permet de définir la concentration maximale C_{\max} par l'égalité :

$$C_{\max} = \frac{1}{F_{os}}$$

II.4. CONCENTRATEUR SPHERIQUE

II.4.1. Concentration Idéale

Par définition $G_G = S_0/S_G$

avec ici $S_0 = \pi R^2 \sin^2 \alpha$ et

$$S_G = \pi f^2 \left(\frac{\varepsilon}{2} \right)^2$$

D'où :

$$C_G = \left(\frac{4}{\varepsilon} \sin \alpha \right)^2$$

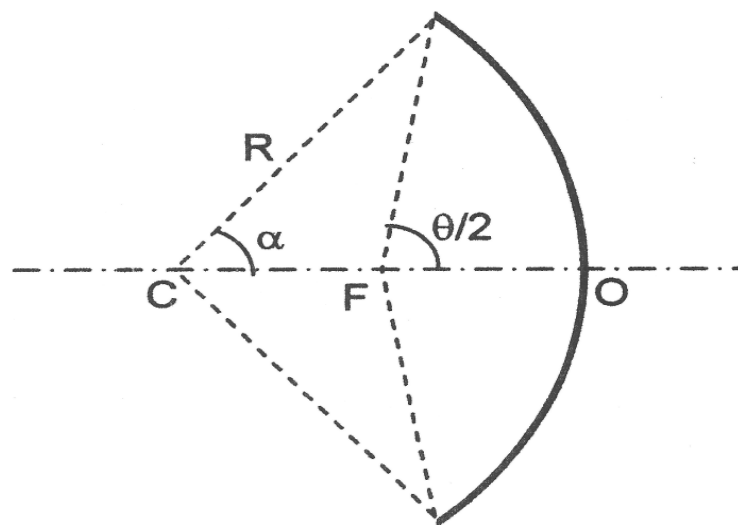


Figure II.7 – Schéma en coupe d'un capteur sphérique [1]

Cette surface représente les rayons incidents, parallèles à l'axe optique appelée

II.4.2. Concentration Géométrique

Le plan (P) correspond au cercle de petite diffusion. C'est dans ce plan, et pas dans le plan focal, que l'on aura intérêt à placer le récepteur si on désire une température élevée. En prenant pour S^* la surface de ce cercle de moindre diffusion, la concentration géométrique est donnée par :

$$C = \left(\frac{\sin \theta}{\sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin^2 \frac{\theta}{8} + \varepsilon} \right)^2$$

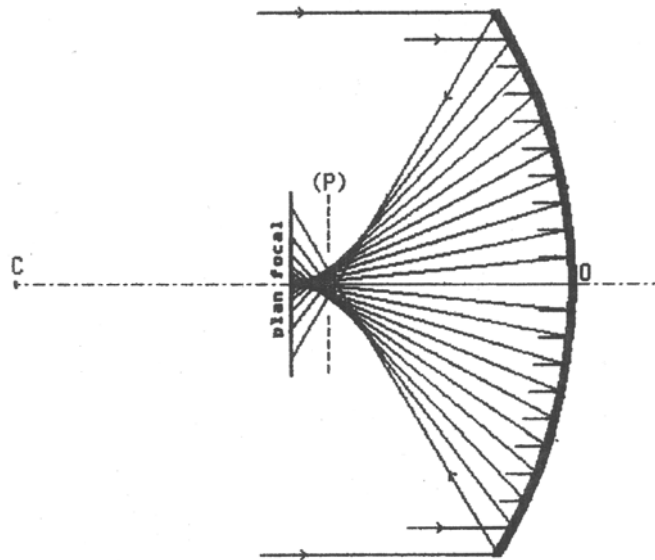


Figure II.8 – Schéma caractérisant le plan (P) de moindre diffusion d'un capteur sphérique [1]

II.4.3. Concentration Énergétique

La distribution de l'éclairement dépend du plan dans lequel on se place. Il en est donc de même de la concentration énergétique qui, de plus, n'est pas uniforme dans un plan donné comme le montrent les figures ci-dessous pour le plan focal et le plan (P) de moindre diffusion.

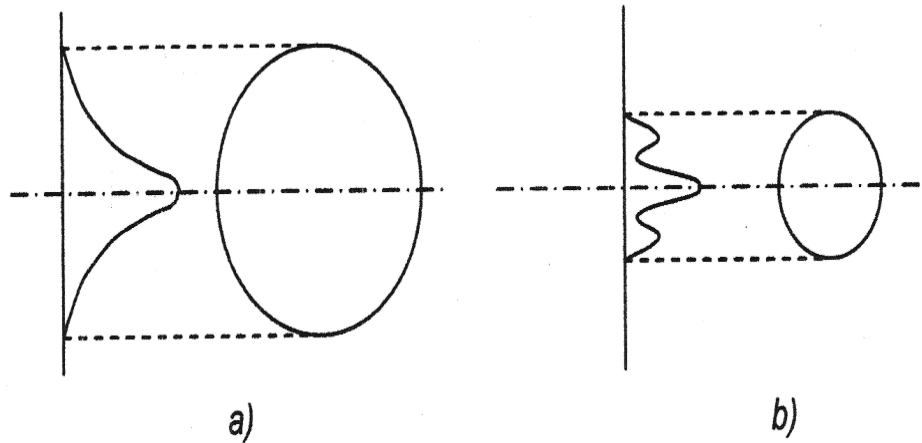


Figure II.9 – Distribution relative de l'éclairement solaire :

a)- dans le plan focal

b)- dans le plan de moindre diffusion (P)[1]

II.5. concentrateur parabololoïde :

Considérons un concentrateur qui utilise des surfaces parabololoïde pour concentrer le rayonnement global au niveau de l'absorbeur sa capacité de concentration est assez importante mais un système de poursuite est nécessaire, l'image suivante représente les différents composants de ce concentrateur.

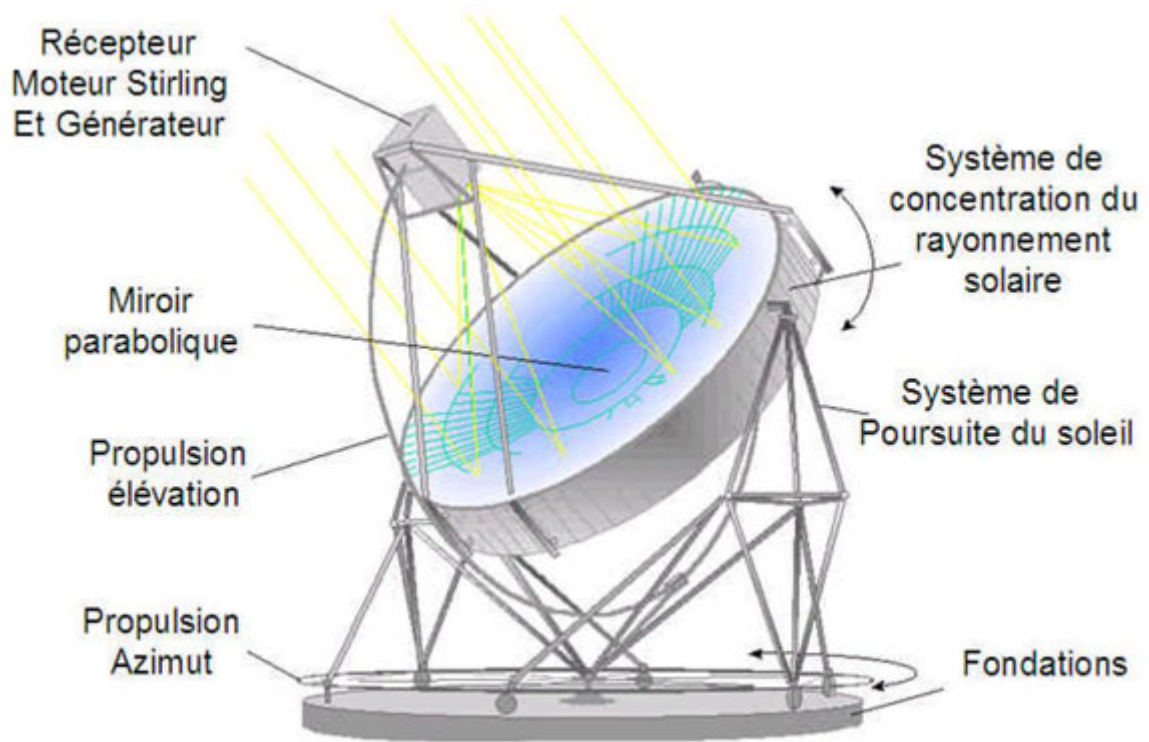


Figure II.10 –Image du concentrateur parabololoïde [28]

II.5.1. Concentration Idéale [19]

Considérons un parabololoïde de révolution. Cette surface est dite *stigmatique* : tout rayon parallèle à l'axe optique converge, après réflexion, en un point F appelé *foyer*.

Par définition, la distance focale vaut : $f = CF = FO = OF'$.

Une des propriétés de la parabole est l'égalité suivante, vraie pour tout point M situé sur la parabole : $FM = MM'$.

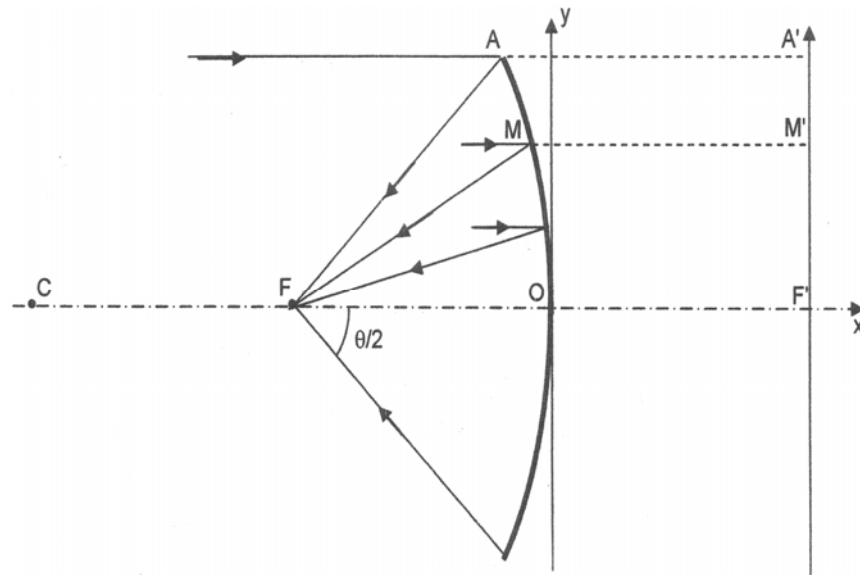


Figure II.11 – Coupe méridienne d'un paraboloïde de révolution caractérisant la distance focale $f=CF=FO=OF'$. [1]

La concentration idéale peut être calculée en remarquant que :

$$S_o = \pi Y_A^2 \text{ et que } S_G = \frac{\pi}{4} f^2 \varepsilon^2$$

De plus $\tan \frac{\theta}{4} = \frac{Y_A}{2f}$, d'où finalement :

$$C_G = \left(\frac{4}{\varepsilon} \tan \frac{\theta}{4} \right)^2$$

II.5.2. Concentration Géométrique :

Par définition : $C = \frac{S_o}{S_*}$

En se référant à la figure ci-dessous, on pose :

$$FJ = Y \text{ et } FA = \rho_0.$$

L'image du soleil dans le plan focal a pour surface : $S_* = \pi Y^2$

La section d'ouverture, quant à elle, s'écrit : $S_o = \pi \rho_o^2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$

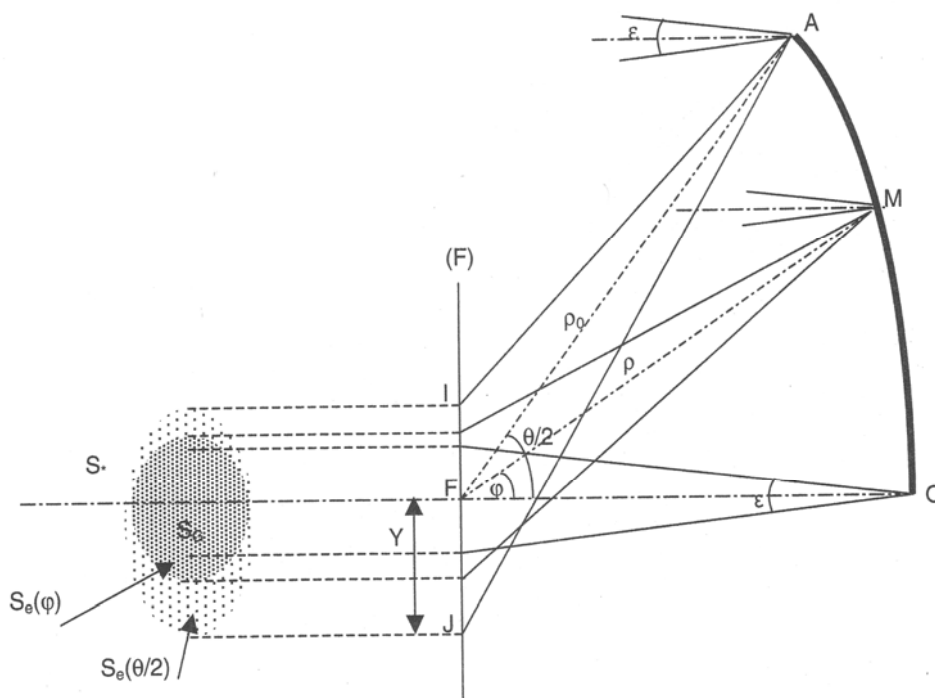


Figure II.12 – Coupe méridienne d'un demi parabolôide de révolution montrant les Projections dans le plan focal de l'image du soleil [1]

L'angle ε étant petit, on peut écrire : $Y \approx \rho_o \frac{\varepsilon}{2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}$

Finalement, il vient :

$$C = \left(\frac{\sin \theta}{\varepsilon}\right)^2$$

II.5.3. Concentration Energétique

Par définition : $C^* = \frac{Q_G^*}{S^*}$

En se référant toujours à la figure précédente mais en considérant le point M, point courant de la trace du paraboloïde, l'angle que fait le rayon FM = ρ avec l'axe optique étant noté φ , la puissance reçue par une couronne élémentaire du paraboloïde s'écrit :

$$dQ^* = S^* 2 \pi \rho \sin \varphi \rho d\varphi.$$

En supposant que cette puissance dQ^* est entièrement réfléchiée et répartie uniformément dans le plan focal (F), la fraction de cette puissance reçue dans l'image de Gausse s'écrit :

$$dQ_G^* = dQ^* \frac{S_G}{S_e(\varphi)} = S^* 2 \pi f^2 \sin \varphi \cos \varphi d\varphi$$

La puissance totale reçue dans l'image de Gauss s'écrit :

$$Q_G^* = Q_G^* S_G = \rho_o^{\theta/2} dQ_G^* = S^* \pi f^2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Et finalement :

$$C^* = \left(\frac{2 \sin \frac{\theta}{2}}{\varepsilon}\right)^2$$

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

$$\eta = \frac{C^*}{C_G} = \cos^4\left(\frac{\theta}{4}\right)$$

Pour $\theta=\pi$, on retrouve la concentration énergétique maximale

II.6. Les Centrales Solaires (L'état de l'Art) :

Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques [21].



Fig. II.13 - Capteurs cylindro-paraboliques de la centrale Nevada Solar One

Construites dans les déserts et autres zones arides du globe, les centrales solaires à capteurs cylindro-paraboliques sont une filière du Solaire thermodynamique.

La technologie de réflecteurs cylindro-paraboliques est la plus fréquente et est actuellement utilisée par les plus puissantes centrales solaires au monde dans le Sud-ouest des Etats-Unis et dans le Sud de l'Espagne.

Principe de fonctionnement d'une centrale à capteurs cylindro-paraboliques

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal 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 la centrale elle-même. La température du fluide peut monter jusqu'à 500° C. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité.

Certaines centrales sont désormais capables de produire de l'électricité en continu, nuit et jour, grâce à un système de stockage de la chaleur.

Avantages :

- Source d'énergie inépuisable et gratuite
- Pas d'émission polluante
- Peu fonctionner sans intermittence

Inconvénients :

Nécessite une poursuite sensible et couteuse pour une zone climatique peut ensoleiller
Surface au sol importante

Centrale Hybride de Hassi R'mel : [15]

Cette centrale électrique hybride solaire (gaz) de 150 Mw, sa superficie est de 130Ha et d'une source d'eau d'environ 3000m³/j avec un terrain plat.

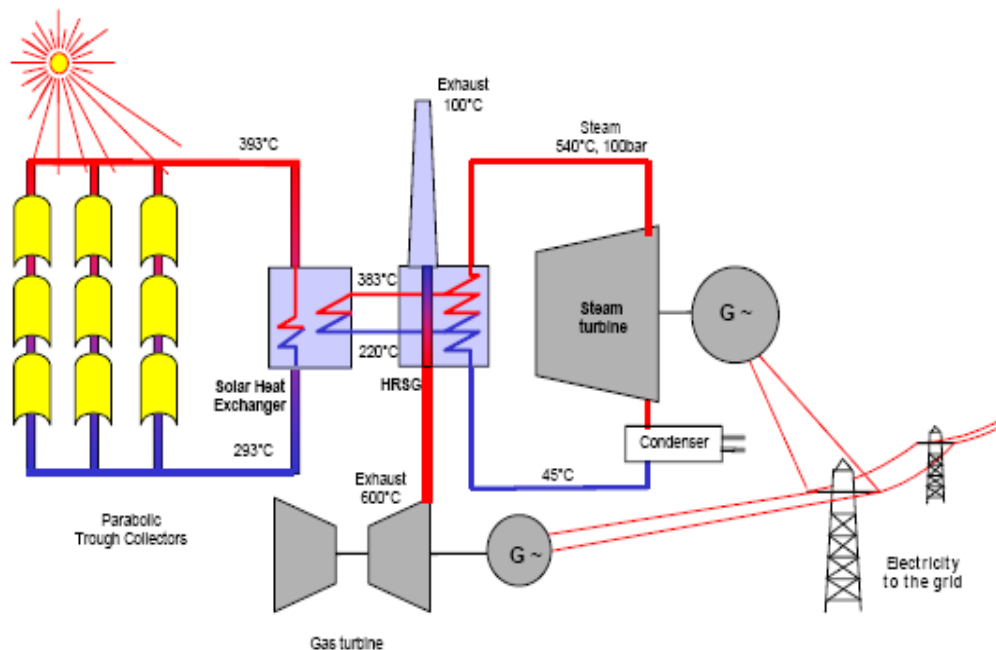


Fig. II.14 – Schéma simplifié de la Centrale de Hassi R'mel

Technologie Appliquée :

- Concentrateur cylindro parabolique.
- Capacité installée est de 34,3 Mw.
- Surface du champ solaire est 183,120m².
- Nombre de collecteur 224m.
- Prise au sol (surface) 90ha.

II.7. La Poursuite Solaire :

Dans le cas idéal où les rayons solaires sont perpendiculaires à la surface d'ouverture du concentrateur au cours de la journée [24], notre prototype doit être positionné d'un système de poursuite bi-axiale qui tourne au tour de deux axes en suivant la course du soleil. Sous des angles multiples et de façon à ce qu'il irradie entièrement le concentrateur.

Ce système est appelé Tracker et réalisé par « Salarbeam » considéré comme un système révolutionnaire de traque solaire bi-axial qui permet de suivre avec précision la trajectoire du soleil et qui fait appel à une technologie CPS de pointe, de ce fait la variation de l'angle d'incidence selon Kalogéro : [8]

Poursuite N-S à traction EW :

$$\cos \theta = \sqrt{\sin^2(\alpha) + \cos^2(\delta) \sin^2(h)}$$

$$\cos \theta = \cos(\Phi) \times \cos(h) + \cos(\delta) \times \sin^2(h)$$

Poursuite EW à traction NS

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \cos^2(\delta) \sin^2(h)}$$

Dans notre cas et pour une poursuite totale :

$$\cos \theta = 1$$

L'angle d'incidence est présenté dans la figure suivante [22], c'est l'angle entre le rayon lumineux incident et la perpendiculaire à la surface du récepteur.

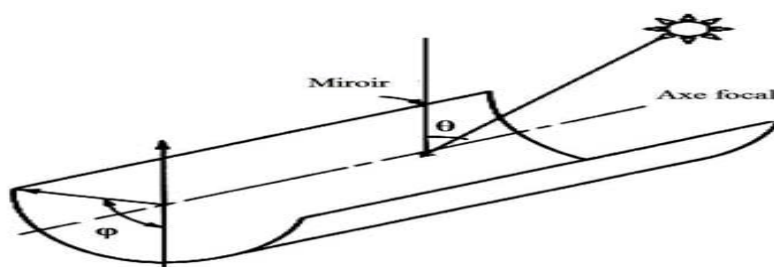


Fig. II.15 - Image qui montre l'angle θ et ϕ due au rayonnement solaire incident et la surface réceptrice

Chapitre III

Introduction

Puisque le rendement des systèmes de génération d'électricité et des systèmes de réfrigération augmentent avec la température le capteur cylindro-parabolique est souhaitable pour obtenir des températures plus de 100°C. Il se représente comme un module ayant un réflecteur de forme parabolique disposée cylindriquement.

Cette géométrie lui permet de focaliser l'énergie solaire incidente selon une génératrice linéaire ou est placé un tube absorbeur dans lequel circule un fluide caloporteur, cette étude a comme objectif de modéliser le phénomène de transfert de chaleur dans le concentrateur cylindro-parabolique et surtout absorbeur ou on détermine l'évolution de la température en fonction du temps de ce système ce qui fait qu'on a établi un bilan thermique global qui tient compte des différentes échanges thermique, et un modèle numérique basé sur les étapes suivantes : [2]

- L'énergie solaire reflétée par le concentrateur est tombée sur l'absorbeur. La chaleur est récupérée grâce au fluide caloporteur, celui la s'échauffe en circulant dans un absorbeur placé sous un vitrage qui laisse le rayonnement pénétrer et minimise les pertes par le rayonnement infrarouge en utilisant l'effet de serre. Ce vitrage permet aussi de limiter les échanges de chaleur avec l'environnement.

III.1. Etude Théorique et Optique du Concentrateur Cylindro-parabolique

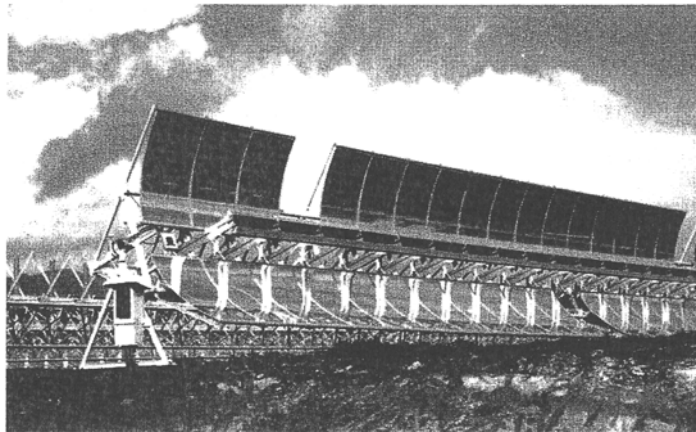


Figure III.1 – Capteur Cylindro-parabolique de l'instituto Tecnológico y de Energias Renovables aux Canaries (Tenerife). La surface réfléchissante est formée d'éléments cintrés en métal poli. Au foyer se trouve un tube dans lequel circule un fluide caloporteur.

III.1.1 Concentration Idéale

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

$$S_o = 4fL \tan \frac{\theta}{4}$$

L'image de Gauss a pour surface : $S_G = F_\varepsilon$

D'où la concentration idéale $C_G = S_o/S_G$:

$$C_G = \frac{4}{\varepsilon} \tan \frac{\theta}{4}$$

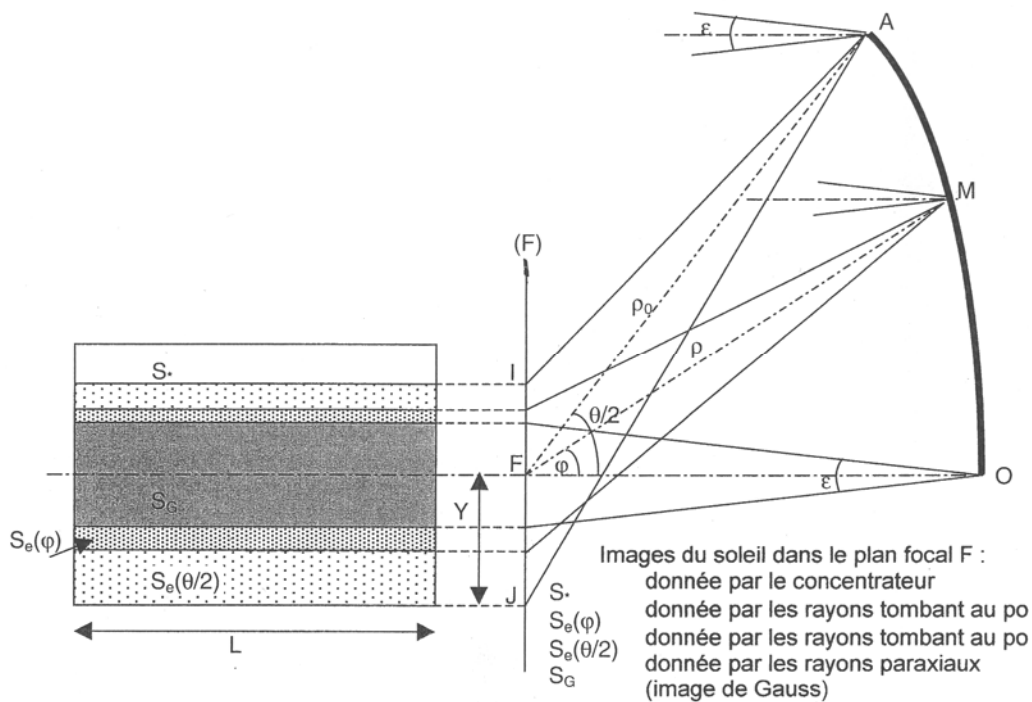


Figure III.2 – Coupe méridienne d'un demi capteur cylindro-parabolique montrant les projections dans le plan focal de l'image du soleil. [1]

III.1.2. Concentration Géométrique

En posant $FJ = Y$ et $AF = \rho_o$, on a : $Y \approx \frac{\rho_o \varepsilon}{2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}$, $S_* = 2YL$, $S_o = 2L\rho_o \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$

Et comme $C = S_o/S_*$, on trouve :

$$C = \frac{\sin \theta}{\varepsilon}$$

III.3. Etude Théorique du Concentrateur Cylindroparabolique

III.3.1. Performances Optiques d'un Concentrateur Cylindroparabolique

III.3.1.1. Taux de Concentration

La définition la plus commune du taux de concentration est basée sur la notion surface. Elle est donnée comme étant le rapport de la surface de l'ouverture à la surface du récepteur :

$$C = A_o/A_r$$

A_o est la surface d'ouverture, A_r la surface de l'absorbance

III.3.1.2. Facteurs Optiques [25]

Facteur d'interception σ est le facteur optique le plus compliqué dans le calcul de la performance optique d'un concentrateur CCP. Il représente le rapport entre l'énergie interceptée par l'absorbeur et celle réfléchiée par les surfaces réfléchissantes.

Il traduit le fait que certains rayons solaire peuvent être renvoyés vers l'extérieur du concentrateur ou bien passer à côté de l'absorbeur lorsque les surfaces optiques présentent des défauts ou des irrégularités et lorsque l'absorbeur est mal positionné dans le plan focal.

Donc il dépend des propriétés optiques des matériaux utilisés. Il existe aussi que certains erreurs peuvent apparaître dans la construction du concentrateur ou le système de poursuite.

Si on utilise les paramètres d'erreurs universelles appliquées pour toutes les géométries du collecteur, le collecteur d'interception σ est donné par l'équation générale suivante :

$$\gamma = \frac{1 + \cos \varphi}{2 \cos \varphi} \int_0^\varphi \text{Erf} \left[\frac{\sin \varphi (1 + \cos \varphi_1) (1 - 2d'x \sin \varphi_1) - \pi \beta' (1 + \cos \varphi_1)}{\sqrt{2\pi\sigma'(1 + \cos \varphi)}} \right] - \text{Erf} \left(- \frac{\sin \varphi (1 + \cos \varphi_i) (1 + 2d' \sin \varphi_i) + \pi \beta' (1 + \cos \varphi_i)}{\sqrt{2\pi\sigma'(1 + \cos \varphi)}} \right) \frac{d\varphi_1}{(1 + \cos \varphi_i)} \quad (2)$$

La fonction d'erreur Erf est définie comme suit :

$$\text{Erf}(y) = \frac{2}{\pi} \int_0^y e^{-z^2} x dz \quad (3)$$

φ angle d'ouverture.

III.3.1.3. Puissance Absorbée [18]

La puissance absorbée par unité de surface d'ouverture peut être écrit comme suit :

$$q_{\text{absorbé}} = I \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot C$$

III.3.1.4. Température de Sortie du Fluide Caloporteur T_s

$$T_s = T_e + \frac{q_4}{mcp}$$

Débit massique

III.3.1.5. Rendement d'un Concentrateur Solaire n

$$n = \frac{Q_{\text{gagnée}}}{A_0 I \gamma}$$

III.4. Montage

Il existe deux types de montage d'un capteur cylindro-parabolique : [16]

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

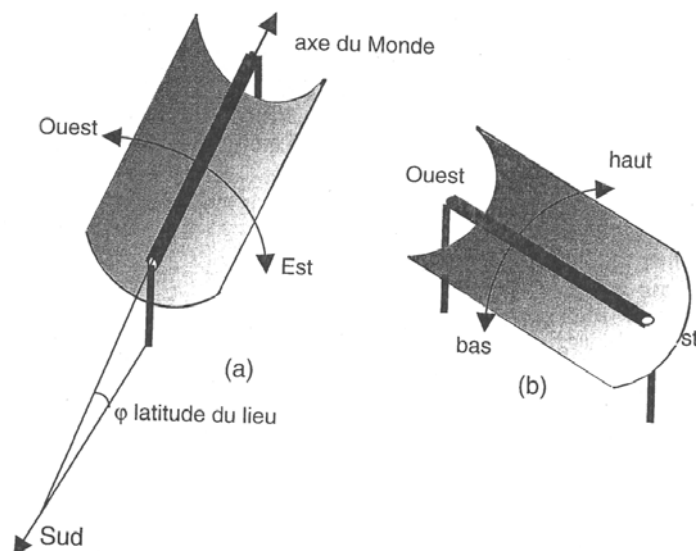


Figure III.3 – Montage d'un capteur cylindro-parabolique
 (a) Suivant l'axe du Monde.
 (b) Suivant la direction Est-Ouest [1]

III.5. Bilan Thermique

III.5.1. Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur :

Schéma qui présente les différents transferts de chaleur dans notre prototype

D'après le bilan utilisé on a :

$q_{\text{gagnée}}$: Est la quantité d'énergie gagnée par le fluide caloporteur et qui indique le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le tube absorbeur.[14]

$$\Delta Q_F(x,t) = \rho_F C_F A_{\text{abs}} \Delta x T_F(x,t)$$

Et ρ_F et C_F , T_F sont respectivement la densité, la chaleur spécifique et la température du fluide caloporteur.

$A_{\text{abs}} = \pi D_{\text{abs}}$, D_{abs} = diamètre intérieur du tube absorbeur

$$Q_F(x,t) = \rho_F C_F V T(x,t) [9]$$

V : débit volumique du fluide caloporteur.

$$\rho_F C_F A_{\text{abs}} \Delta x \frac{\partial T_F(x,t)}{\partial t} = \rho_F C_F V T_F(x,t) - \rho_F C_F V T_F(x+\Delta x,t) + q_{\text{gagnée}}^{(z,t)} \Delta x$$

La simplification de l'équation donne :

$$\rho_F C_F A_{\text{abs}} \frac{\partial T_F(x,t)}{\partial t} = \rho_F C_F V \frac{\partial T_F(x,t)}{\partial x} + q_{\text{gagnée}}^{(x,t)} \quad (I)$$

III.5.2. Entre l'Absorbeur et l'Enveloppe en Verre

Par analogie avec l'équation (1) la température du tube absorbeur T_2 est donnée par :

$$\frac{\partial (\Delta Q_{\text{abs}}(x,t))}{\partial t} = (q_{\text{absorbée}}(t) - q_{\text{intérieur}}(x,t) - q_{\text{gagnée}}(x,t)) \Delta x$$

Avec $q_{\text{intérieur}}$, la quantité d'énergie qui indique le transfert thermique entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre. [14]

$Q_{\text{absorbée}}$ = est la quantité d'énergie solaire absorbée de la thermodynamique on a :

$$\Delta Q_{\text{abs}}(x,t) = \rho_{\text{abs}} C_{\text{abs}} A_{\text{abs}} \Delta x T_{\text{abs}}(x,t) [9]$$

ρ_{abs} , C_{abs} et T_{abs} sont respectivement la densité, la chaleur spécifique et la température du tube absorbeur.

Puis on trouve :

$$\rho_{\text{abs}} C_{\text{abs}} A_{\text{abs}} \frac{\partial T_{\text{abs}}}{\partial t} (x, t) = q_{\text{absorbée}} (t) - q_{\text{intérieur}} (x, t) - q_{\text{gagnée}} (x, t) \quad \text{(II)}$$

Ou $A_{\text{abs}} = \pi D_{\text{abs}}$, D_{abs} = le diamètre extérieur du tube absorbeur.

III.5.3. Bilan Thermique entre l'Enveloppe du Verre et l'Environnement

De la même façon pour la température du tube en verre T_v , on obtient :

$$\rho_v C_v A_v \frac{\partial T_v(x, t)}{\partial t} = q_{\text{intérieur}} (x, t) - q_{\text{extérieur}} \quad \text{(III)}$$

ρ_v , C_v et T_v sont respectivement la densité de la chaleur spécifique et la température de l'enveloppe du verre.

$A_v = \pi D_v$, D_v = le diamètre extérieur de l'enveloppe du verre.

Avec $q_{\text{extérieur}}$ = la quantité d'énergie qui indique le transfert thermique entre l'enveloppe du verre et l'environnement.

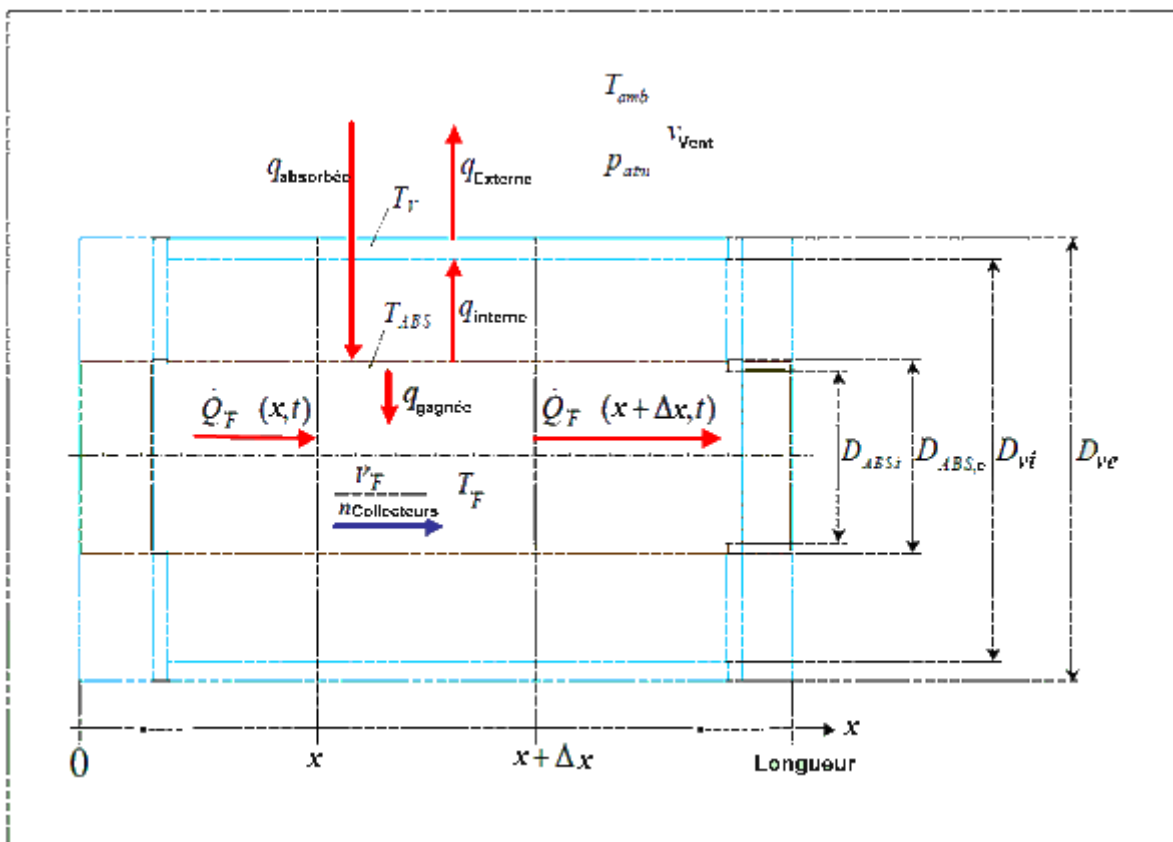
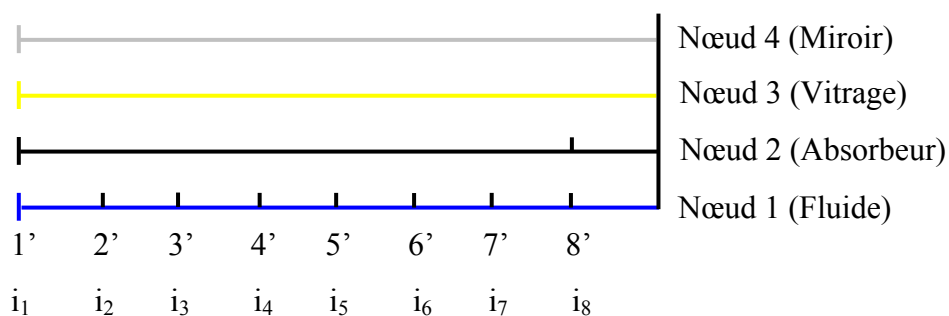


Schéma qui présente les différents transferts de chaleur dans notre prototype

* Présentation des Nœuds de notre système



Pour simplifier notre étude en transfert de chaleur dans notre système on représente chaque élément qui compose notre prototype comme un nœud chaque nœud est caractérisé par un mode de transfert de chaleur, la température du nœud i_1 varie en fonction du temps et l'espace.

*** Hypothèses utilisées dans le model de calcul :**

- On néglige le transfert de chaleur par conduction dans tous les éléments du concentrateur.
- La géométrie est traitée comme un problème uni-dimensionnel dans la direction radiale.
- Les propriétés radiatives de l'absorbeur et de l'enveloppe en verre obéissent à la loi de Kirchoff (sur face grise : émettrice, diffuse et absorbante).
- Les propriétés de l'eau dans le tube absorbeur sont en fonction de la température.
- Les propriétés de l'air dans l'espace annulaire sont en fonction de la température.
- Considérons que la convection est forcée entre le tube absorbeur et le fluide caloporteur.
- Les effets de l'extrémité sont négligés.
- Le changement de phase n'est pas pris en considération donc les nombres adimensionnelles ne change pas.
- La température de l'absorbeur varie en fonction du temps.
- La température du vitrage varie en fonction du temps.
- Le régime est transitoire.

III.5.4. Différents Mode de Transfert de Chaleur

III.5.4.1. Transfert de Chaleur entre l'Absorbeur et le Fluide Caloporteur

Considérant la convection forcée du fluide caloporteur dans le tube absorbeur, $q_{gagnée}$ est calculée par l'équation de Dittus-Boelter pour l'écoulement totalement développé dans un tube circulaire lisse. Par conséquent, le nombre de Nusselt local est donnée par :

$$Nu_1 = 0,023 Re_1^{4/5} Pr_1^4$$

Pr_1 est le nombre de Prandtl et Re_1 le nombre de Reynolds.

Le nombre de Reynolds Re_1 pour un flux dans un tube circulaire est donné par :

$$Re_1 = \frac{4\rho_f V}{\pi D_{absi} \mu_f}$$

μ_f est la viscosité du fluide caloporteur.

Le nombre de Prandtl est donné par :

$$Pr_1 = \frac{\mu_f C_f}{K_f}$$

Le coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur Pr_1 est donné par l'équation suivante :

$$q_{gagnée} = h_1 \pi D_1 (T_{abs} - T_f)$$

Les propriétés du fluide caloporteur C_f , K_f , μ_f et ρ_f sont fonction de la température T_{abs} .

III.5.4.2. Transfert de Chaleur entre l'Absorbeur et l'Environnement du Verre

Dans ce cas, nous avons deux modes de transfert de chaleur. La convection et le rayonnement entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre.

$q_{\text{intérieur}}$ est calculée comme suit :

$$Q_{\text{intérieur}} = Q_{\text{intérieur-convection}} + Q_{\text{intérieur, rayonnement}}$$

la convection dans l'espace annulaire entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre est estimée par des relations de la convection naturelle entre deux cylindres horizontaux et concentriques [2], cependant l'enveloppe du verre est usuellement plus froid que le tube absorbeur ($T_{\text{abs}} > T_V$) :

$$Q_{\text{intérieurconvection}} = \frac{2\pi K_{\text{eff}}}{\ln(D_{\text{vi}}/D_{\text{abse}})} (T_{\text{abs}} - T_V)$$

D_{abse} est le diamètre extérieur du tube absorbeur.

D_{vi} le diamètre intérieur de l'enveloppe du verre.

K_{eff} la conductivité thermique effectuée de l'air, elle représente la conductivité thermique que l'air stationnaire devrait avoir pour transférer la même quantité de chaleur que l'air mobile, elle est donnée par [1] :

$$\frac{K_{\text{eff}}}{K_{\text{air}}} = 0,386 \left[\frac{\text{Pr}_{\text{air}}}{0,861 + \text{Pr}_{\text{air}}} \right]^{1/4} (\text{Rac})^{1/4}$$

Ou

$$\text{Rac} = \frac{[\ln(D_{\text{vi}}/D_{\text{abse}})]^4}{L^3 (D_{\text{abse}}^{-1/5} + D_{\text{vi}}^{-3/5})^5} \text{Ra}_L$$

Pr_{air} représente le nombre Prandtl de l'air dans l'espace annulaire entre l'absorbeur et l'enveloppe du verre. K_{air} est la conductivité thermique de l'air.

L est la longueur effective de l'absorbeur

$$L = 0,5 (D_{\text{vi}} - D_{\text{abse}})$$

Le nombre de Rayleigh est défini comme suit :

$$\text{Ra}_L = \frac{g B_{\text{air}} \rho_{\text{air}} (T_{\text{abs}} - T_V) L^3}{\text{lair} \mu_{\text{air}}}$$

B_{air} est le coefficient volumétrique de dilatation thermique de l'air.

Les propriétés de l'air dans l'espace annulaire, telles que :

α_{air} , B_{air} , ρ_{air} , K_{air} , C_{air} , et Pr_{air} sont fonction de la température moyenne $T = 0,5 (T_{\text{abs}} + T_V)$ en plus la densité de l'air.

Le transfert thermique par rayonnement $q_{\text{int-Ray}}$ entre deux cylindres concentriques et horizontaux entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre peut être exprimé par la relation suivante [2] :

$$q_{\text{intérieur,rayonnement}} = \frac{\tau \pi D_{\text{abse}} (T_{\text{abs}}^4 - T_V^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{abs}}} + \frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g} \left(\frac{D_{\text{abse}}}{D_{\text{vi}}} \right)}$$

Où ε_{abs} est l'émissivité de l'absorbeur. Elle dépend de la température de l'absorbeur [1] ; ε_g l'émissivité de l'enveloppe du verre dans ce modèle ε_g prend la valeur 0 ; 9 ; τ la constante de Stefan Boltzuman.

III.5.4.3. Transfert de Chaleur entre l'Enveloppe du Verre et l'Environnement

On suppose que le transfert thermique entre l'enveloppe du verre et l'environnement est dû à la convection et au rayonnement.

$$q_{\text{extérieur}} = q_{\text{extérieur, convection}} + q_{\text{extérieur, rayonnement}}$$

Le nombre de Nusselt dû à la convection est donné par la formule suivante [14] :

$$Nu_3 = 0,3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr_3^{1/3}}{\left[1 + (0,4/Pr_3)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[1 + \left[\frac{Re_3}{282} \right]^{5/8} \right]^{4/5}$$

Pour l'enveloppe de verre, le nombre de Reynolds Re_3 est défini par :

$$Re_3 = \frac{\rho_{\text{air,amb}} V_{\text{vent}} D_{\text{ve}}}{\mu_{\text{air,amb}}}$$

V_{vent} est la vitesse du vent. $\rho_{\text{air,amb}}$, $\mu_{\text{air,amb}}$ sont respectivement la densité et la viscosité de l'air ambiant D_{ve} et le diamètre extérieur de l'enveloppe du verre.

Le nombre de Prandtl Pr_3 est toute les propriétés de l'air sont fonction de la température moyenne de l'air.

$T_{\text{amb}} = 0,5 (T_{\text{abs}} + T_{\text{amb}})$. La densité de l'air dans ce cas est une fonction de la pression atmosphérique.

Le transfert thermique à l'environnement dû à la convection est $q_{\text{extérieur, convection}} =$

$$q_{\text{ext, conv}} = h_3 \pi D_{\text{ve}} (T_V - T_{\text{amb}})$$

$$h_3 = \frac{Nu_3 K_{\text{air,amb}}}{D_{\text{ve}}}$$

Le transfert thermique à l'environnement dû au rayonnement peut s'exprimer par [4] :

$$q_{\text{ext,Ray}} = \varepsilon_3 \tau \pi D_{\text{ve}} (T_{\text{abs}}^4 - T_{\text{amb}}^4)$$

III.6. Pertes Thermiques [14]

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

$$Q_{\text{pert}} = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{ray}}$$

III.6.1. Pertes Par Conduction

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

$$Q_{\text{cond}} = \lambda_{\text{abs}} A_{\text{abs}} (T_{\text{abs}} - T_{\text{amb}}) \Delta z$$

III.6.2. Pertes par Convection

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

$$Q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} A_{\text{abs}} (T_{\text{abs}} - T_{\text{amb}})$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donné par la formule suivante [14] :

$$h_{\text{conv}} = \frac{\text{Nu} \lambda_{\text{air}}}{d}$$

d : Diamètre du récepteur.

λ_{air} : Conductivité thermique de l'air

Le nombre du Nusselt Nu est donné par :

$$Nu = 0,664(Re)^{1/2}(Pr)^{1/3}$$

Le calcul du nombre de Reynolds Re par la formule :

$$Re = \frac{Vd}{V_{air}}$$

III.6.3. Pertes par rayonnement :

La perte de chaleur par rayonnement est importante pour des récepteurs fonctionnant seulement aux températures légèrement au-dessus de la température ambiante, et devient dominante pour des collecteurs fonctionnant à températures élevées. Le schéma 5,2 illustre cette transition pour une surface verticale noire en air immobile. Le taux de perte de chaleur de rayonnement est proportionnel à l'émissivité de la surface et à la différence dans la température à la puissance quatre. L'équation décrite sous la forme, nous avons :

$$Q_{ray} = \varepsilon_{abs} \sigma A_{abs} (T_{abs}^4 - T_{ciel}^4)$$

Où :

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

σ : Constante Stefan-Boltzmann.

T_{ciel} : Température du ciel.

La température équivalente du rayonnement du ciel dépend de la densité de l'air et de son contenu d'humidité, quand l'humidité relative est haute où qu'on soit au niveau de la mer, on peut supposer que la température du ciel est identique à la température de l'air ambiant. Cependant pour les basses humidités relative ou aux altitudes élevées, la température du rayonnement du ciel peut être inférieur de 6°C que la température ambiante [13], donné par la formule de Whillier (1967) :

$$T_{ciel} = T_{amb} - 6$$

Et par la formule de Swinbank (1963) :

$$T_{\text{ciel}} = 0,0552 T_{\text{amb}}^{1,5}$$

On obtient la forme suivante :

$$Q_{\text{ray}} = A_{\text{abs}} h_{\text{ray}} (T_{\text{abs}} - T_{\text{amb}})$$

$$h_{\text{ray}} = \varepsilon_{\text{abs}} \sigma \frac{T_{\text{abs}}^4 - T_{\text{ciel}}^4}{T_{\text{abs}} - T_{\text{amb}}}$$

III.7. Discrétisation des Equations

(Résolution du système d'Equation)

Les équations du bilan thermique utilisées ne sont linéaires, pour ce cas on a opté pour la méthode de discrétisation des différences finies pour résoudre les équations suivantes ou la température varie avec le temps et l'espace :

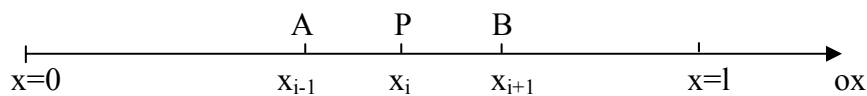
$$\rho_F C_F A_{\text{abs}} \frac{\partial T_F(x, t)}{\partial t} = \rho_F C_F V \frac{\partial T_F(x, t)}{\partial x} + q_{\text{gagnée}}^{(x,t)} \quad \text{(I)}$$

$$\rho_{\text{abs}} C_{\text{abs}} A_{\text{abs}} \frac{\partial T_{\text{abs}}(x, t)}{\partial t} = q_{\text{absorbée}}(t) - q_{\text{intérieur}}(x, t) - q_{\text{gagnée}}(x, t) \quad \text{(II)}$$

$$\rho_v C_v A_v \frac{\partial T_v(x, t)}{\partial t} = q_{\text{intérieur}}(x, t) - q_{\text{extérieur}} \quad \text{(III)}$$

Pour l'évolution de notre fluide caloporteur qui est l'eau, nous considérons un problème monodimensionnel pour lequel le domaine est un segment situé sur un axe ox .

Ce segment est découpé en petites parties sur une longueur de 8m chaque partie de 1m déterminer par les nœuds $P(x_i)$ du maillage



La température au point P sera noté T_{Fxi} et les deux points voisins $T_{Fx(i-1)}$ et $T_{Fx(i+1)}$.

Le nombre de point utilisé est 2.

* **Estimation de la dérivée première au premier ordre :**

$$\left(\frac{\partial T_F}{\partial x}\right)_i = cte_1 T_{F_{X(i-1)}} + cte_2 T_{F_{Xi}}$$

Cette équation est un développement limité au premier ordre de T(x,t) au tour du point P selon la méthode de Taylor on déduit :

$$T_{F_{X(i-1)}} = T_{F_{Xi}} - (x_i - x_{(i-1)}) \left(\frac{\partial T_F}{\partial x}\right)_i + 0(x_i - x_{(i-1)})^2$$

Cte₁ et cte₂ s'obtiens par le développement limité au premier ordre de T(x,t) autour du point P.

$$\left(\frac{\partial T_F}{\partial x}\right)_i = \frac{-1}{(x_i - x_{(i-1)})} T_{(i-1)} + \frac{1}{(x_i - x_{(i-1)})} T_i$$

Donc :

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = \frac{T_{Fi}(t) - T_{F(i-1)}(t)}{\Delta x}$$

On a :

$$\Delta x = \frac{\text{longueur}}{i_0}$$

$$i = 1, 2, \dots, i_0, i_0=8$$

Le résultat est un ensemble d'équation du premier ordre pour la température du fluide caloporteur.

$$\frac{\partial T_{Fi}(t)}{\partial t} = -\frac{V_F(t)}{A_{abs}\Delta x} T_{Fi}(t) + \frac{f_F(T_{F(i-1)})C_F(T_{F(i-1)})V_F(t)}{f_F(T_{Fi})C_F(T_{Fi})A_{abs}\Delta x} T_{F(j-1)}(t) + \frac{1}{f_F(T_{Fi})C_F(T_{Fi})A_{abs}} q_{gagnée}(T_{F,i}(t), T_{abs,i}(t))$$

$$T_{Fi} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta t V_F}{A_{abs} \Delta x}} \left[T_{F(i-1)} \left(1 + \frac{\Delta t \rho_{F(i-1)} C_{F(i-1)} V_F}{\rho_{Fi} C_{Fi} A_{abs} \Delta x} \right) + \frac{\Delta t}{\rho_{Fi} C_{Fi} A_{abs}} q_{gagnée}(T_{Fi}, T_{abs}) \right]$$

On simplifié l'équation résolu par la méthode des constantes

$$T_{Fi}^{t+1} = A' T_{Fi}^t + B'_{F(i-1)} + C$$

$$A = \left[1 - \frac{V_F \Delta t}{A_{abs} n_{coll} \Delta X} \right] \quad \text{avec } n_{coll} = 1, \Delta t = 1s$$

$$B = \frac{\rho_{F(i-1)} C_{F(i-1)} V_F \Delta t}{\rho_{Fi} C_{Fi} A_{abs} \Delta X}$$

$$C = \frac{q_{gagnée F(i-1)}}{\rho_{Fi} C_{Fi} A_{abs}}$$

Avec :

$$T_{F,O}(t) = T_{F \text{ entrée}}(t)$$

Condition initiale :

$$T_{F,i}(O) = T_{F \text{ initiale}}(Xi) \quad Xi = i \cdot \Delta X$$

- pour chaque élément distinct du système avec ΔX longueur il y a une température de l'absorbeur déterminée par l'équation différentielle.

$$\frac{\partial T_{abs,i}(t)}{\partial t} = \frac{1}{f_{abs} C_{abs} A_{abs}} \left[q_{absorbée}(t) - q_{interne}(T_{abs,i}(t), T_{env,i}(t)) - q_{gagnée}(t) \right]$$

$$T_{absi} = \frac{\Delta t}{\rho_{abs} C_{abs} A_{abs}} \left[Q_{absorbée}(t) - Q_{interne}(T_{absi}(t), T_{envi}(t)) - Q_{gagnée}(t) \right] + T_{abs(i-1)}$$

On simplifié l'équation résolu par la méthode des constantes

$$T_{abs}^{t+1} = T_{abs} + E$$

$$E = \frac{\Delta t}{\rho_{abs} C_{abs} A_{abs}} \left[q_{absorbée} - q_{interne} - q_{gagnée} \right]$$

Avec les conditions initiales :

$$T_{\text{abs},i}(0) = T_{\text{abs, initiale}}(xi), \quad xi = i. \Delta x$$

Il ya aussi la température de l'enveloppe en verre pour chaque élément de longueur calculée à partir de l'équation différentiel du premier ordre.

$$\frac{\partial T_{v,i}(t)}{\partial t} = \frac{1}{f_v C_v A_v} [q_{\text{interne}}(T_{\text{abs},i}(j), T_{v,i}(t)) - q_{\text{externe}}(T_{v,i}(t), T_{\text{amb}}(t))]$$

$$T_{v,i} = \frac{\Delta t}{\rho_v C_v A_v} [q_{\text{interne}}(T_{\text{abs},i}(t), T_{v,i}(t)) - q_{\text{externe}}(T_{v,i}(t), T_{\text{amb}}(t))] + T_{v(i-1)}$$

On simplifié l'équation résolu par la méthode des constantes

$$T_v^{t+1} = T_v + F$$

$$F = \frac{\Delta t}{\rho_v C_v A_v} [q_{\text{interne}} - q_{\text{externe}}]$$

Avec les conditions initiales :

$$T_{v,i}(0) = T_{v \text{ initiale}}(xi) \\ xi = i. \Delta x$$

* Structure du code de calcul [26]

Nous avons développé un code de calcul en langage FORTRAN qui est un monobloc, qui nous permet de déterminer le rayonnement solaire direct, puis nous avons calculés le facteur d'interception et les différentes puissances, ensuite on as mis les équations précédentes simplifiés obtenu par le bilan thermique établis dans une boucle de temps et une boucle d'espace. Ce qui nous a permis d'obtenir l'évolution du rendement de notre système.

On a pris on considération la température ambiante qui est 290K dans une journée d'automne qui est le 16 Décembre 2002 à Wisconsin USA d'où Les coordonnées géographiques et

Latitude =43 ,909

Longitude = 71 ,1537

Altitude =267

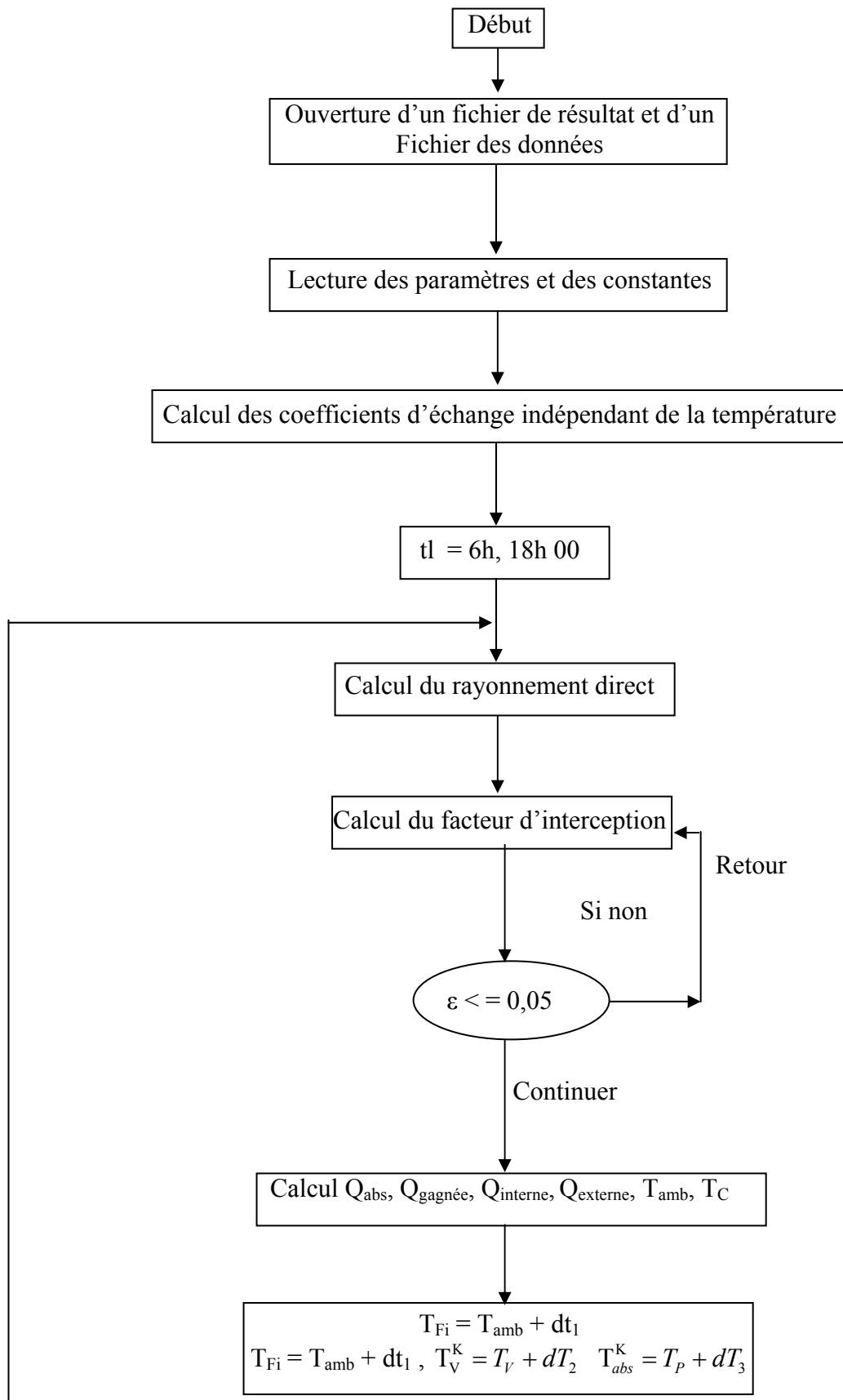
Et un débit de 0,5m³/s de fluide caloporteur (l'eau).

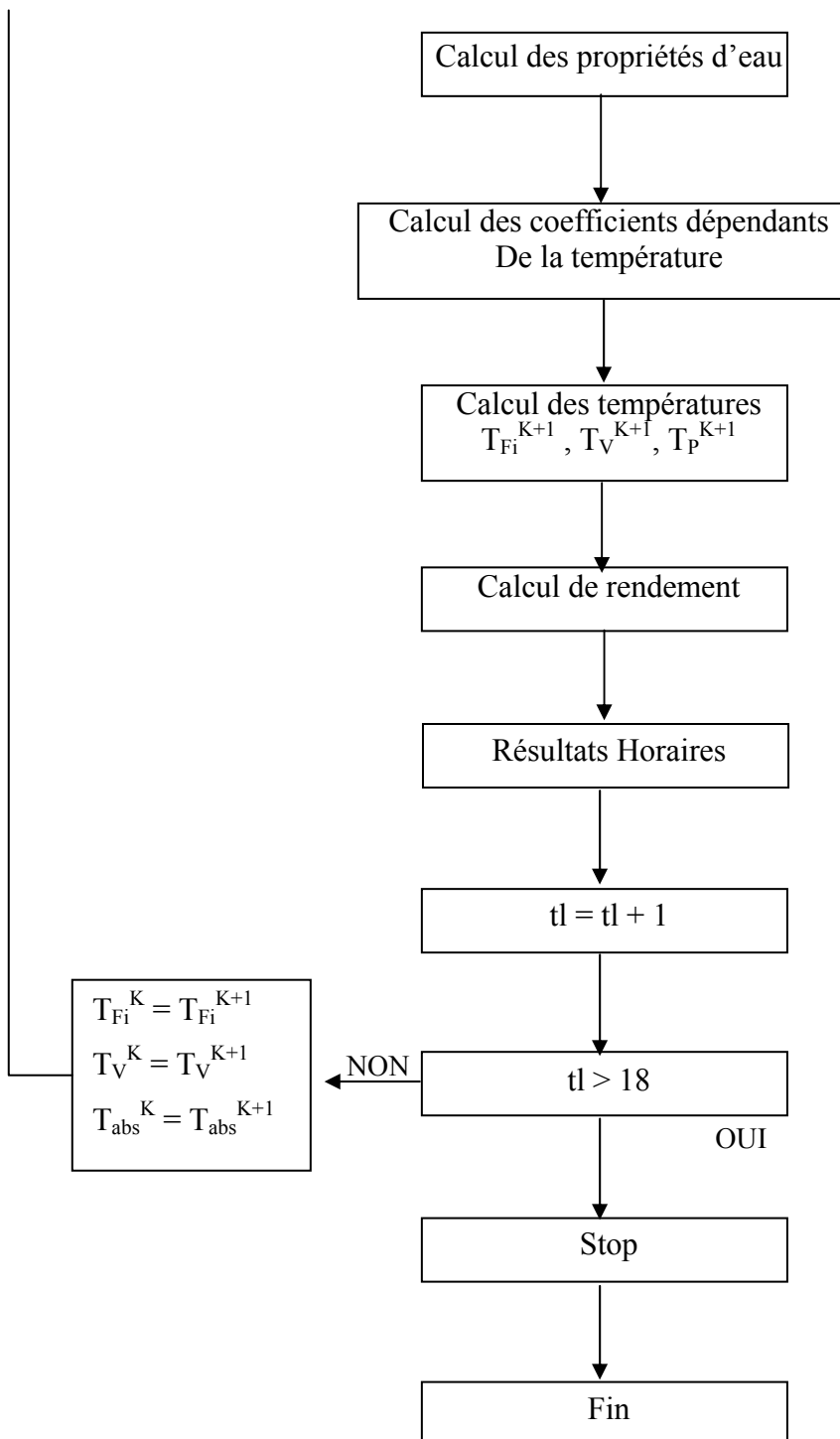
Ce code est constitué par les étapes suivantes :

1. Déclaration des constantes et variables.

2. Mise des paramètres des prototypes.
3. Coordonnés géographiques de l'expérimentale.
4. Caractéristiques thermophysiques de l'eau.
5. Calcul des coordonnés horaires.
6. Calcul du rayonnement solaire direct sans poursuite et avec poursuite totale $\cos\theta = 1$.
7. Calcul des températures (T. ambiante, T. ciel).
8. Calcul du facteur d'interception avec la méthode d'intégral de Simpson (polynôme de 5^{ème} ordre).
9. Calcul des puissances.
10. Mise en équation du bilan thermique.
11. Calcul du rendement thermique et les pertes thermiques.

* L'Organigramme de Calcul





Chapitre VI

IV.1. Introduction

La résolution du système d'équations des bilans thermique au niveaux de chaque partie du concentrateur par la méthode numérique des différences finies, un programme de calcul en fortran a été établi après la discrétisation des équations non linéaire ce qui nous a permis d'obtenir un ensemble de résultats numériques que nous validerons par des résultats Expérimentaux.

IV.2. Les Caractéristiques du Prototype :

Le concentrateur solaire étudié présente les caractéristiques suivantes :

Désignation	Dimension
Diamètre interne du tube absorbeur DA_i	0,012m
Diamètre extérieur du tube absorbeur DA_e	0,14m
Diamètre intérieur de l'enveloppe en verre D_{vi}	0,017m
Diamètre extérieur de l'enveloppe en verre D_{ve}	0,020m
Largeur effective du Miroir Weff	1m
Longueur du Tube	8m

IV.3. Les Caractéristiques des Matériaux Utilisés :

Les caractéristiques thermophysiques de matériaux pouvant constituer le concentrateur solaire. [28]

Métal	Conductivité Thermique W/mit	Masse Volumique Kg/m ³	Chaleur Massique g°/kg.k	Absorptivité	Emissivité
Cuivre	384	8900	398	0,25	0,02
Aluminium	204	2700	879	0,63	0,09
Verre à vitre	0,93	2700	840		Transmissivité 0,85-0,92

Les coordonnées géographiques de Wisconsin Madison USA :

Latitude =43 ,909

Longitude = 71 ,1537

Altitude =267

IV.4. Les Résultats Numériques :

D'après notre observation une orientation est-ouest du concentrateur implique que ces effets sont très importants au début et à la fin de la journée surtout pour des journées comprises entre les équinoxes.

Ceci est traduit par l'angle d'incidence qui prend des valeurs maximales durant cette période.

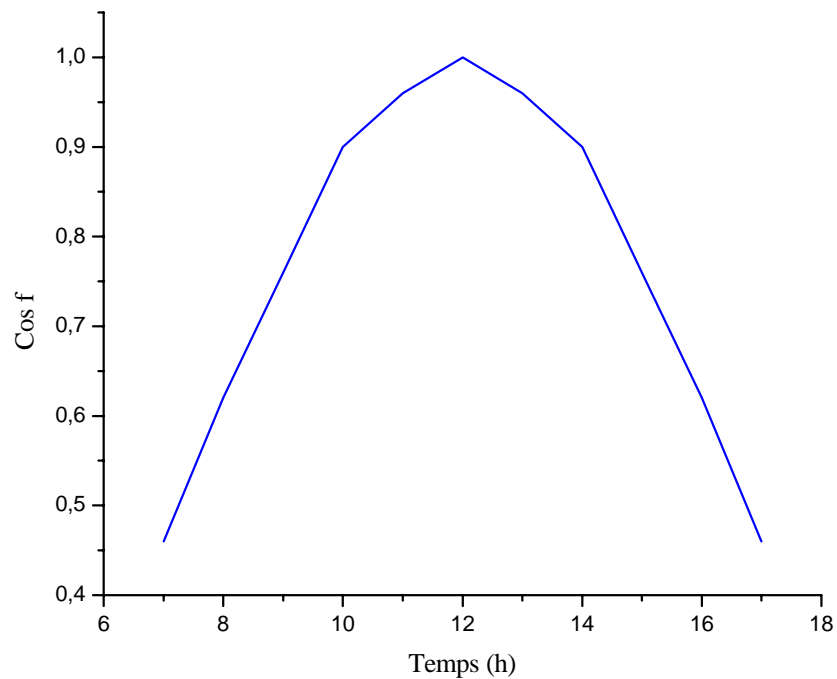


Figure 1: Evolution temporelle de l'angle d'incidence.

*** Rayonnement direct :**

Nous montrons la variation de l'éclairement solaire direct pour un concentrateur qui suit le mouvement du soleil durant une journée d'automne.

Nous montrons la variation de l'éclairement solaire direct pour un concentrateur sans poursuite solaire durant une journée d'automne.

On remarque que la puissance solaire reçue à l'ouverture de la parabole avec suiveur est plus importante par rapport à l'éclairement direct reçu sans suiveur. Le système de poursuite permet un gain de plus 10% (environ) pendant l'automne, cette variation est due à l'influence de l'inclinaison solaire

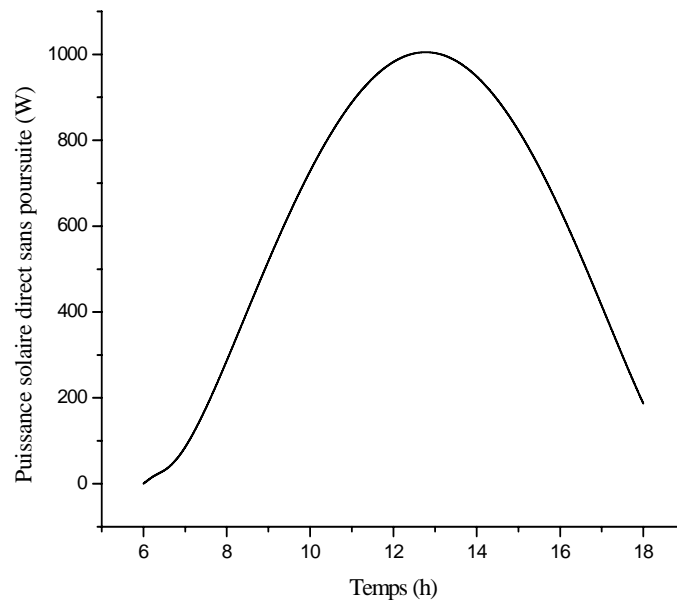


Figure2 : évolution temporelle de la puissance solaire

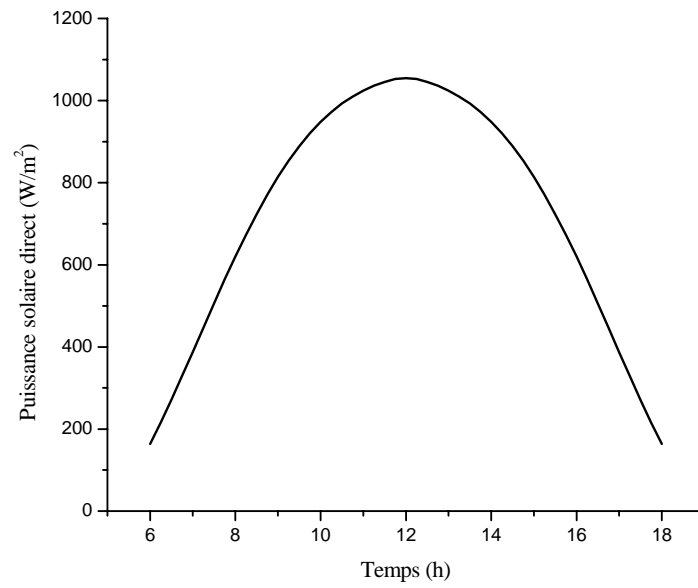


Figure 3 : évolution temporelle de la puissance solaire avec $\cos\theta = 1$

*** Variation de la température de l'absorbeur du fluide caloporteur et du vitrage en fonction du temps solaire :**

L'observation permet de noter que la température du tube absorbeur est la plus importante d'où sa température maximale atteint approximativement 574 K aux environs de 13h , en deuxième position se succède la température du fluide caloporteur (qui est l'eau dans notre cas ou plus précisément de la vapeur surchauffée _ vu le changement de phase _) du fait de la quantité d'énergie relativement importante qui lui est transmise de l'absorbeur par convection forcée (coefficient d'échange par convection estimé à $121\text{w}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{k}^{-1}$) celle-ci a atteint une température maximale de 550K aux environs de 13h.

Puis la température du vitrage qui a atteint une température maximale de 476K aux environs de 13h après avoir reçue le rayonnement direct réfléchi par le miroir

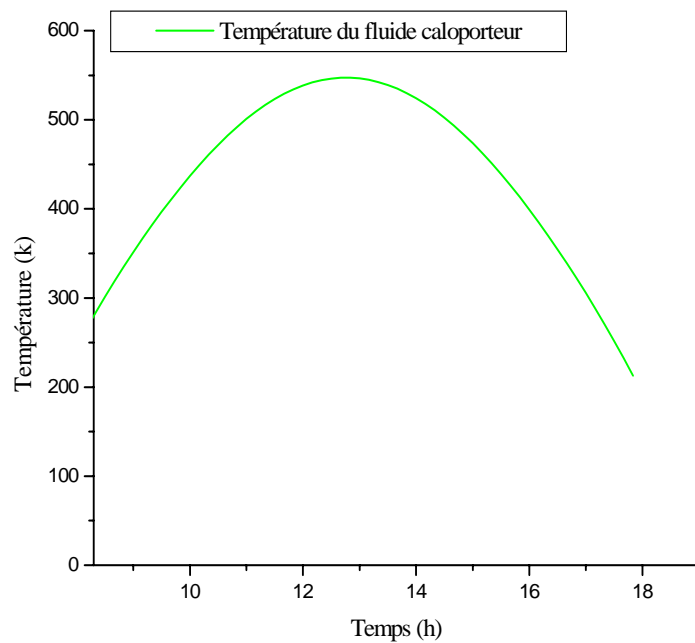


Figure 4 : La variation temporelle du fluide caloporteur

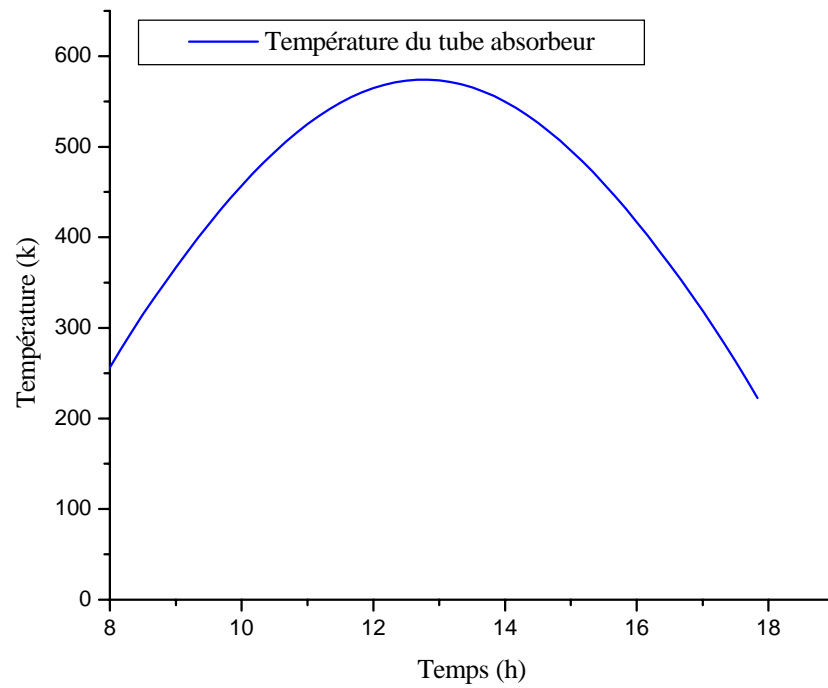


Figure 5 : Variation temporelle du Tube Absorbeur

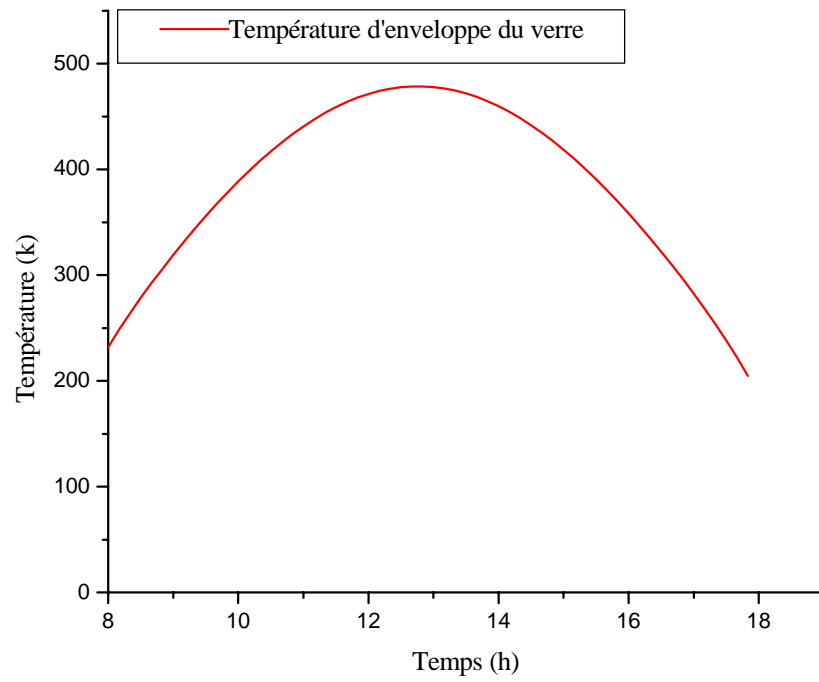


Figure 6: Variation temporelle du Vitrage

*** Variation des puissances en fonction du temps solaire :**

La puissance absorbée est la plus importante et accroît avec la puissance solaire puisque elle provient du rayonnement direct réfléchi par le miroir ce qui est expliqué par la hauteur du soleil et la masse atmosphérique, son importance est due à ses coefficients (d'absorption de transmission) élevés.

Il est évident aussi que la puissance utile récupérée par le fluide caloporteur dépend étroitement du rayonnement solaire direct, vu que la puissance absorbée dépend de la puissance solaire et donc les puissances augmentent avec l'accroissement de la puissance solaire

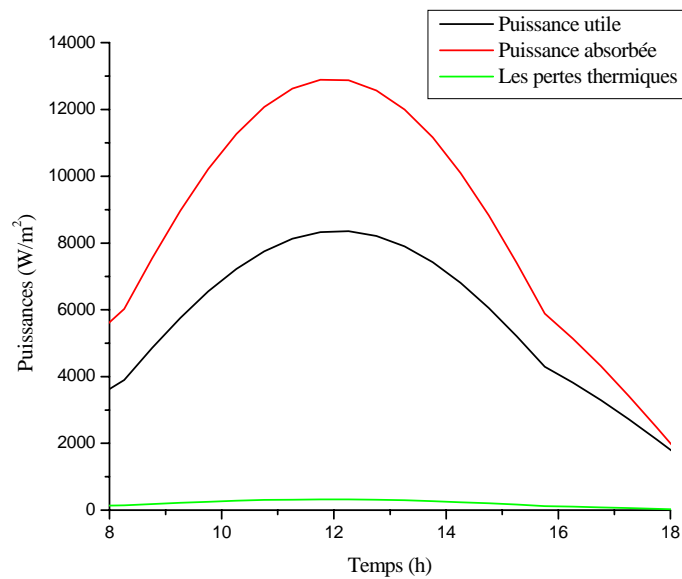


Figure 7: Evolution temporelle des puissances : absorbée, utile, pertes thermiques

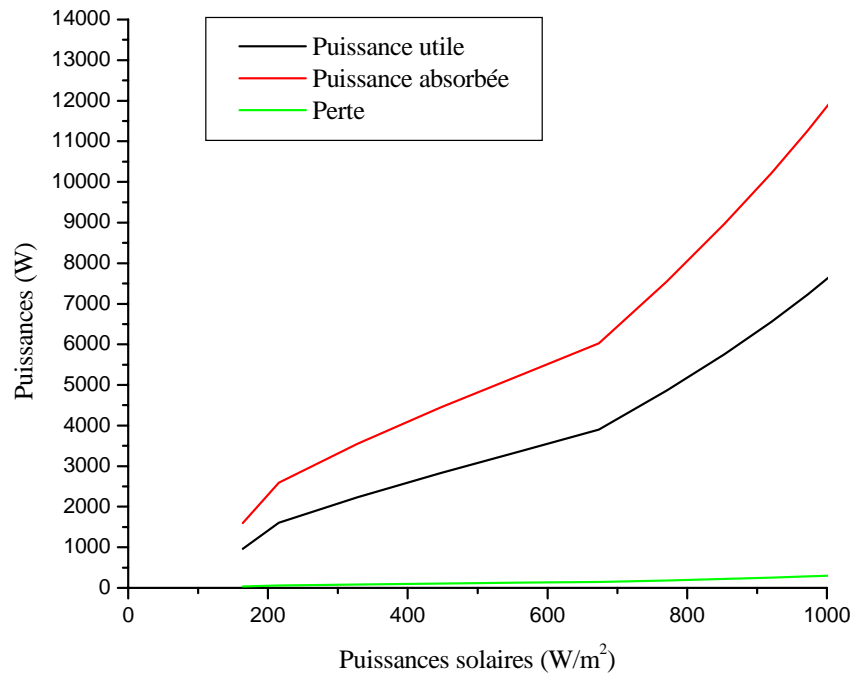


Figure 8 : évolution des puissances en fonction de la puissance solaire

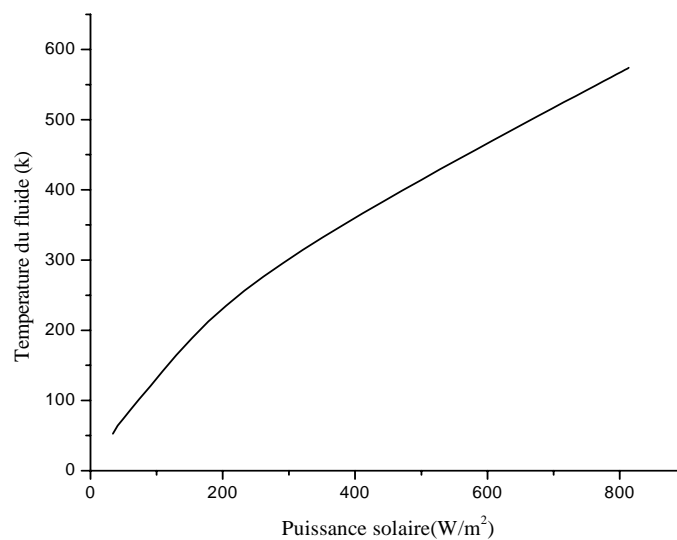


Figure 9 : Evolution de la Température du Fluide Caloporteur en Fonction de la Puissance Solaire

***Evolution de la Température du Fluide Caloporteur en fonction de ox :**

D'après le graph obtenu de la variation de la température du fluide caloporteur en fonction de (ox) on observe que la température du fluide caloporteur augmente avec la longueur du tube absorbeur (à chaque fois qu'on augmente la longueur du tube absorbeur, la température du fluide caloporteur augmente avec).

De ce fait on déduit que le contact direct du tube absorbeur avec le fluide caloporteur (l'eau) et suite à la convection forcée on a le chauffage de l'eau jusqu'à l'ébullition, (obtention de la vapeur surchauffée).

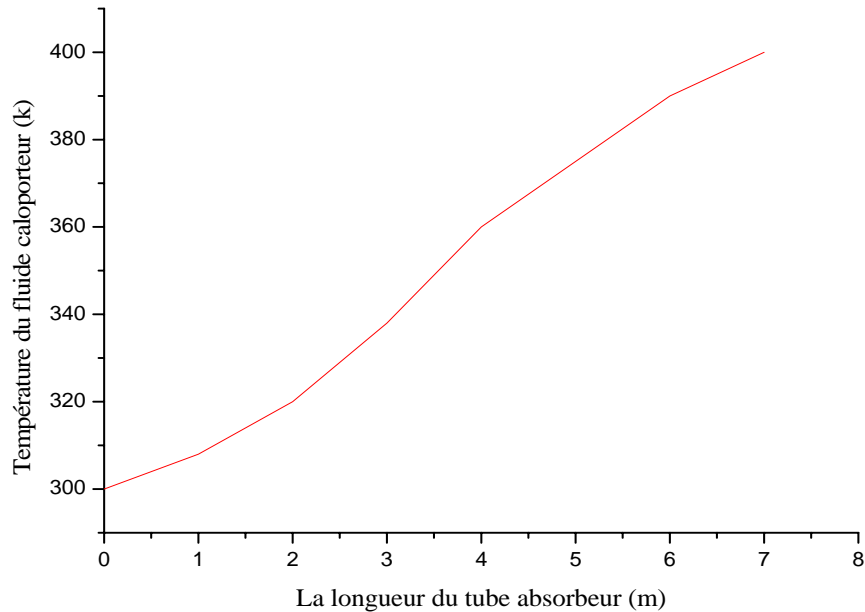


Figure 10: Evolution de la température du fluide caloporteur en fonction de la longueur du tube absorbeur (ox)

***Evolution de la température du fluide caloporteur avec les débits volumiques différents :**

D'après les graphes obtenus, on a conclu que lorsqu'on diminue le débit volumique du fluide caloporteur, la température de ce dernier augmente

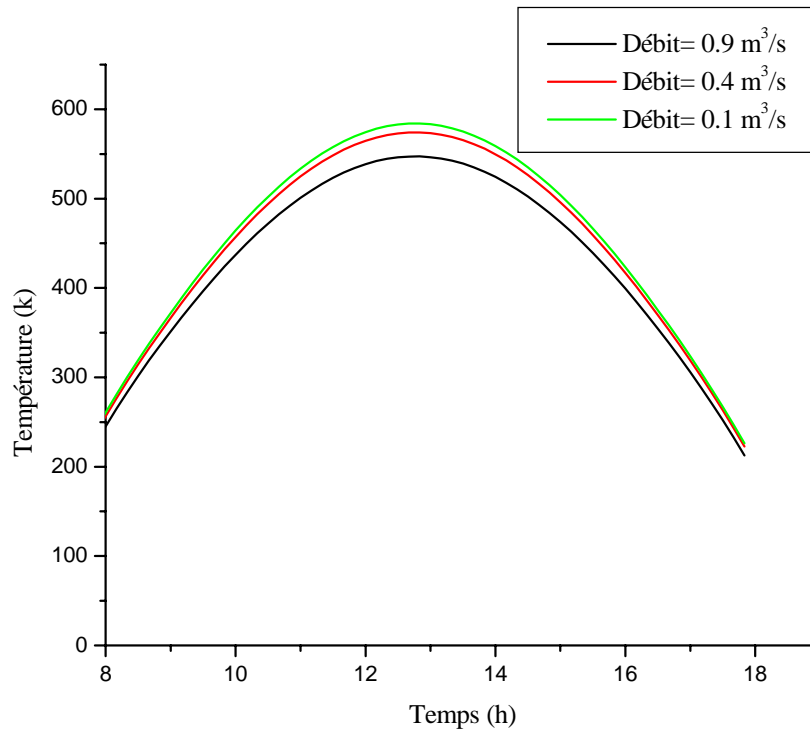


Figure 11 : Influence du débit volumique sur la température du fluide caloporteur

***Evolution de la température de l'absorbeur avec et sans couche sélective :**

On remarque que l'évolution de la température du tube absorbeur avec une couche sélective est nettement plus grande que pour celle sans couche sélective.

_ Sans couche sélective : cuivre poli ($x_{ab} = 0,25$)

_ Avec couche sélective : en chrome noir ($x_{ab} = 0,95$)

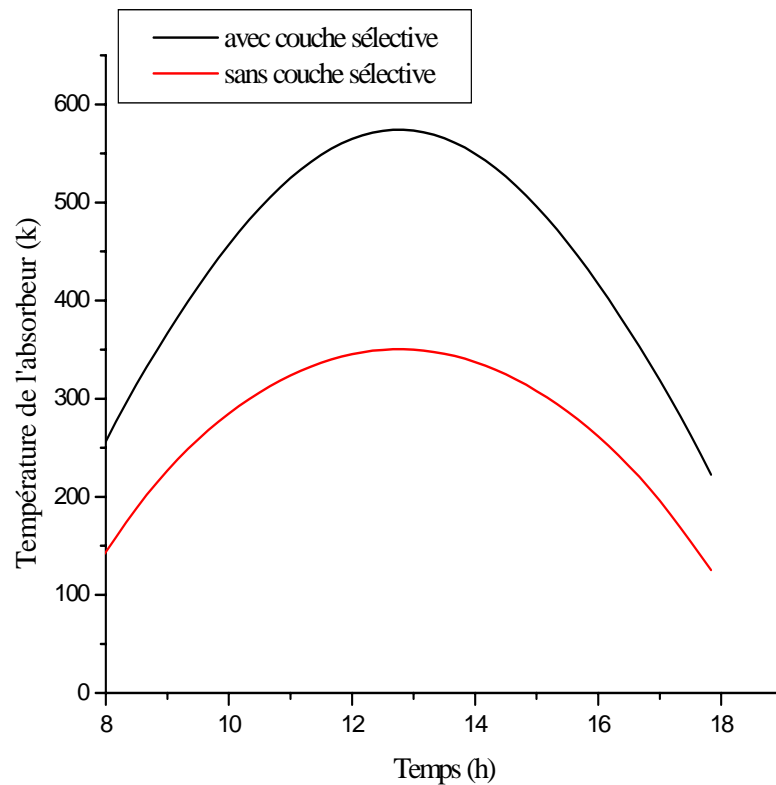


Figure 12 : Influence de la couche sélective sur la température de l'absorbeur

***Evolution du facteur d'interception :**

Evolution du facteur d'interception du déplacement de l'absorbeur dans le plan focal.

On remarque que :

Pour un déplacement de 60% de l'absorbeur dans le plan focal, le facteur est de valeur de 55%

Pour un déplacement de 30% de l'absorbeur dans le plan focal, le facteur est de valeur de 90%

Donc :

A chaque fois que le déplacement entre la ligne focale et l'absorbeur diminue le facteur d'interception augmente

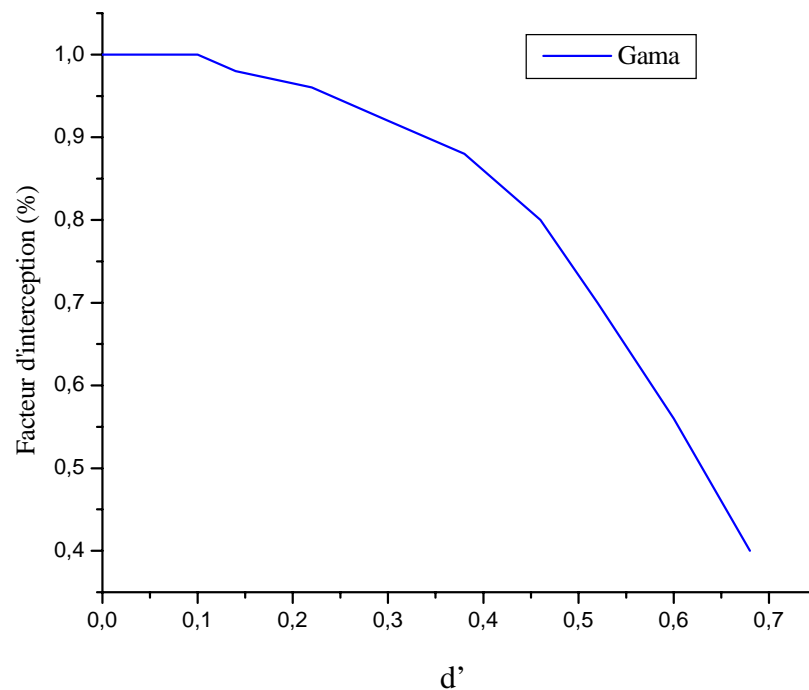


Figure 13 : Evolution du facteur d'interception en fonction de d'

Pour une position idéale de l'absorbeur dans le plan focal, ce facteur prend des valeurs simplificatrices et pour un angle d'ouverture supérieur à 50°, le taux du flux absorbé est supérieur à 85% en effet l'angle d'ouverture du collecteur varie simultanément avec la tache solaire sur la surface de l'absorbeur pour intercepter le maximum du rayonnement solaire incident.

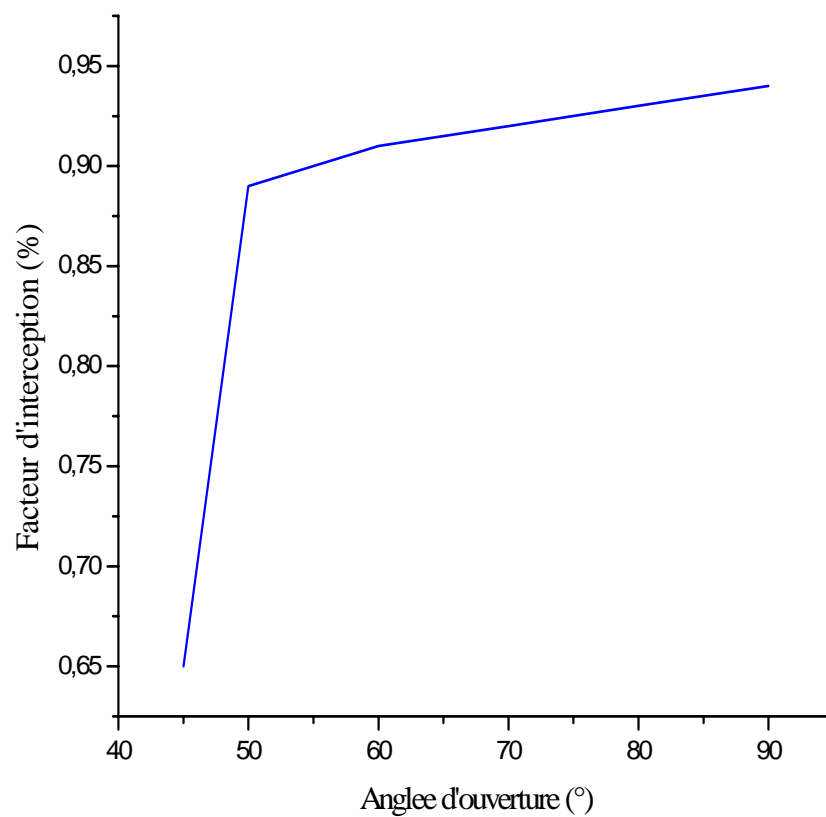


Figure 14 : Evolution du Facteur d'Interception en Fonction de l'Angle d'Ouverture

***Evolution du Rendement :**

On observe que le rendement augmente durant le chauffage du collecteur

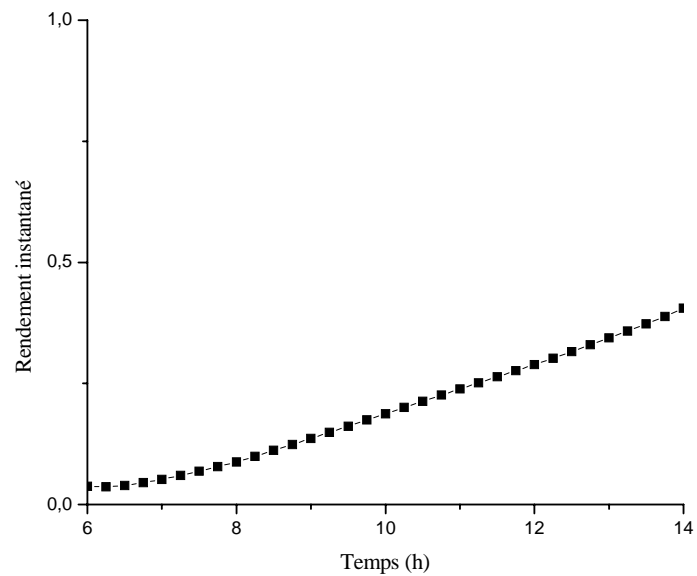


Figure 15 : Evolution temporelle du rendement instantané

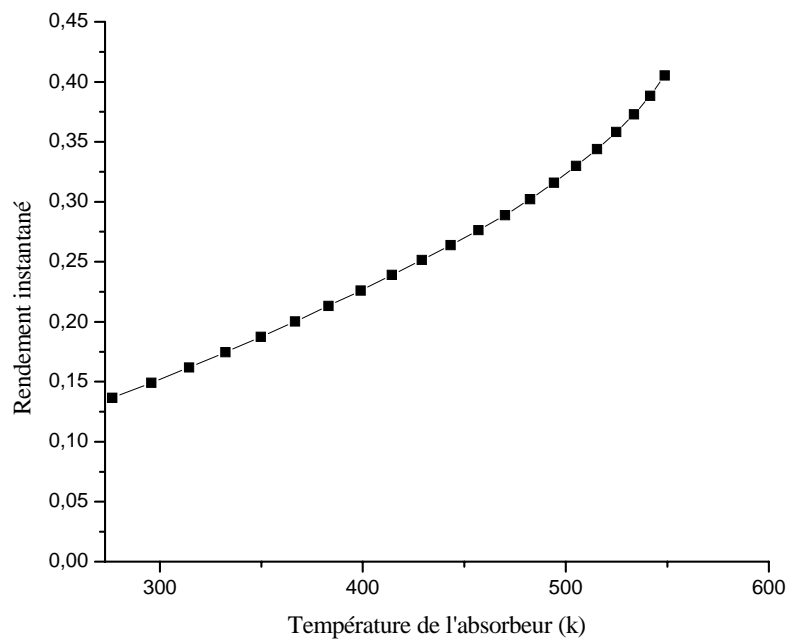


Figure 16: Evolution du rendement instantané en fonction de la température de l'absorbeur

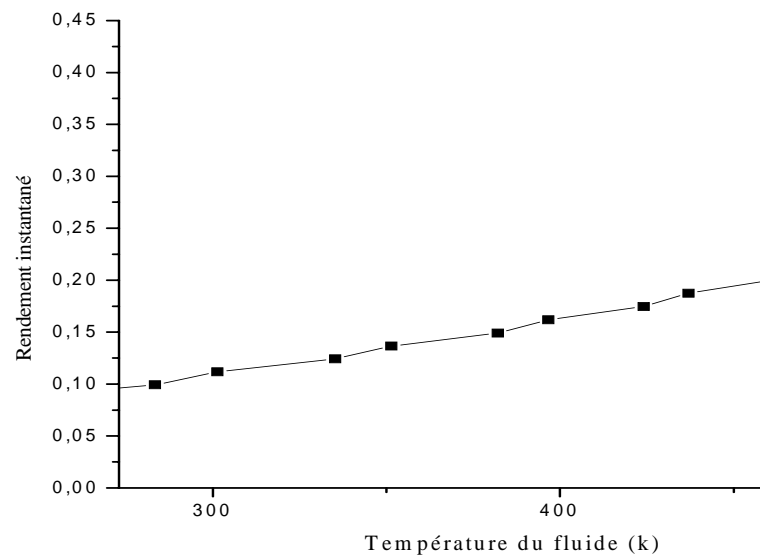


Figure 17 : Evolution du rendement instantané en fonction de la température du fluide

IV.5. La Validation des Résultats avec l'expérimental :

- Validation de la température du fluide caloporteur à une journée d'automne du 16 Décembre 2002 à Wisconsin Madison USA

On remarque que notre résultat numérique est approximatif à celui de l'expérimental et que l'expérimental donne quelques déviations vers 14h et 15h, ce qui est expliqué par des troubles atmosphériques qu'on prend pas en considération lors de l'étude numérique et vue les différents hypothèses de calculs prise en considération c'est pratiquement impossible d'avoir un résultat identique.

Quand au rayonnement solaire direct sans poursuite, il est approximatif aux résultats numériques.

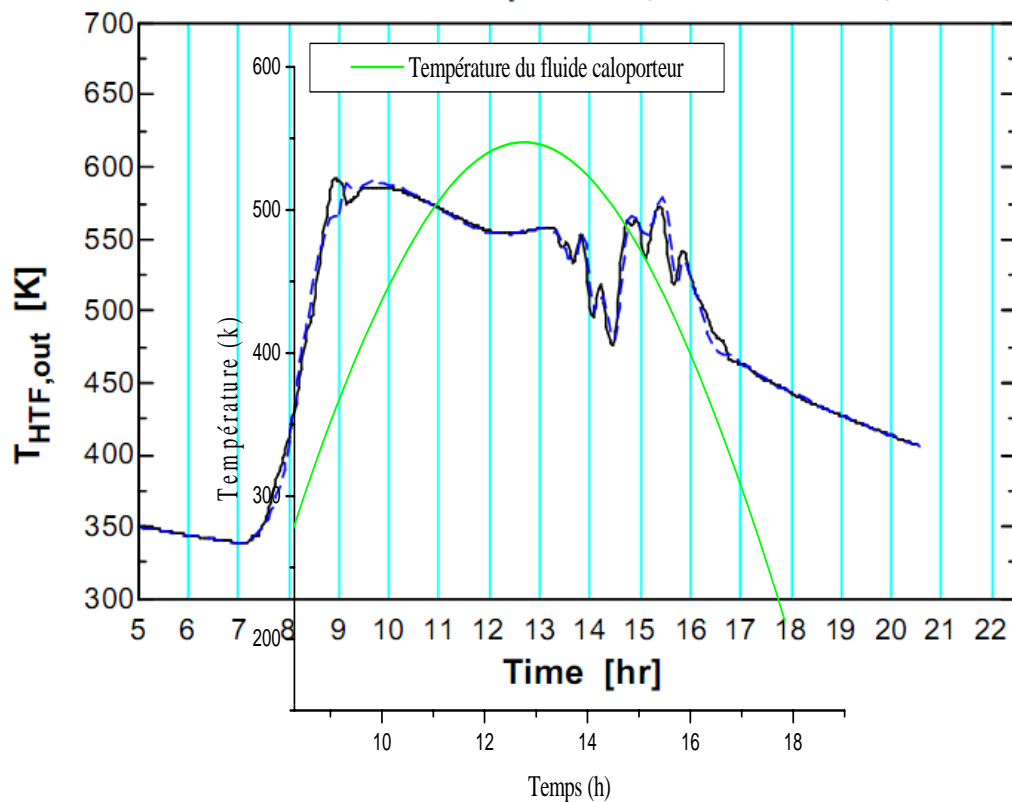


Figure 18 : Evolution de la température du fluide en fonction du temps solaire

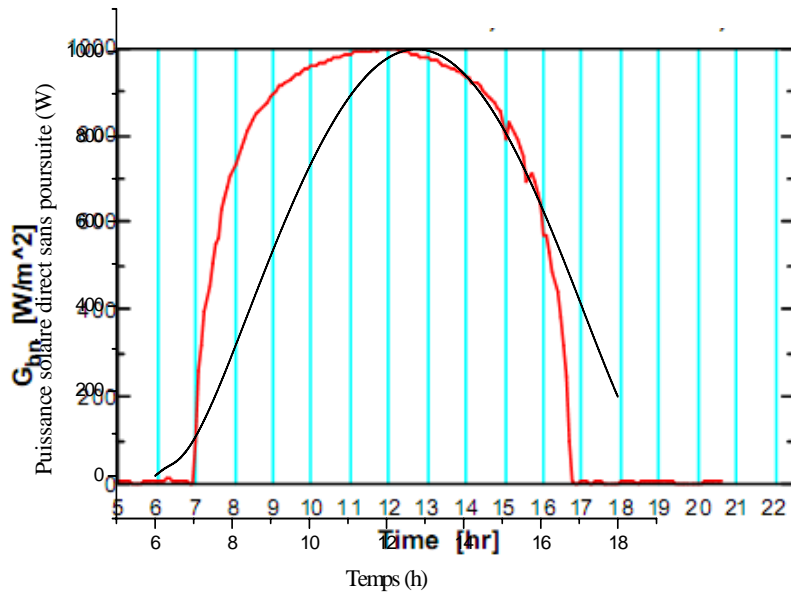


Figure 19 : Evolution temporelle du Rayonnement Direct

IV.6. Conclusion générale :

Ce travail est une contribution à l'étude d'un concentrateur cylindro_parabolique il s'intéresse particulièrement au rayonnement concentré et à différentes parties du concentrateur avec les différents modes de transfert de chaleur parmi les résultats les plus importants :

- La poursuite solaire influence positionnement le rendement de la puissance solaire « rayonnement direct ».
- L'augmentation de la valeur Du facteur optique fait augmenter la puissance absorbée et donc la température du fluide.
- L'augmentation de la longueur du tube absorbeur entraîne une augmentation de la température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur.
- La diminution du débit volumique entraîne une augmentation de la température du fluide caloporteur.

Références Bibliographiques :

- [1] **J .Bernard**, énergie solaire calculs et optimisations, édition : ellipses, 2004
- [2] **M. Iqbal**, an introduction to solar energy, edition: academic press .toronto, 1983
- [3] **M.capderou**, atlas solaire de l'Algérie, tome 1, vol 1 et 2 modèle théorique et expérimentaux, édition : office des publications universitaire, Algérie ,1987
- [4] **Y. Jannot**, cours de transfert thermique, thermique solaire, édition : Mac Graw Hill, octobre 2003
- [5] **C.P .de brichaumbot et C .vaugé**, le gisement solaire, édition : ed.tek et doc paris, 1982
- [6] **J.A.duffie and JW. Becam**, solar engineering, edition : thermal process 2nd .INC ,1991
- [7] **M. Khaled**, conception est réalisation d'un concentrateur sphérique, université de constantine, 2008.
- [8] **SA. Kalogirou**, solar thermal collectors and applications progress in energy and combustion science, edition : London, Washington DC, 2004
- [9] **Lyderic Bocquet, Jean Pierre Faroux, Jacque Renault**, toute la thermodynamique et la mécanique des fluides, édition : Dunod Paris,2002
- [10] **J.E. Braun et JC. Mitchell**, solar geometry for fixed and tracking surface, edition: solar energy laboratory, 1983
- [11] **R. Winston**, solar energy, edition: Handbook of optics,1974
- [12] **M.GEYER .and WB. Stine**, power from the sun, edition: JT. Lyle center, 2001
- [13] **Wassila CHKIROU**, analyse thermique pour l'absorbeur d'un concentrateur solaire cylindro_parabolique, séminaire Maroc, du 15 au 17 novembre 2005
- [14] **Donald R, Pitts**, heat transfert, édition : shaums series, 1977
- [15] **Damou Aicha**, projet/real Algérie, responsable de la communication, Décembre 2006
- [16] **N.ESKIN**, transient performance analysis of cylindrical parabolic concentrating collectors and comparision with expérimental résultats ,thèse,1999
- [17] **Alain Ferrire et Gilles Flamant**, captation transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies a concentration. Thème 7. Solaire thermique, édition : Académie des sciences et *Technologies*, 2002
- [18] **U.H.Kurzweg. JP. Benson**, iso-intensity absorber configurations for parabolic concentrators. Edition: solar energy, 1982

- [19] **B. Jennifer. Krystal Roers**, parabolic solar cookers, edition: campus center for appropriate technologies Humboldt state university, 2002
- [20] **Hay.je.davies.ja**, calculation of solar radiation incident on an inclined surface, edition: proceedings first Canadian solar radiation workshop ,1980
- [21] **A.steinfeld et R.Palumbo**, solar thermo chemical process technology .edition: encyclopedia of physical science et technology ,2001
- [22] **Ar.Rabl**, optical and thermal properties of compound parabolic concentrator ,edition: New York .John Wiley and Sons, 1991
- [23] **Pretzel A.C and Simpson CE**, Heat loss technique for annular solar receiver designs, edition: ms-c ms-doc,1978
- [24] **A.gama et M.hadadi et A.malek**, étude et réalisation d'un concentrateur cylindroparabolique avec poursuite aveugle ,revue energies renouvelables,vol11.n :3,2008
- [25] **s.kalogéro.sliod and j.ward.**, a simplified méthode for estimating intercept factor of parabolique Through collectors,prodeedings of the forth word renewable energy congress , denver . Colorado .USA
- [26] **Syemour bocquet. arthur poe**, programation fortran,edition :sylviejacoud,1978
- [27] **Ahmed Khedim**, l'énergie solaire et utilisation sous sa forme thermique et photovoltaïque, éditions : centre de publication universitaire ,2003
- [28] **j. spitz et A . Aubert**, matériaux sélectifs pour la conversion photo thermique de l'énergie solaire ,édition :revue de physique appliqué tome 14,janvier 1979
- [29] **Sebastien roche**, université de la réunion,faculté des sciences et technologies,master 1physique énergétique

1.11. Appareils et Méthodes de Mesure du Rayonnement Solaire

Les mesures du rayonnement solaire sont en général du domaine de la météorologie nationale de chaque pays ou des instituts météorologiques universitaires. Mais la technique de l'énergie solaire a besoin de ces mesures. Pour déterminer la capacité et le rendement d'un capteur solaire, il faut mesurer l'intensité du rayonnement solaire incident. Pour cela, on utilise des appareils de mesure que l'Organisation Mondiale de la Météorologie a classifiés et que les services de la météorologie de chaque pays étalonnent régulièrement.

1.11.1. L'Héliographe : Mesure de la Durée de l'Ensoleillement

Cet appareil est conçu pour mesurer la durée de l'ensoleillement. L'irradiation directe à laquelle l'héliographe est sensible est caractérisée par l'observation de l'ombre au niveau du sol. L'instrument standard se met en fonction lorsque l'irradiation solaire dépasse une limite d'éclairement de 200W/m^2 soit à peu près le cinquième du maximum.

Un des héliographes les plus utilisés est celui de Campbell-Stokes : il se compose d'une sphère en verre de 10cm de diamètre permettant de concentrer les rayons solaires sur une bande de carton bleu-foncé où le rayonnement laisse une trace de brûlure. Figure 47

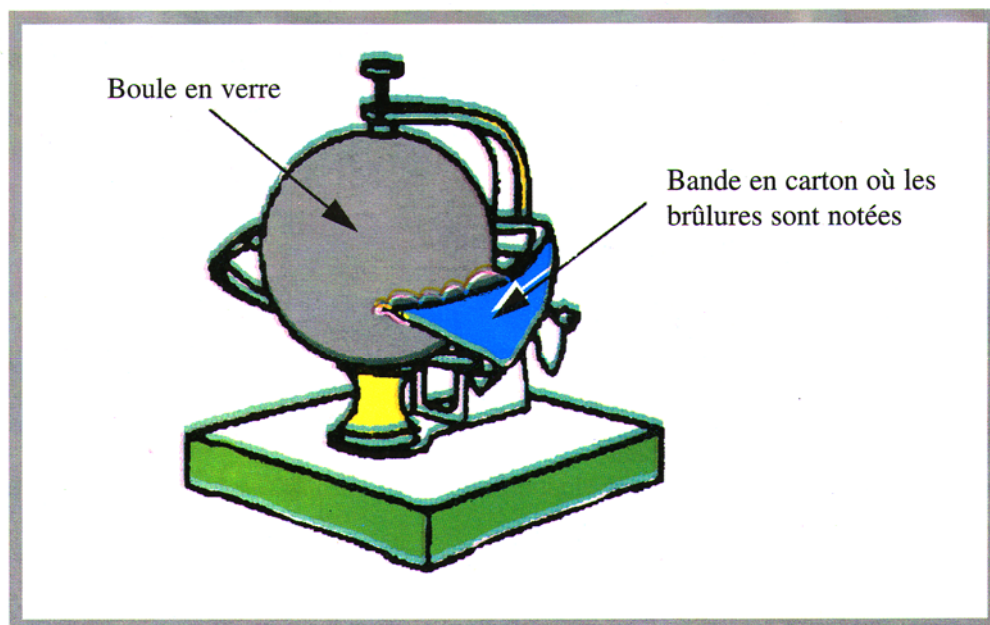


Figure 47 croquis d'un héliographe d'après Campbell-stokes. (13)

1.11.2. Le Pyranomètre : Mesure de l'irradiation globale G [W/m²]

Cet instrument enregistre toute l'énergie solaire qu'il reçoit aussi bien par rayonnement direct que par rayonnement diffus. En principe, l'appareil repose sur un support horizontal au but de pouvoir mesurer le rayonnement incident sur une surface également horizontale. L'angle du champ de vision est alors 180°. Le spectre de longueur d'onde mesuré par un pyranomètre s'étend entre 0.2 et 3.0µm (de la lumière visible à la limite de l'infrarouge). L'appareil le plus couramment utilisé est le pyranomètre d'Eppley. Sa surface de réception comprend deux anneaux concentriques en argent. L'anneau intérieur est recouvert d'une couche noire, l'anneau extérieur est blanc. La différence de température ΔT entre les anneaux est mesurée par des thermocouples qui sont en contact thermique avec les surfaces inférieures des anneaux, mais qui sont électriquement isolés. Le tout est scellé à l'intérieur d'un hémisphère en verre. Le temps de réponse est d'environ 30 secondes.

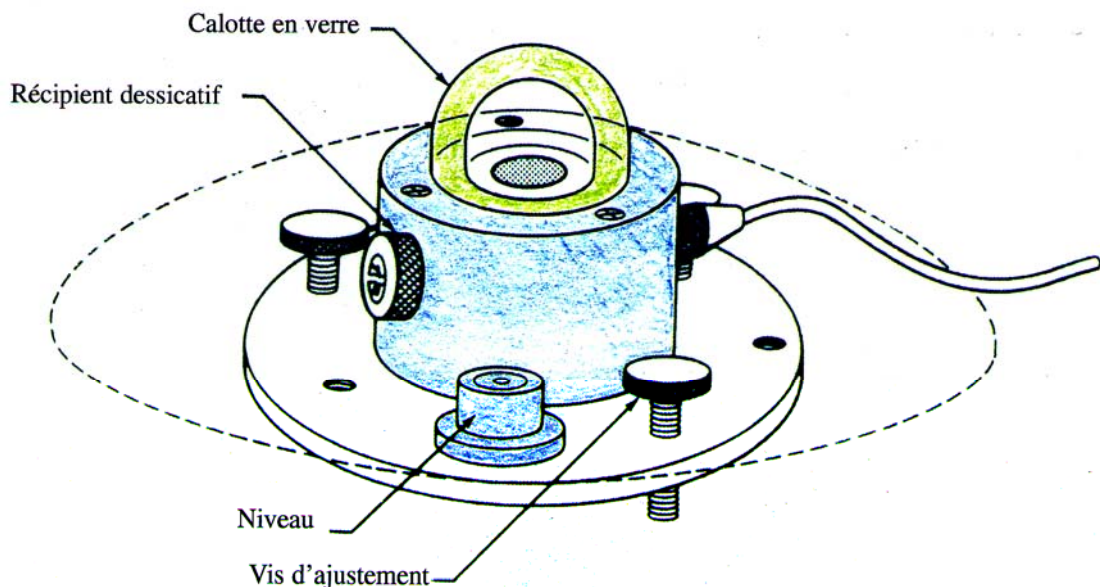


Figure 48 **Croquis d'un pyranomètre (14)**

Entre la température due à la lumière solaire absorbée et celle de l'environnement, il y a une différence de température ΔT qui est proportionnelle à l'énergie absorbée.

1.11.3. Le Pyréliomètre : Mesure de l'Irradiation Solaire Directe

C'est un instrument pour mesurer l'irradiation directe. Cet appareil est doté, par rapport au rayonnement solaire, d'une surface normale de réception et d'un angle du champ de vision réduit ($<12^\circ$).

$$I = S / \cos\theta = S / \sin H$$

Angle du champs de vision : réduit	<12°
Bande :	onde courte
Etendue :	0.2 – 3.0µm

L'énergie arrive au pyréliomètre par un tube venant d'un disque solaire et d'un anneau concentrique. La version la plus utilisée est le pyréliomètre à disque d'argent, qui comprend, comme son nom l'indique, un disque d'argent noirci, placé à la face inférieure d'un tube, avec un diaphragme limitant l'angle d'ouverture. La température est mesurée à intervalles régulier (Figure 49).

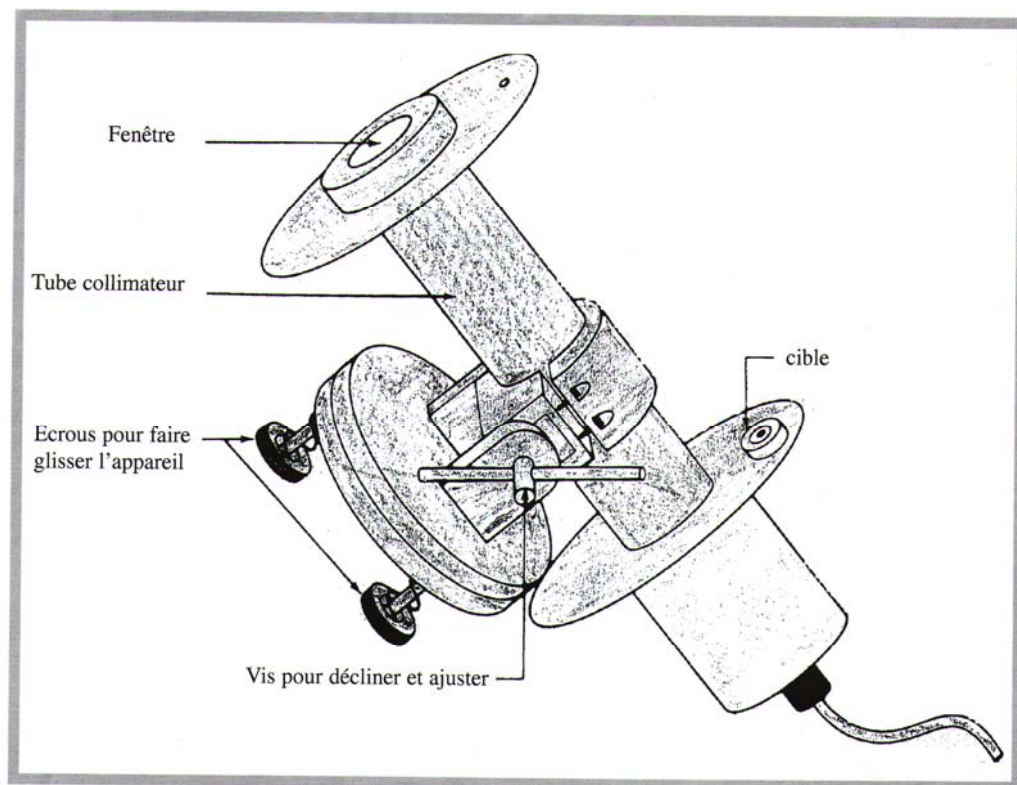


Figure 49: croquis d'un pyréliomètre (14)

1.11.4. Pyranomètre Spécial pour Mesurer l'Irradiation Diffuse

Le rayonnement diffus est mesuré par un pyranomètre équipé d'un écran servant à occulter le rayonnement direct. La figure 50 représente le croquis d'un tel dispositif.

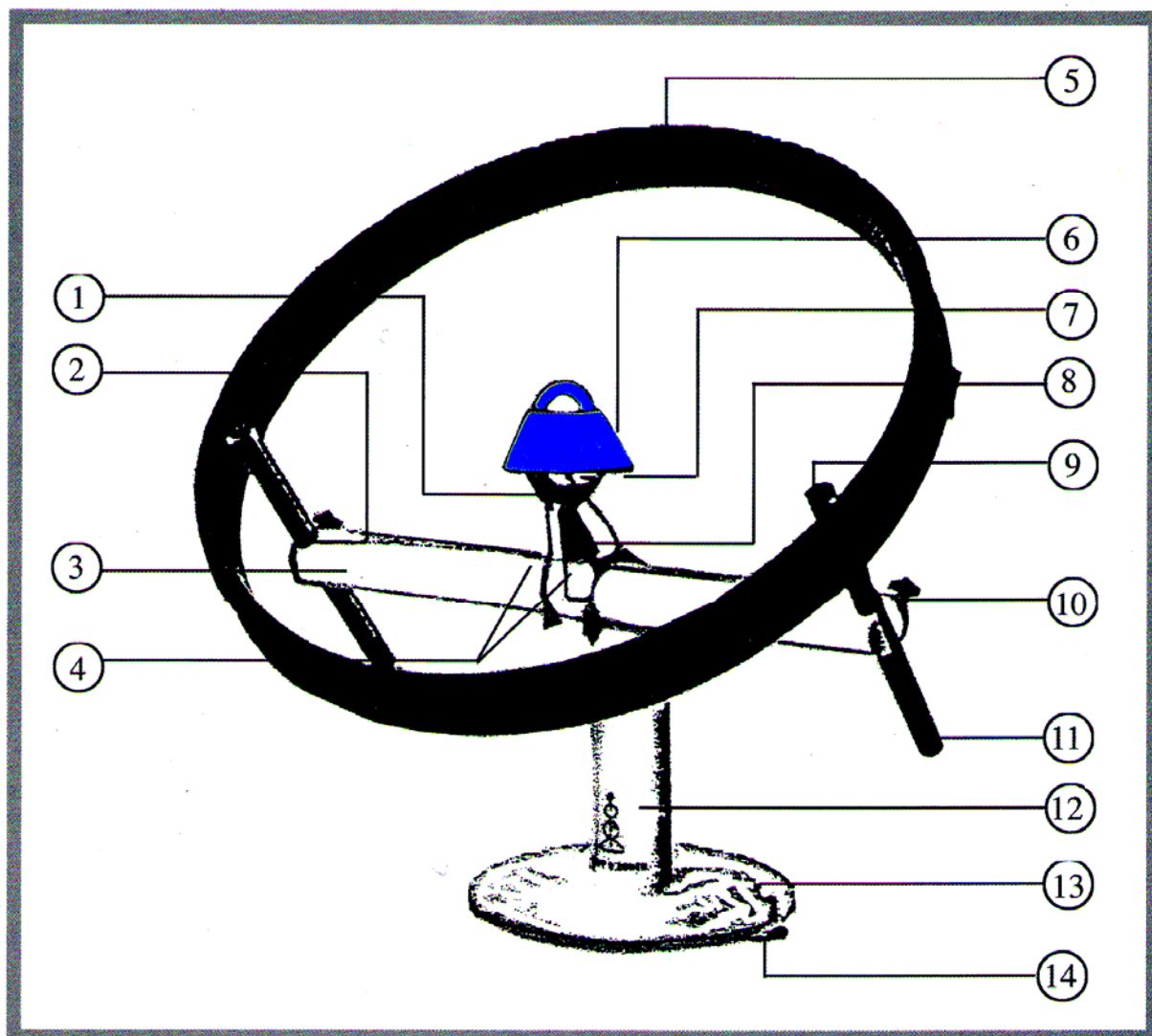


Figure 50 pyranomètre équipé d'un dispositif spécial pour mesurer l'irradiation diffuse. (15)

- | | | |
|------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| (1) Boîtier | (6) pyranomètre | (11) levier de réglage |
| (2) échelle en mm | (7) balance de nivellement | (12) support |
| (3) poutrelle transversale | (8) porte-pyranomètre | (13) pied |
| (4) boulon de sécurité | (9) cheville | (14) vis de nivellement |
| (5) anneau servant d'ombrage | (10) vis de fixation | |

Les méthodes de discrétisation :

B.1 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis permet de résoudre de manière discrète une EDP dont on cherche une solution approchée suffisamment fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction u , définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

La méthode des éléments finis présente les avantages suivants :

- Traitement possible de géométries complexes.
- Détermination plus naturelle des conditions aux limites.
- Possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs.

Mais également quelques inconvénients dont :

- Complexité de mise en œuvre.
- Coût en temps de calcul et en mémoire.

Quelques formules d'approximation des dérivées partielles par des différences finies pour les dérivées partielles premières :

- Différences divisées progressives

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta y}$$

- Différences divisées régressives

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{\Delta y}$$

- Différences divisées centrées

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2 \times \Delta x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2 \times \Delta y}$$

B.2 Méthode des différences finies

Elle consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans le problème continu par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage.

La méthode des différences finies présente des avantages à savoir, une grande simplicité d'écriture, et un faible coût de calcul, et quelques inconvénients tels que une limitation de la géométrie des domaines de calcul, des difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue ainsi que l'absence de résultats de majorations d'erreurs.

Nous donnons dans ce qui suit quelques formules d'approximation des dérivées par des différences finies pour la dérivée première :

Différence divisée progressive d'ordre un

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_{i+1} - u_i}{h}$$

Différence divisée progressive d'ordre deux

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{-u_{i+2} + 4 \times u_{i+1} - 3 \times u_i}{2 \times h}$$

Différence divisée régressive d'ordre un

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_i - u_{i-1}}{h}$$

Différence divisée régressive d'ordre deux

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{3 \times u_i - 4 \times u_{i-1} + u_{i-2}}{2 \times h}$$

Différence divisée centrée

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{h}$$

Avec :

$$h = x_{i+1} - x_{i-1}$$

Les nombres adimensionnels :

C.1 Nombre de Nusselt

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

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

$$Nu = \frac{h_c \times L}{\lambda_f} \quad (B.1)$$

h_c : Coefficient de convection thermique.

L : Longueur caractéristique.

λ_f : Coefficient de conductivité thermique du fluide.

C.2 Nombre de Grashoff

Ce nombre caractérise la transmission de la chaleur en convection naturelle, il exprime le rapport entre les forces de viscosité et les forces ascensionnelles créées dans le fluide par les différences de température qui y règnent.

$$Gr = \frac{\beta \times \rho^2 \times g \times L^3 \times \Delta T}{\mu^2}$$

β : Le coefficient de dilatation thermique rapporté à la température moyenne du fluide

($\beta = 1/T$ pour un fluide parfait).

g : L'accélération de la chute libre.

L : Une dimension caractéristique.

C.3 Nombre de Prandlt

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

$$Pr = \frac{\mu \times Cp}{\lambda_f} = \frac{\nu}{a}$$

C_p : Chaleur spécifique à pression constante.

λ_f : Conductivité thermique du fluide.

a : Diffusivité thermique.

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

C.4 Nombre de Reynolds

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

$$Re = \frac{\rho \times v \times L}{\mu} = \frac{v \times L}{\nu}$$

v : Vitesse caractéristique du fluide.

L : Dimension linéaire caractéristique du corps.

μ : Viscosité dynamique.

ν : Viscosité cinématique.

ρ : Densité du fluide.

C.5. Nombre de Peclet

Il exprime le rapport des flux thermiques par convection et par conduction dans un échange de chaleur convectif. Ce nombre intervient surtout dans les problèmes d'écoulements faibles nombre de Prandtl: c'est-à-dire les métaux liquides.

$$Pe = Re \times Pr = \frac{v \times L}{a}$$

C.6 Nombre de Rayleigh

Il exprime la relation entre les nombres de Grashoff et de Prandlt. Ce nombre peut fournir un critère de passage de la convection naturelle laminaire à la convection naturelle turbulente.

$$Ra = Gr \times Pr$$

C.7 Nombre de Graetz

$$Gr = Re \times Pr \times \left(\frac{D}{L}\right)$$

L et D sont des dimensions caractéristiques du conduit.

C.8 Nombre de Stanton ou Margoulis

Il exprime le rapport entre les flux thermiques total et par convection dans un échange de chaleur convectif.

$$St = \frac{Nu}{Re \times Pr} = \frac{q}{\rho \times Cp \times v \times L^2 \times \Delta T}$$

1. Caractéristique thermo physique de l'eau:

Dans ce paragraphe, nous avons exprimé les caractéristiques thermo physiques de l'eau en fonction de la température exprimée en °C.

1.1. Conductivité thermique (W/M.°C):

$$\lambda=0.569+0.185\times 10^{-2}\times T-0.749\times 10^{-5}\times T^2$$

1.2. Capacité calorifique Cp (j/Kg.°C):

$$C_p=4216.664-3.165\times T+0.886\times 10^{-1}\times T^2-0.101\times 10^{-2}\times T^3+0.445\times 10^{-5}\times T^4$$

1.3. Coefficient de dilatation volumique β [1/°K]:

$$\beta=(-0.884+0.188\times T-0.26\times 10^{-2}\times T^2+0.252\times 10^{-4}\times T^3-0.975\times 10^{-7}\times T^4)\times 10^{-4}$$

1.4. Chaleur latente de vaporisation Lv [KJ/Kg]:

Une valeur empirique donne avec très bonne approximation la valeur de la chaleur latente de vaporisation pour $0^\circ < T < 200^\circ\text{C}$:

$$L_v=2500.8-2.48\times T$$

Formule que l'on peut arrondir avec une erreur négligeable de façon à la rendre plus facilement:

$$L_v=500-2.5\times T$$

On peut aussi utiliser la formule suivante

$$L_v=4185\times (597-0.56\times T)$$

1.5. Viscosité dynamique μ [Kg/M.h]:

$$\mu=5.449-0.1067\times T+7.325\times 10^{-4}\times T^2$$

1.6. Viscosité cinématique ν [M²/S]:

$$\nu = \begin{cases} -3.65 \times T + 1.788 \times 10^{-6} \text{ pour } T \hat{=} [0, 20]^\circ\text{C} \\ -1.725 \times (T - 20) + 1.006 \times 10^{-6} \text{ pour } T \hat{=} [20, 40]^\circ\text{C} \\ -0.875 \times (T - 40) + 0.568 \times 10^{-6} \text{ pour } T \hat{=} [40, 60]^\circ\text{C} \\ -0.587 \times (T - 60) + 0.478 \times 10^{-6} \text{ pour } T \hat{=} [60, 80]^\circ\text{C} \end{cases}$$

ملخص :

هذه الدراسة تركز على النمذجة الرياضية لمكثف شمسي من نوع أسطواناني مكافئ، ثم إقام تقييم حراري على الماء وعلى أنبوب الامتصاص، والزجاج المغلف على التوالي، ونظام المعادلات التي تحصل عليها تم حلها من خلال طريقة الفروق المحدودة، ويتم الحصول على النتائج ليوم نموذجي، إن التباين في درجة حرارة الماء، وأنبوب الامتصاص والزجاج المغلف وكذلك تطور قوات الخسائر الحرارية والأداء الحراري للمكثف وتأثير المعلمات (الهندسية و البصرية) على النموذج.

كلمات البحث : المركزات الشمسية – الطاقة الشمسية – أسطواناني مكافئ – التركيز الشمسي.

Summary:

This study focuses on the mathematical modelling of solar concentrator type “parabolic trough plant” a thermal balance was established respectively on the coolant on the absorber tube and the glass envelope, the system of equations obtained is solved by the method of finite differences results are obtained for a typical day, the variation of the temperature of the coolant, the absorber tube and the glass envelope and the evolution of the power of the heat loss and efficiency of the concentrator and the influence of parameters (geometrical and optical) on the prototype.

Keywords: solar concentrators, solar, parabolic through plant, concentration.

Résumé

Cette étude porte sur la modélisation mathématique d'un concentrateur solaire de type Cylindro-parabolique, un bilan thermique a été établi respectivement sur le fluide caloporteur sur le tube absorbeur et sur l'enveloppe en verre, le system d'équations obtenu est résolu par la méthode des différences finies. On obtient les résultats pour une journée typique, la variation de la température du fluide caloporteur, du tube absorbeur et de l'enveloppe en verre .ainsi que l'évolution des puissances, des pertes thermiques, le rendement du concentrateur et l'influence des paramètres (optiques) sur le prototype.

Mots clés : concentrateurs solaire, énergies solaire, Cylindro-parabolique, concentration