

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAÏD DE TLEMEN  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



UNITE DE RECHERCHE MATERIAUX  
ET ENERGIES RENOUVELABLES (URMER)

Spécialité :

Physique des Matériaux, Systèmes et Energies Renouvelables

Par

M.SIDIYAKOUB Ahmed Amin

Sur le Thème

**Conception et Modélisation d'un four solaire multifibres  
sphérique et cylindrique**

Soutenue publiquement le 24 juin 2015, devant le Jury composé de :

**Président :**

**Directeur de Mémoire**

**Examineurs :**

**Pr A.OULD-ABBES**

**Dr C.ZIDANI**

**Pr K.RAHMOUN**

**Dr M.BOUCHAOUR**

**(Univ. Tlemcen)**

**(Univ. Tlemcen)**

**(Univ. Tlemcen)**

**(Univ. Tlemcen)**

## Remerciements

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à notre Dieu pour nous avoir donné l'esprit et les moyens pour arriver à ce stade de connaissance, nous prions pour que nous restions fidèles à lui.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Encadreur de mémoire Madame Chafika ZIDANI Maitre de Conférence à l'Université de Tlemcen. Je la remercie pour l'effort qu'elle a fourni, les conseils prodigués, sa patience et sa persévérance dans le suivi.

Je remercie sincèrement madame Amaria OULD-ABBES Professeur à l'Université de Tlemcen d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

J'exprime ma gratitude et mes sincères remerciements à madame Khadija RAHMOUN Professeur à l'université de Tlemcen et à madame Mama BOUCHAOUR Maitre de Conférence aussi à l'Université de Tlemcen d'avoir acceptés d'examiner le jury de ce mémoire.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».

Enfin j'adresse mes vives reconnaissances à tous les membres de l'Unité de Recherche « *Matériaux et Energies Renouvelables* » (URMER).

Merci à tous...

# SOMMAIRE



## INTRODUCTION GENERALE

<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>Problématique</b> .....	3
<b>Organisation du Travail</b> .....	4
<b>Références Bibliographiques</b> .....	5



## CHAPITRE I RAYONNEMENT SOLAIRE

<b>I.1. Introduction</b> .....	7
<b>I.2. le rayonnement solaire</b> .....	8
I.2.1.Rayonnement solaire hors atmosphère.....	8
I.2.2.Mouvement de translation .....	9
I.2.2.1.Le rayonnement direct .....	10
I.2.2.2.Le rayonnement diffus .....	10
I.2.2.3.Le rayonnement réfléchi.....	11
I.2.2.4.Le rayonnement globale.....	11
<b>I.3. Concentration du rayonnement</b> .....	11
I.3.1.Valeur limite de la concentration .....	11
I.3.2. Concentration maximale théorique .....	12
I.3.3. Concentration optimale.....	13
<b>I.4. Energie solaire</b> .....	14
I.4.1. Puissance instantanée.....	15
I.4.2. Estimation de l'énergie journalière .....	16
I.4.3. Estimation de l'énergie annuelle .....	17
I.4.4. Durée du jour et durée d'insolation .....	17
<b>I.5.Conclusion</b> .....	17
<b>RéférencesBibliographiques</b> .....	18



## CHAPITRE II LES ELEMENTS ESSENTIELS DU SYSTEME PHOTOTHERMIQUE

<b>II.1. Introduction</b> .....	20
<b>II.2. Capteur solaire</b> .....	20

II.2.1. Capteur photovoltaïque.....	21
II.2.2. Capteur photothermique.....	22
II.2.2.1. Orientation d'un capteur PT solaire.....	22
II.2.2.2. Capteur photothermiques plans .....	23
II.2.2.2.1. Couverture transparente.....	24
II.2.2.2.2. Isolation .....	27
II.2.2.2.3. Intérêt des surfaces sélectives.....	28
II.2.2.2.4. Principe de fonctionnement d'un capteur plan.....	31
II.2.2.3. Application possible de l'énergie solaire thermique .....	31
II.2.2.3.1. Chauffage des piscines.....	32
II.2.2.3.2. Eau chaude sanitaire par voie solaire.....	32
II.2.2.3.3. Chauffage solaire des habitations.....	33
II.2.2.3.4. Distillation solaire.....	34
II.2.2.3.5. Réfrigération solaire.....	34
II.2.2.3.6. Four solaire.....	35
II.2.2.3.7. Centrales solaires thermodynamiques.....	35
<b>II.3. Les concentrateurs solaires.....</b>	<b>37</b>
II.3.1. Dispositifs de la concentration du rayonnement solaire.....	37
II.3.2. Système à collecteurs distribués.....	37
II.3.2.1. Concentrateur cylindro-parabolique.....	37
II.3.2.2. Concentrateur parabolique.....	39
<b>II.4. Fibres optiques.....</b>	<b>41</b>
II.4.1. Fibres optiques en PMMA.....	42
II.4.2. Fibres optiques en Silice .....	42
II.4.3. Composantes de base de fibre optique.....	43
II.4.3.4. Filaments conducteurs.....	43
II.4.3.4. Structure des fibres optiques.....	43
II.4.3.4. Matériaux pour fibres optiques.....	43
II.4.3.4. Propriétés de fibre optique.....	44
<b>II.5. Four solaire .....</b>	<b>44</b>
II.5.1. Historique .....	44
II.5.2. Définition générale.....	45
II.5.2.2. Les fours solaires à concentration.....	45
II.5.2.3. Les fours solaires à effet de serre.....	45
II.5.3. fonctionnement et caractéristique d'un four solaire.....	47
II.5.3.1. Four solaire de type « boîte ».....	47
II.5.3.2. Four solaire parabolique Al sol 1.4 .....	49
II.5.3.3. Four solaire à panneaux .....	50
<b>II.6. Conclusion.....</b>	<b>51</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>52</b>




---

**CHAPITRE III**  
**MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME**  
**DU TESC PAR FIBRE OPTIQUE**

---

<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>55</b>
---------------------------------	-----------

<b>III.2. L'énergie solaire</b> .....	56
III.2.1. Estimation de la puissance instantanée .....	56
III.2.2. Estimation de l'énergie journalière .....	58
III.2.3. Estimation de l'énergie annuelle .....	58
III.2.4. Durée du jour et durée d'insolation.....	58
III.2.5. Dispositif proposé .....	59
<b>III.3. Modélisation du TESC par fibres optiques</b> .....	63
III.3.1. Description du système du TESC par un câble à fibre optique .....	66
III.3.1.1. Résultats du dispositif proposé.....	67
III.3.2. Description du système du TESC par une fibre optique .....	70
III.3.2.1. Résultats du dispositif proposé .....	71
<b>III.4. LE FOUR SOLAIRE SPHERIQUE ET CYLINDRIQUE</b> .....	75
III.4.1. Modélisation d'un four solaire sphérique alimenté par fibre optique	
III.4.1.1. Dispositif proposé.....	75
III.4.1.2. Bilan énergétique .....	77
III.4.1.3. Limites thermiques d'un four solaire sphérique alimenté par fibre	
optique .....	78
III.4.2. Modélisation d'un four solaire cylindrique alimenté par fibre optique .....	81
III.4.2.1. Dispositif proposé .....	81
III.4.2.2. Limites thermique d'un four solaire cylindrique alimenté par fibre	
optique .....	83
<b>III.5. Conclusion</b> .....	88
<b>Références Bibliographiques</b> .....	89



## CONCLUSION GENERALE

<b>Conclusion Générale</b> .....	91
<b>Perspectives</b> .....	93
<b>Résume</b> .....	94

**INTRODUCTION**

**GENERALE**

# Introduction générale

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique [1].

La limitation de la quantité de ces réserves, la crise successive du pétrole en 1973 et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement. La filière nucléaire était déjà lancée, mais son choix à grande échelle peut amener des conséquences graves, surtout à l'environnement, à cause de la pollution et aussi les accidents nucléaires [2].

Les chercheurs ont développé une autre forme d'énergie dite « *énergie renouvelable* ».

Les énergies renouvelables s'opposent aux énergies non renouvelables (fossiles ou nucléaires). Mais la disponibilité de ceux-ci, l'énergie infiniment renouvelable a du sens seulement sur une échelle humaine. D'autre part, si la partie des combustibles fossiles consommés a servi en fait, le reste est d'habitude écarté avec la pollution de notre environnement. Quant aux formes différentes d'énergie, certains conviennent mieux que d'autres dans un but particulier. La conversion réciproque entre les formes d'énergie semble inévitable ainsi, bien que souvent la production soit insuffisante. On a proposé beaucoup de systèmes énergétiques comme les solutions idéales des problèmes de nos sociétés industrielles, parmi eux nous comptons la photo thermie.

Hors atmosphère, l'énergie solaire moyenne reçue par la terre est d'environ 5,5 kWh/m<sup>2</sup> par jour. A travers l'atmosphère et suite à l'altération par des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de spectre : 35 % réfléchis, 18 % absorbés et seuls 47% arrivent au sol.

L'Algérie avec sa situation géographique, occupe une position privilégiée dans l'exploitation d'énergie solaire avec une durée d'ensoleillement qui varie de 2650 heures /an dans le nord à 3500 heures/an dans le sud, l'une des plus élevées au monde, notre pays peut couvrir certains de ses besoins en énergie par les systèmes photosolaires. Ces derniers sont particulièrement simples, leur installation, leur utilisation, leur entretien et leur maintenance sont

relativement faciles. Par ailleurs, ces systèmes sont particulièrement bien adaptés à la production d'énergie et à la fourniture de services de base en sites isolés. [MONS 96].

L'énergie solaire peut être captée et transformée directement en énergie électrique (*Conversion photovoltaïque*) ou en énergie thermique (*Conversion photothermique*). Cette dernière constitue un domaine d'application plus important et plus large par rapport au premier.

Nous traiterons dans le cadre de ce travail, la deuxième voie de conversion (photothermie).

Les pays en développement travaillent sur l'élaboration des systèmes photothermiques afin d'améliorer la vitesse de ces systèmes et de réduire le coût de la vie et des dettes de la population géographiquement dispersée.

L'utilisation de l'énergie solaire à des fins industrielles nécessite des températures élevées et donc la concentration du rayonnement.

Les fours solaires sont des systèmes photothermiques qui permettent d'atteindre quelques milliers de degrés. Ils présentent, en effet, un certain nombre d'inconvénients qui les rendent peu commodes et difficilement adaptables à une utilisation industrielle :

-Les fortes concentrations sont obtenues avec des réflecteurs à symétrie axiale, miroirs sphériques ou mieux paraboliques.

-Le faisceau réfléchi forme un cône de lumière, l'ouverture du dispositif récepteur doit être suffisante pour accepter ce cône. Les pertes thermiques sont alors importantes.

-Enfin, le récepteur doit suivre la course du soleil en même temps que le concentrateur, si ce dernier est mobile (système Thek) [CARI 84]. D'autre part si l'on veut que cet ensemble soit fixe, il faut une réflexion supplémentaire sur un ensemble de miroirs plans jouant le rôle d'héliostats (systèmes à double réflexion utilisés dans les ensembles de fortes puissances).

Toutes ces raisons font qu'il est difficile d'utiliser directement, à des fins industrielles, l'énergie solaire dans la zone de forte concentration. On est amené à la transférer une fois concentrée jusqu'au dispositif d'utilisation alors non rattaché au concentrateur [YUGA 99].



## **Objectifs spécifiques du présent travail. Problématique**

Vers cet objectif d'optimisation nous avons entrepris un travail de Conception et de Modélisation d'un four solaire multifibres sphérique et cylindrique pour le site de TLEMCEN, et prédire les performances en fonction de l'ensoleillement.

L'intérêt de notre travail porte d'une part, sur les notions de transfert thermique de la chaleur qui ont pris ces dernières années une importance particulière en raison du coût élevé de l'énergie et des impératifs d'économie qui en résulte, d'où la nécessité de s'initier aux transferts thermiques.

L'énergie solaire est concentrée sur l'ensemble de transfert du rayonnement solaire dans une manière spéciale et facile à atteindre la haute performance en matière d'énergie, il est nécessaire d'exploiter et transporter cette énergie intensive à des fins industrielles en vue d'une amélioration de l'efficacité thermique.

À travers la bibliographie, nous avons constaté l'existence d'un large éventail de travaux sur ce sujet aussi bien expérimentaux, analytiques que numériques. Néanmoins, les hypothèses et les simplifications adoptées dans le problème limitent généralement l'étude à de cas très particuliers dans la plupart des travaux analytiques et numériques.

Le travail effectué dans ce mémoire contribue le remplissage du manque évident qui se trouve dans cette zone. Pour cela, nous avons développé le concept de l'utilisation de l'énergie solaire concentrée et son transfert par fibre optique, dans un sens plus large est d'exploiter cette idée dans la réalisation de fours solaires (sphérique et cylindrique).

Les principaux objectifs de ce travail peuvent être résumés dans les points suivants:

- 1) Détailler tous les paramètres affectant le système photosolaire.
- 2) Estimer les énergies solaires, et ce pour avoir une bonne conception du système de four solaire proposé.
- 3) Vérifier les résultats numériques avec des conditions d'exploitation semblables à celles données par certains dans la littérature empirique sur ce sujet.

## **Organisation du travail**

Cette étude comporte trois chapitres :

- Dans le premier chapitre nous développons les concepts influençant l'énergie photothermique, tels que le rayonnement solaire, sa concentration et les modèles adaptés pour l'estimation de l'énergie solaire.
- Dans le deuxième chapitre nous présentons les éléments essentiels utilisés pour le fonctionnement de notre conception de four solaire. Nous abordons les fibres optiques solaires, les concentrateurs solaires et d'une manière générale les fours solaires.
- Le troisième chapitre traite de la modélisation des différentes parties du système photothermique, telles que l'énergie solaire incidente, concentrée et transportée. L'analyse devient nettement plus riche qu'une simple analyse énergétique. Cette modélisation est nécessaire pour établir une relation directe entre l'énergie produite par ce système et la température fournie par le four solaire proposé. Nous permettons aussi faire l'estimation des propriétés d'adaptation du système à chaque période de l'année. Nous prévoyons les caractéristiques de chaque partie du système en fonction des données météorologiques. Les effets de paramètres tels que le choix des éléments adaptables et convenables, la géométrie et la conception du système, sont discutés dans ce chapitre, et cela nous permet d'obtenir des rendements de conversion satisfaisant.
- Enfin, une synthèse des principaux résultats obtenus est présentée dans la conclusion générale ainsi que des perspectives qui se dégagent logiquement de ce travail.

## Références Bibliographiques

[CARI 85] Cariou JM., Dugas J., Martin L., «*Theoretical limits of optical Fibre solar furnaces*», Solar Energy, Vol. 34, (1985), PP. 329-339.

[MONS 96] Moncef Y., «*Modélisation et Simulation des Systèmes Complexes*», (1996), Technique et Documentation, édition Lavoisier.

[YUGA 99] Yugami H., Yano M., Naito H., Flamant G., «*Concentration of fiber transmitted solar energy by CPC for solar thermal utilization*», journal de physique IV, Vol.9, (1999), pp. 545-549.

## Webographie

[1] Laboratoires de Systèmes Energétiques, [www.fifel.ch/includes/asp](http://www.fifel.ch/includes/asp), (2001).

[2] S-H. Wei, S. Chen and X.G. Gong, Phys. Rev B 75, 205209 (2007).

# **CHAPITRE I**

## **LE RAYONNEMENT SOLAIRE**

# Chapitre I

## Le Rayonnement solaire

### I.1. Introduction

Le rayonnement solaire constitue une source d'énergie gratuite et non polluante, que nous proposons de valoriser au niveau local grâce à diverses technologies et l'utilisation de ce rayonnement solaire permet de la production de nouvelles ressources d'énergie est l'une des préoccupations majeures de la recherche scientifique des énergies renouvelables, à l'heure actuelle. Dans ce contexte, la conversion de l'énergie solaire en énergie Photothermique (PT) trouve particulièrement un ressort remarquable dans divers domaines intéressants tels que : la thermoélectricité, la magnéto-électro-dynamique, la thermomécanique ou encore la thermochimie. [ZIDA 13]

En effet, le recours à des systèmes photothermiques adéquats représente un remède considérable pour concilier les exigences des secteurs de l'énergétique, de l'industrie et de l'environnement c'est pour sa l'extraction de l'énergie thermique optimale à partir de l'énergie solaire par un système PT idéal s'avère un défi majeur pour la communauté scientifique et technologique. En fait, plusieurs paramètres pouvant influencer l'énergie captée par un système photothermique doivent être maîtrisés au préalable tel que : le mouvement terre soleil, la position du soleil par rapport à la terre, l'orientation du capteur PT solaire, la situation géographique, l'effet de masque, les conditions atmosphériques.

## I.2. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est le rapport de chaleur au sein du système climatique (99,9%), le reste provient de l'énergie géothermique, La composition du soleil à égal 74% d'hydrogène et 24% d'hélium (L'hydrogène est converti en hélium lors de la fusion thermonucléaire qui est à l'origine du rayonnement), il a situé à environ 150 000 000 km de la Terre, il produit  $3.86 \times 10^{26}$  W ou j/s soit l'équivalent de l'explosion de  $91.5 \times 10^{15}$  tonnes de TNT.

Le rayonnement solaire est la lumière qui provient du soleil sous forme d'onde électromagnétique dont 98% d'énergie est comprise entre  $\lambda = 0.25 \mu\text{m}$  et  $\lambda = 4 \mu\text{m}$ , le reste représente 1% au - dessus et 1% au-dessous de cet intervalle [BERN 82] (Voir figure I.1).

Le rayonnement solaire est représenté par la lumière visible (LV :  $0.4 \mu\text{m} \rightarrow 0.8 \mu\text{m}$ ) et de la lumière invisible [(UV :  $0.25 \mu\text{m} \rightarrow 0.4 \mu\text{m}$ ) et (IR :  $0.8 \mu\text{m} \rightarrow 4 \mu\text{m}$ )].

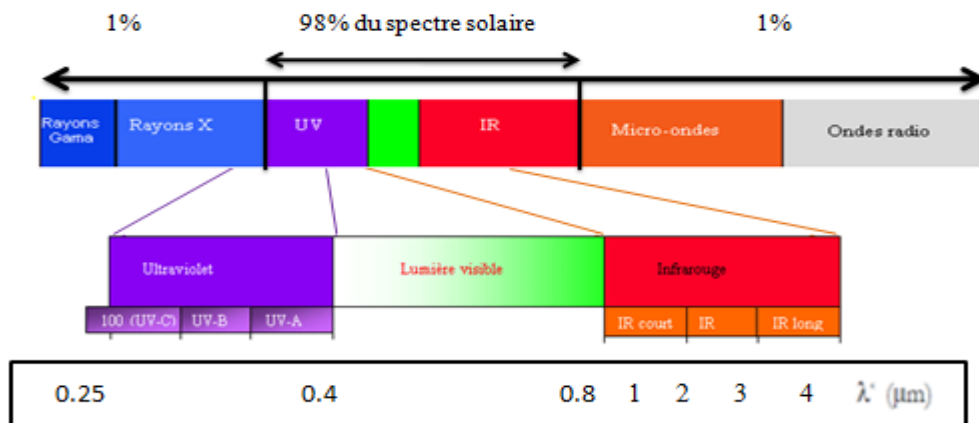


Figure I.1 : rayonnement solaire

L'analyse du spectre du rayonnement solaire montre une ressemblance avec celui d'un corps noir de même surface et porté à une température de 5777 K dans l'intervalle du spectre [ $0.25 \mu\text{m} \rightarrow 4 \mu\text{m}$ ].

L'énergie rayonnée par le soleil n'est pas uniformément répartie sur toutes les longueurs d'ondes, elle passe par un maximum pour une longueur d'onde donnée  $\lambda'_m$  par la loi de Wien :

$$\lambda'_m T = 2898 \mu\text{m K} \text{ pour } T = 5777 \text{ K et } \lambda'_m = 0.5 \mu\text{m}. \text{ [ZIDA 13]}$$

### I.2.1. Rayonnement solaire hors atmosphère

Le soleil est considéré comme un corps noir de rayon  $r = R_S$  porté à la température  $T = T_S$ .

La puissance du soleil rayonnée par unité de surface et par unité de temps est donnée par la loi de Stephan :

$$W_S = \sigma T_S^4 \quad (\text{I.1})$$

La puissance rayonnée par toute la surface du soleil est donnée par:

$$P_S = \sigma T_S^4 4\pi R_S^2 \quad (\text{I.2})$$

En supposant que la terre soit démunie d'atmosphère et qu'il n'y a aucune absorption dans l'univers, une surface d'un m<sup>2</sup> placée perpendiculairement au rayonnement solaire reçoit une puissance :

$$W_T = \frac{\sigma T_S^4 4\pi R_S^2}{4\pi D_{TS}^2} = \frac{\sigma T_S^4 R_S^2}{D_{TS}^2} \quad (\text{I.3})$$

Pour une distance annuelle Terre – Soleil ( $D_{TS}$ ) moyenne:  $W_T = 1366.12 \text{ W/m}^2 \text{ s}$ . **[BRIC 84]**.

On appelle constante solaire ( $I_0 = W_T$ ), l'énergie reçue du soleil par unité de surface placée perpendiculairement aux rayons lumineux dans l'espace au voisinage de la terre, à la distance d'une unité astronomique (1 U.A.=1.495 108 km) du soleil.

Les mesures récentes ont donné une valeur de  $I_0 = (1367 \pm 7) \text{ W/m}^2$  au lieu de  $I_0 = (1353 \pm 21) \text{ W/m}^2$  adopté en 1971.

L'intensité  $I$  reçue par une surface placée perpendiculairement aux rayons solaires hors atmosphère varie quotidiennement selon la relation suivante :

$$I = 1367 \left( 1 + 0.034 \cos \left[ \frac{360}{356} (N - 2) \right] \right) \quad (\text{I.4})$$

Lors des fortes activités solaires, caractérisées par l'apparition des tâches solaires et des éruptions chromosphériques, les rayonnements émis par le soleil peuvent s'écarter notablement de leurs valeurs habituelles. Ces variations apparaissent sensibles surtout pour les rayonnements de très courtes longueurs d'ondes.

Le maximum est obtenu au mois de janvier avec la valeur  $1413 \text{ W/m}^2$ , le minimum au début de juillet avec la valeur  $1320 \text{ W/m}^2$ .

### I.2.2. Mouvement de translation

Le rayonnement extraterrestre arrivant à la surface de l'atmosphère terrestre rencontre dans son passage des phénomènes d'absorption et de diffusion qui contribuent à son affaiblissement. On distingue **[BERN 82]**:

- L'absorption par les gaz de l'atmosphère et la vapeur d'eau.
- La diffusion moléculaire par les gaz, par la vapeur d'eau et par les aérosols.
- La masse atmosphérique, la hauteur d'eau condensable et le facteur de trouble sont les principaux facteurs représentatifs de ces phénomènes:

- Masse atmosphérique  $m$  : c'est l'épaisseur d'air traversée par les rayons solaires avant de parvenir au capteur. A une altitude  $Z$  en km et une pression  $p$  en Mb, le nombre de masse d'air (AM) est donné par :

$$m = \frac{P}{P_0} \frac{1}{\sin h} \exp\left(\frac{-Z}{7,8}\right) \quad (\text{I.5})$$

La formule simplifiée est donnée par :

$$m = \frac{1}{\sin h} (1 - 0,1 Z) \quad (\text{I.6})$$

Au sol et au niveau de la mer ( $Z=0$ ), pour une pression  $p_0=1013$  mb et pour un soleil au Zénith, on a  $m=1$  : le rayonnement reçu est alors noté par **AM1**.

- Hauteur d'eau condensable  $w$  : c'est l'épaisseur d'eau liquide obtenue au sol en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère dans une colonne de surface unité à la verticale du lieu. Elle est donnée par  $w = 0,17 e$  [BRIC 84]:

Avec  $e$  = tension de vapeur d'eau au sol.

- Facteur de trouble  $T_L$  : appelé aussi facteur de trouble de Linke, il caractérise tous les phénomènes d'absorption et de diffusion atmosphérique. Il est donné par [CAPD 86]:

$$T_L = 2,5 + 16 \beta_A + 0,5 \log (w) \quad (\text{I.7})$$

$\beta_A$  est le facteur de trouble d'Angstrom, dépendant de l'état de visibilité du ciel.

Au niveau du sol l'ensoleillement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

### I.2.2.1. Le rayonnement direct

Est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil et celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol. Le pyréliomètre mesure l'intensité du rayonnement direct. Le pyréliomètre doit être muni d'un dispositif chargé de l'orienter en permanence vers le Soleil.

### I.2.2.2. Le rayonnement diffus

C'est l'éclairement énergétique provenant de toute la voûte céleste et un part qui diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.



### I.2.2.3. Le rayonnement réfléchi

C'est le rayonnement émis par la surface terrestre sous forme réfléchi ou diffuse. Il dépend directement de la nature du sol. Etant de l'ordre de  $15\text{W}/\text{m}^2$  à Tlemcen, il est donc négligeable pour les systèmes photothermiques sauf pour le fort albédo du sol (neige) et au facteur de trouble atmosphérique élevé (vent de sable).

### I.2.2.4. Le rayonnement global

Est égal à la superposition des trois composantes directe, diffuse et réfléchi : c'est l'éclairement énergétique d'une surface inclinée. Cet éclairement peut éventuellement être influencé par la nébulosité du ciel (fraction de la voûte céleste occultée par les nuages), l'indice de sérénité de l'atmosphère (rapport du rayonnement au sol sur le rayonnement hors atmosphère) et par les effets de masque. [\[ZIDA 13\]](#)

## I.3. Concentration du rayonnement

L'utilisation directe du rayonnement solaire est intéressante pour les usages domestiques puisqu'elle conduit à des températures égales à une centaine de degrés Celsius. Pour disposer localement des températures plus élevées, il faut que la densité de puissance soit plus grande. Il est donc indispensable de concentrer le rayonnement, c'est à dire de faire parvenir sur un élément de surface  $d_s$  une densité de puissance  $D_s$  supérieure à  $D_i$  (densité de puissance incidente sur une surface perpendiculaire aux rayons) qui arrive naturellement. Nous définissons alors la concentration par la relation suivante [\[CHAS 84\]](#):

$$C = \frac{D_s}{D_i} \quad (\text{I.8})$$

### I.3.1. Valeur limite de la concentration

La concentration se fait sans apport de travail extérieur ; d'après la thermodynamique la température  $T_\tau$  atteinte sur la surface réceptrice ne peut pas être supérieure à celle de la surface du soleil. Il existe donc une valeur maximale  $C_{max}$  de la concentration, pour laquelle  $T_\tau = T_s$ . La concentration du rayonnement se fait nécessairement par voie optique. Les règles d'invariance photométriques montrent qu'on ne peut réaliser qu'une concentration optimale  $C_{opt}$  telle que :  $C_{opt} < C_{max}$  (l'égalité correspond aux processus réversibles de la thermodynamique, l'inégalité traduit l'irréversibilité).

Dans ce qui suit, nous montrons comment obtenir les valeurs de la concentration maximale  $C_{max}$  par la thermodynamique et de la concentration optimale  $C_{opt}$  par les lois de l'optique. [ZIDA 13].

### I.3.2. Concentration maximale théorique

L'égalité des températures de la source (le soleil) et du récepteur est obtenue lorsque les hypothèses suivantes sont simultanément réalisées :

- ✓ La source et le récepteur sont assimilés à des corps noirs.
- ✓ La source, le concentrateur (quelconque) et le récepteur constituent un système isolé sur lequel les échanges d'énergie s'opèrent uniquement par rayonnement.

Hors atmosphère, une surface disposée perpendiculairement aux rayons solaires reçoit une densité de puissance uniforme  $D_h = 1367 \text{ W.m}^{-2}$ . Cette valeur standard est appelée « constante solaire » [CHAS 84].

En éliminant les perturbations dues à l'atmosphère (absorption du gaz, état météorologique, pollution...), on aura  $D_i = D_h$  ; Tous les éléments de ce système, à l'exception du récepteur et de la source, sont parfaitement transparents ou réfléchissants ; donc il n'y a pas de perte de puissance.

Dans ces conditions, l'équilibre thermique dans une surface  $S$  du récepteur à la température  $T_r$  est atteint quand la puissance perdue  $P_p$  du rayonnement qu'elle émet est égale à la puissance  $P_c$  du rayonnement qu'elle reçoit, qui représente la puissance captée par le concentrateur provenant directement du soleil. La loi de Stéphan, s'écrit :

$$P_p = \sigma T_r^4 S \quad (\text{I.9})$$

La puissance émise par le soleil  $P_{sol}$  est :

$$P_{sol} = \sigma T_s^4 S_{sol} \quad (\text{I.10})$$

Tel que  $S_{sol} = 4 \pi R_{\epsilon 0}^2$  est la surface du soleil. Cette puissance est émise dans l'angle solide de  $4\pi$ .

Le concentrateur de surface  $S_c$  reçoit une fraction de cette puissance égale à  $\Omega/4\pi$ , avec :

$$\Omega = S_c D_{ts}^2 \quad (\text{I.11})$$

$D_{ts}$  : est la distance terre soleil. Donc la puissance reçue est :

$$P_c = \sigma T_s^4 S_c R_{\epsilon 0}^2 / D^2 \quad (\text{I.12})$$

En remarquant que  $\frac{R^2 \varepsilon_0}{D^2} = \varepsilon_0^2$  et en écrivant les densités de puissance sur le récepteur  $D_s$  et sur le concentrateur  $D_c$ , il vient que :

$$C = \frac{T_r^4}{T_s^4} \frac{1}{\varepsilon_0^2} \quad (\text{I.13})$$

Quand  $T_r = T_s$ , la concentration est maximale :

$$C_{max} = \frac{1}{\varepsilon_0^2} \quad (\text{I.14})$$

En remplaçant  $\varepsilon_0$  par sa valeur numérique, on trouve :

$$C_{max} = 46200 \quad (\text{I.15})$$

La densité de puissance maximale sur le récepteur, s'écrit  $D_s = C_{max} \cdot D_h$ , sa valeur est 63,3 MW. m<sup>-2</sup> ; elle représente aussi la densité de puissance sur la surface du soleil. [ZIDA 13].

Le calcul de la concentration maximale que nous venons de développer, suppose un « soleil uniforme » correspondant, comme nous venons de le voir à une température moyenne de 5780 K. Nous savons que cette hypothèse est fautive. Dans sa partie centrale, le soleil est plus brillant qu'en moyenne, la température thermodynamique associée est donc plus élevée. Il est donc possible d'accroître la densité de puissance sur le récepteur à la condition de perdre volontairement du rayonnement provenant du « bord du soleil » [CHAS 84].

### I.3.3. Concentration optimale

L'étendue optique du faisceau doit être conservée à la traversée du concentrateur. «Le soleil est une source de brillance uniforme» posée par hypothèse, il est vu sous l'angle  $2S_0$  depuis tous les points de la face d'entrée  $S_c$  du concentrateur. Le rayonnement intercepté par ce dernier passera dans une surface S en faisant avec sa normale un angle  $\theta$  inférieur à une valeur limite  $\theta_0$  (cas de la face d'entrée d'un conducteur optique). L'étendue optique du faisceau de la face d'entrée du concentrateur est donnée par la relation suivante [CARI 84]:

$$S_c 2\pi (1 - \cos \varepsilon_0) \approx \pi S_c \varepsilon_0^2 \quad (\text{I.16})$$

Dans le cas réel où on cherche à optimiser la concentration, posons les hypothèses suivantes:

- La surface S est très petite devant la surface  $S_c$ ;
- Le système possède un axe de révolution perpendiculaire à  $S_c$  et S passant par leur centre.

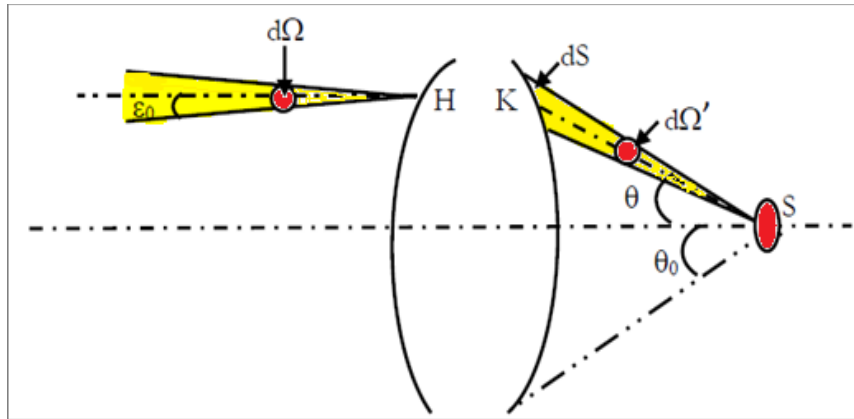


Figure I.1: Principe de concentration

Dans ces conditions, tous les points de S reçoivent un faisceau de lumière conique.

L'étendue de faisceau élémentaire délimitée entre les angles  $\theta$  et  $\theta + d\theta$  s'écrit :

$$d\xi = S \cos \theta 2\pi \sin \theta d\theta \quad (\text{I.17})$$

L'étendue optique du faisceau intercepté par S s'obtient en intégrant l'équation (I.17) entre les valeurs 0 et  $\theta_0$ . En appliquant la relation qui traduit le principe de conservation de l'étendue optique du faisceau :

$$n S d\Omega = n' S' d\Omega \quad (\text{I.18})$$

On obtient :  $\varepsilon_0^2 = s \sin^2 \theta_0$  si  $n = n' = 1$ , correspondant au cas étudié. En choisissant le cas idéal (absence d'absorption), la puissance est conservée et le facteur de concentration se réduit au rapport des surfaces S et  $S_c$ : c'est le facteur de concentration optimal correspondant à l'angle  $\theta_0$  :

$$C_{opt} = \frac{\sin^2 \theta_0}{\varepsilon_0^2} = C_{max} \cdot \sin^2 \theta_0 \quad (\text{I.19})$$

Pour une ouverture  $\theta_0 = \Pi/2$ , La concentration optimale prend la valeur  $C_{max}$ . Nous serons amenés à utiliser des systèmes concentrateurs dont l'ouverture est limitée à celle du conducteur optique. Cependant, il devient possible de trouver dans un four solaire idéal, à symétrie sphérique, la densité de puissance uniforme correspondant à la concentration maximale [CARI 84].

#### I.4. L'énergie solaire

Le rayonnement global reçu par un capteur  $(\alpha, \gamma)$  est composé en générale de deux rayonnements (si on néglige le rayonnement rétrodiffusé par le sol) : directs et diffus. Ces rayonnements varient aléatoirement en fonction de la hauteur du soleil, de l'orientation du champ photothermique, des intempéries et de l'état de visibilité de l'atmosphère [MENN 12].

S'inspirant des méthodes empiriques de Perrin De Brichambaut et des formules approchées de Kasten nous établissons un modèle d'estimation des énergies reçues par un capteur d'orientation quelconque [ZIDA 03].

#### I.4.1. Puissance instantanée

##### I.4.1.1. Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair)

Pour un ciel clair, les puissances des rayonnements Directe ( $E_S$ ), diffus ( $E_D$ ) et global ( $E_G$ ) reçu par un capteur ( $\alpha, \gamma$ ) incliné  $\beta$  ce qui concerne le plan horizontal sont donnés par les relations suivantes :

- **Modèle simplifié :**

$$\bullet \begin{cases} E_S = A_1 \cos(i) e^{\frac{-1}{A_2 \sin(h+2)}} \\ E_D = \left(\frac{1+\cos(\beta)}{2}\right) D_H + \left(\frac{1-\cos(\beta)}{2}\right) a^* G_H \\ E_G = E_S + E_D \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} D_H = B_1 (\sin(h))^{0,4} \\ G_H = B_2 (\sin(h))^C \end{cases} \quad (I.20)$$

- $[E_S] = [E_D] = [E_G] = \text{W/m}^2$

$D_H$  : Eclaircissement diffus reçus par une surface horizontale ( $\text{W/m}^2$ ).

$G_H$  : Eclaircissement global reçus par une surface horizontale ( $\text{W/m}^2$ ).

$a^*$  : étant l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol).

$$a^* \begin{cases} 0,2 \text{ à } 0,4 \text{ verdure} \\ 0,4 \text{ à } 0,8 \text{ sol clair} \\ 0,8 \text{ à } 0,9 \text{ Neige} \end{cases}$$

$A_1, A_2, B_1, B_2, C$ , sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère

Etat de l'atmosphère	A1	A2	B1	B2	C
Ciel bleu foncé	1300	6	87	1150	1,15
Ciel bleu clair	1230	4	125	1080	1,22
Ciel bleu laiteux	1200	2,5	187	990	1,25

Tableau I.1 : Constantes caractérisant l'état du ciel

- **Modèle précis :**

A partir des résultats de mesures météorologiques disponibles pour un site [couleur du ciel ( $\beta_A$ ), hauteur d'eau condensable ( $w_c$ ), à tension de vapeur d'eau ( $e$ ), à visibilité au sol ( $v$ )...],

on peut déterminer le facteur de trouble de Linke ( $T_L$ ) qui caractérise l'extinction du rayonnement solaire à travers l'atmosphère [BRIC 84]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_A = 0,04 \text{ pour un ciel bleu foncé} \\ \beta_A = 0,08 \text{ pour un ciel bleu clair} \\ \beta_A = 0,12 \text{ pour un ciel bleu laiteux} \\ T_L = 2,5 + 16 \beta_A + 0,5 \log(w_c) \text{ avec } w_c(\text{cm}) \\ T_L \text{ facteur de trouble de Linke : } T_L = 1,6 + 16 \beta_A + 0,5 \log(e) \text{ avec } e(\text{g/cm}^2) \\ T_L = -2,4 + 24/\log(v) \text{ avec } v(\text{km}) \end{array} \right.$$

L'air masse  $m = (1 - 0,1Z)/\sin(h)$

avec :  $Z$  : Altitude du site (km)

$$\left\{ \begin{array}{l} E_S = I_0 \cos(i) e^{\frac{-m T_L}{0,9m+0,94}} \\ E_D = I_0 \sqrt{\sin h} (T_L - 0,5 - \sqrt{\sin h})/25 \\ E_G = E_S + E_D \text{ avec } I_0 = 1367 \text{ W/m}^2 \end{array} \right. \quad (\text{I.21})$$

#### I.4.1.2. Estimation d'énergie instantanée (ciel couvert)

Le ciel est des cieux gris couverts complètement remplis des couches de nuage continues, plus ou moins denses optiquement et par lequel il n'est pas possible de distinguer le disque solaire. Sous ces conditions la radiation directe est non-existante et la radiation totale se compose radiation seulement diffuse.

Si la couverture de nuage est homogène nous pouvons estimer que la radiation de ciel diffuse est isotrope aussi bien que radiation diffuse de la terre. La radiation totale couverte est alors définie par [BRIC 84]:

$$E'_G = E'_D = K E_D (1 + 0,3 \sin h) \quad (\text{I.22})$$

$K$  est un coefficient qui dépend de l'état du ciel d'un site (avant d'être couvert par les nuages)

$K = 0,6$  pour le ciel bleu foncé,

$K = 0,3$  pour le ciel bleu clair,

$K = 0,15$  pour le ciel bleu laiteux.

#### I.4.2. Estimation de l'énergie journalière

En utilisant les outils mathématiques d'intégration des formules de  $E_S$ ,  $E_D$ ,  $E_G$  sur toute la durée d'ensoleillement ( $D_j$ ), l'énergie journalière reçue par un capteur ( $\alpha, \gamma$ ) est :

$$E_{jS} = \int_{H_{L'}}^{H_{C'}} E_S dH E_{jD} = \int_{H_{L'}}^{H_{C'}} E_D dH E_{jG} = \int_{H_{L'}}^{H_{C'}} E_G dH \quad (\text{I.23})$$

L'intégration tout au long du jour ne fournit pas la bonne valeur parce qu'il est difficile de correctement évaluer le temps.

Pour un capteur d'orientation quelconque, l'énergie journalière ( $E_{jS}$ =directe,  $E_{jD}$ =diffuse et  $E_{jG}$ =globale) reçue dépend du nombre d'heures d'ensoleillement  $D_j$  qu'on ne peut prévoir. Pour l'estimation, nous avons entrepris une méthode numérique qui donne de bons résultats par ciel clair [KLEI 76]:

$$E_{jS} = \frac{1}{n} D'_j \sum_n E_s \quad E_{jD} = \frac{1}{n} D'_j \sum_n E_D \quad E_{jG} = \frac{1}{n} D'_j \sum_n E_G \quad (I.24)$$

Avec : n : Nombre d'itérations

On appelle fraction d'insolation  $K_{IS}$  le rapport de la durée d'insolation sur la durée du jour : ( $K_{IS} = D_{IS}/D_j$ ) et par ciel partiellement couvert, on multiplie ces valeurs par  $K_{IS}$  (ou  $K_{IS}$  moyen du mois).

### I.4.3. Estimation de l'énergie annuelle

L'énergie annuelle reçue pour un capteur d'orientation quelconque est déterminée par le programme de simulation en faisant la somme des énergies journalières. [ZIDA 13].

$$E_{as} = \sum_i^N E_{jS} \quad E_{aD} = \sum_i^N E_{jD} \quad E_{aG} = \sum_i^N E_{jG} \quad \text{avec } N = 365(\text{ou } 366) \quad (I.25)$$

### I.4.4. Durée du jour et durée d'insolation

- **Durée du jour** : La durée du jour ( $D_j$ ) est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil, elle est définie par la relation :

$$D_j = \frac{H_c - H_L}{15} = \frac{2}{15} \text{Arccos } T \quad \text{avec } T = -\tan \delta \tan \varphi \quad (I.26)$$

- **Durée d'insolation** : La durée d'insolation ( $D_{IS}$ ) est la durée effective d'ensoleillement d'un capteur mesurée par un héliographe et définie à partir d'un seuil minimum ( $\approx 250 \text{ W/m}^2$ ).

Pour Tlemcen nous l'avons modélisé par [KLEI 76]:

$$D_{IS} = D_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{c}{4(M-B)^2} \quad (I.27)$$

## I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts du rayonnement solaire et sa concentration.

Il nous a été nécessaire de présenter un modèle pour l'estimation des énergies incidentes, concentrées, tout cela pour une bonne conception du système PT.

## Références bibliographiques

- [BERN 82] Bernard R., Menguy G., Schwartz M., « Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique Et Applications », Technique et Documentation, Lavoisier, (1982), France, pp. 215.
- [BRIC 84] De Brichambaut P., « *Evaluation énergétique d'un gisement solaire* », (1984), Tech et Doc.
- [CAPD 86] Capderou M., « *Atlas Solaire De l'Algérie* », (1986), EPAU, Tome I, II, III.
- [CARI 84] Cariou J.M., « *Apport De Conducteurs De Lumière Dans L'utilisation De L'énergie Solaire Concentrée* », thèse de Doctorat, (1984), Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [CHAS 84] Chasseriau J.M., « *Conversion Thermique du Rayonnement Solaire* », Edition. Dunod, (1984), France, pp. 99-113 et pp. 217-240.
- [MENN 12] Menni Y., « *Etude Numérique Comparative Entre Deux Types de Chicane Et Ailettes (Trapézoïdale et Triangulaire) Utilisées Pour Améliorer les Performances des Capteurs Solaires Plans à Air* ». Thèse de Magister, Juin 2012.
- [KLEI 76] Klein S. A., « *Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces* », Solar Energy, Vol. 19, (1976), pp. 325 – 329.
- [ZIDA 13] Zidani C., Benyoucef B., « *Conception et modélisation des systèmes photothermiques. Applications aux systèmes photothermiques alimentés par fibres optiques* », thèse de Doctorat, (2013), Université de TLEMCEM.



# **CHAPITRE II**

## **ELEMENTS ESSENTIELS**

### **DU SYSTEME PHOTOTHERMIQUE**

# Chapitre II

## Eléments essentiels du système photothermique

### II.1. Introduction

La conversion de l'énergie solaire en chaleur thermique à moyenne et à haute température est obtenue par des techniques différentes en fonction des besoins.

La conversion à moyenne et à haute température a recours à une technologie plus élaborée, par l'idée d'une concentration du rayonnement solaire pour augmenter l'intensité du flux solaire. Les capteurs plus élaborés sont appelés concentrateurs solaires.

L'utilisation croissante de l'énergie solaire concentrée a nécessité le développement de nouvelles techniques pour atteindre des températures de quelques milliers de degrés et qui peuvent résoudre quelques problèmes d'industrie, parmi ces techniques, notons les fours solaires. Leur utilisation en industrie a été limitée par quelques inconvénients tels que l'utilisation des réflecteurs à symétrie axiale, adaptation de l'ouverture du dispositif, récepteur au cône fermé par la réflexion de la lumière, déplacement du concentrateur et du récepteur suivant le soleil, alors que l'utilisation des fibres optiques a remédié ces insuffisances de façon remarquable.

Dans ce chapitre nous présentons les éléments essentiels du capteur solaire et aussi les concentrateurs solaires, ainsi que les notions de base sur les fibres optiques en particulier celles qui sont conçues pour le transport de l'énergie solaire concentrée. Enfin nous abordons les nouvelles applications sur les fours solaires.

### II.2. Capteur solaire

Le capteur solaire est une composante de base pour la plupart des équipements solaires. Le capteur solaire est un dispositif destiné à absorber des rayons du soleil pour les convertir en énergie solaire.

Pour optimiser sa position, le capteur solaire est généralement conçu dans une forme plate, d'une surface moyenne de 1 m<sup>2</sup>.

## Il existe deux types de capteurs solaires

- Le capteur solaire thermique qui absorbe le flux solaire pour le convertir en énergie thermique et le transférer à un fluide caloporteur (air, eau). Dans le capteur solaire thermique « à eau », l'eau circule dans des tubes. Dans le capteur solaire thermique « à air », c'est de l'air qui circule et qui s'échauffe au contact des absorbeurs.
- Le capteur solaire photovoltaïque (appelé aussi PV), reçoit l'énergie solaire pour la convertir en énergie électrique.

Il existe d'autres types de capteurs solaires :

- Leader dans un secteur encore en pleine expansion, CLIPSOL est le premier constructeur français de matériel solaire thermique et photovoltaïque. CLIPSOL propose une gamme complète de capteurs solaires parfaitement adaptés à tous les besoins de chauffage et d'électricité.

Parmi les produits phares de CLIPSOL, il y a lieu de mentionner, les chauffe-eaux solaires en kit (pour l'habitat individuel) et les planchers solaires directs pour le chauffage solaire. Le capteur solaire CLIPSOL TGD permet de réaliser des surfaces absorbantes montées sur châssis ou intégrées en toiture.

- Le capteur solaire TGD nouvelle génération, se décline dans une version thermique (TGD-Th) et dans une version photovoltaïque (TGD-Pv). Ce nouveau capteur solaire présente la particularité de pouvoir former un champ unique et continu entre surface thermique et surface photovoltaïque. [1]

### II.2.1. Capteur photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. L'effet photovoltaïque (PV) utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité et de transporter dans un matériau semi-conducteur, des charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et de type p. Lorsque la première partie est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p devient chargée négativement. Il crée donc un champ électrique entre eux qui a tendance à pousser les électrons dans la zone n et les trous dans la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Quand la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale à

ou plus grande que la largeur de bande interdite leur énergie aux atomes, chacun passant un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et quitte aussi un trou capable de mouvement, ayant pour résultat une paire d'électron-trou. Si une charge est placée à travers la cellule, les électrons de Zone rejoignent les trous dans la région p de la connexion extérieure, en causant une différence potentielle : un courant électrique coule. L'effet repose ainsi sur la base, sur les propriétés de semi-conducteur de la matière et de son dopage pour améliorer la conductivité. [BENA 11]

## II.2.2. Capteur photothermique solaire

L'élément principal du système photothermique est le capteur solaire dont les fonctions sont d'absorber le maximum de rayonnement solaire et de transférer cette énergie soit par un fluide caloporteur soit par des conducteurs de lumière.

Les capteurs solaires se subdivisent en deux types principaux :

- Capteurs solaires plans
- Capteurs solaires à concentration.

### II.2.2.1. Orientation d'un capteur PT solaire

Un capteur quelconque est défini par deux angles, la hauteur du capteur et l'azimut du capteur, notés respectivement  $(\alpha, \gamma)$ .

#### A/ $\gamma$ : Hauteur du capteur

C'est l'angle que fait la normale du capteur et sa projection sur le plan horizontal.

$$\gamma \text{ varie entre } -90^\circ \text{ et } +90^\circ : \begin{cases} \gamma > 0 & \text{plan tourné vers le haut} \\ \gamma < 0 & \text{plan tourné vers le bas} \\ \gamma = +90^\circ & \text{plan horizontal tourné vers le haut} \\ \gamma = 0 & \text{plan vertical} \end{cases}$$

#### B/ $\alpha$ : l'azimut du capteur

C'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

$$\alpha \text{ varie entre } -180^\circ \text{ et } +180^\circ : \begin{cases} \alpha > 0 & \text{vers l'ouest} \\ \alpha < 0 & \text{vers l'est} \\ \alpha = 0 & \text{plan sud} \\ \alpha = -90^\circ & \text{plan est orienté vers l'est} \\ \alpha = \pm 180^\circ & \text{plan nord orienté vers le nord} \\ \alpha = +90^\circ & \text{plan ouest orienté vers l'ouest} \end{cases}$$

L'inclinaison  $\beta$  du capteur par rapport au plan horizontal est donnée par :

$$\beta = 90^\circ - \gamma$$

L'énergie reçue par un capteur dépend de son orientation et de son angle d'incidence  $i$ .

Parmi les capteurs recevant une énergie instantanée, journalière et annuelle élevée, on trouve :

- Le capteur TEL : est un capteur orienté face au sud (hémisphère Nord), il est incliné d'un angle  $\beta = \varphi$  par rapport à l'horizontale. Ses coordonnées sont :

$\alpha=0$ ,  $\gamma=90-\varphi$  et  $i=0$  uniquement aux équinoxes et à 12h TSV.

- Le capteur 1 axe : est un capteur qui suit le soleil en azimut et généralement il est incliné d'un angle  $\beta=\varphi$  par rapport à l'horizontale ses coordonnées sont :

$\alpha = a$ ,  $\gamma=90-\varphi$  et  $i=0$  uniquement aux équinoxes.

- Le capteur 2 axes : est un capteur qui suit le soleil en site et en azimut, il est perpendiculaire aux rayons solaires à chaque instant de la journée. Ces coordonnées sont :  $\alpha = a$ ,  $\gamma = h$  et  $i = 0$ .

### II.2.2.2. Capteurs photothermiques plans

Dans le fonctionnement de ces capteurs, nous retrouvons trois fonctions :

- Absorption du rayonnement solaire
- Transformation de cette énergie en chaleur
- Transmission de cette chaleur au fluide caloporteur

Un capteur plan est constitué d'une plaque noircie, généralement en métal, recouverte d'une ou plusieurs vitres ou de feuilles de plastique transparentes.

Les radiations solaires qui traversent le vitrage sont absorbées par le métal noirci qui réémet l'énergie sous forme de radiations de grande longueur d'onde. Comme ces radiations ne peuvent pas traverser la vitre, la température de la plaque noircie s'élève.

On fait passer un fluide caloporteur (air ou eau) sur celle-ci (plaque), où il se réchauffe, et, tant que le soleil brille, la température du fluide quittant le collecteur est maintenue [SACA 00].

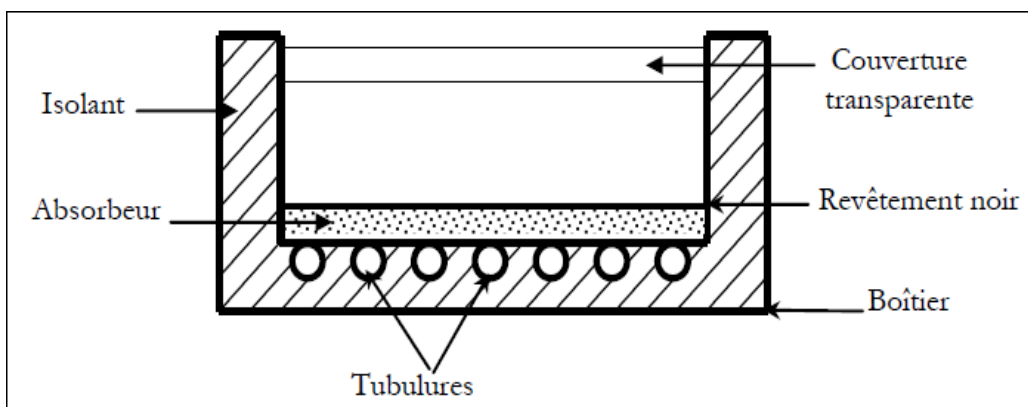


Figure II.1 : Coupe longitudinale d'un capteur solaire plan

Nous décrivons brièvement les principaux matériaux utilisés actuellement pour capter, véhiculer ou retenir la chaleur solaire, en suivant le cheminement de l'énergie, depuis la couverture transparente du capteur jusqu'au stock [BERN 83].

#### II.2.2.2.1. Couverture transparente

Bien que pour certains capteurs destinés à fonctionner à basse température (par exemple le chauffage des piscines) on puisse faire l'économie d'une couverture, la plupart du temps c'est un bon investissement de recouvrir l'absorbeur d'une ou deux plaques transparentes qui retiennent les radiations infrarouges émises par celui-ci tout en laissant passer le maximum de rayonnement solaire. Actuellement on utilise les trois matériaux rigides suivants :

a) **Le verre** : Ce type de couverture laisse passer entre 84 et 92% du rayonnement solaire sous une incidence normale, pour une lame de verre de 3mm d'épaisseur. La transmission du verre au rayonnement solaire dépend de la teneur de ce matériau en oxyde de fer ( $Fe_2O_3$ ), qui absorbe éventuellement les rayonnements de grandes longueurs d'onde de la lumière solaire, et colore en vert la tranche des vitres.

Les expériences montrent que c'est pour des faibles quantités en  $Fe_2O_3$  qu'on espère obtenir de bonnes valeurs de transmission de l'ordre de 2%. Les couvertures en verre présentent quelques inconvénients :

- Fragiles aux chocs mécaniques et thermiques.
- Une forte inertie thermique en comparaison avec le polycarbonate, en raison de leur masse volumique.

b) **Les polycarbonates** : Sont des dérivés de matières plastiques à double et à triple lames très fines, reliées entre elles par une multitude de parois pour former des cavités alvéolaires, ces dernières réduisent le mouvement de l'air incarcéré dans cet espace, et permettent de minimiser les pertes thermiques vers l'avant. C'est le cas de matériaux comme le méthacrylate et le tedlar. Les inconvénients du verre sont sa fragilité, son poids et son prix élevé en double vitrage. L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés, avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres. Les pertes par transmission peuvent également être éliminées en plaçant l'absorbeur sous vide, ce qui permet d'obtenir un rendement élevé même à hautes températures. Ce type de capteur est d'ailleurs surtout utilisé pour certaines applications demandant des températures plus élevées du fluide caloporteur (jusqu'à 15 °C). Outre les plaques rigides que l'on vient de mentionner, des films minces ont été également employés comme couvertures de capteurs :

- Le polytéraphthalate d'éthyle (ou terphane, ou mylar)
- Le fluorure de polyvinyle

- Le polyester renforcé de fibres de verre
- Le polyéthylène de basse densité

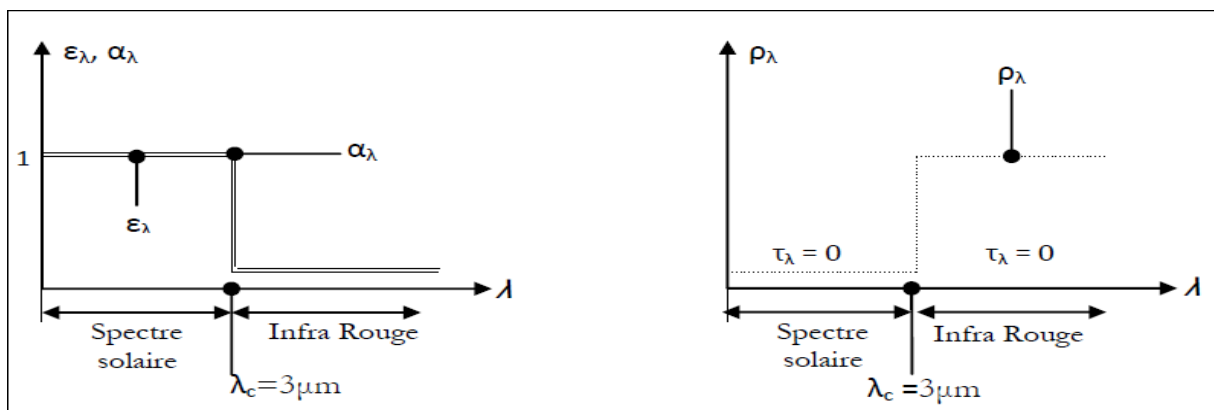
### c) Absorbteurs

Ils transforment le rayonnement reçu en chaleur et échange celle-ci avec le fluide caloporteur. L'absorbteur est l'élément principal dans le fonctionnement d'un capteur plan. Trois fonctions lui régissent:

- Absorber le rayonnement solaire,
- Le transformer en chaleur,
- Transmettre cette chaleur au fluide caloporteur.

La surface captatrice idéale du rayonnement solaire devrait absorber toute l'énergie correspondant au spectre solaire, c'est à dire pour  $\lambda < 3\mu\text{m}$ , et émettre faiblement dans l'infrarouge lointain ( $\lambda > 3\mu\text{m}$ ) correspondant au spectre du rayonnement réémis par l'absorbteur dont la température se situe entre 50 et 100°C pour les capteurs plans par exemple [BENY 04].

Il est évident que la recherche de telles surfaces présente surtout de l'intérêt pour les surfaces captatrices à haute température (concentrateurs) car la loi de réémission de l'énergie est proportionnelle à  $T^4$ . Dans des conditions normales de fonctionnement, la surface idéale devra donc posséder les valeurs suivantes portées sur la figure II.2 pour ses facteurs monochromatiques d'absorption  $\alpha_\lambda$ , d'émission  $\epsilon_\lambda$ , de réflexion  $\rho_\lambda$  et de transmission  $\tau_\lambda$ ;  $\lambda_c$  est la longueur d'onde critique.



**Figure II.2: Facteurs monochromatiques d'absorption  $\alpha_\lambda$ , d'émission  $\epsilon_\lambda$ , de réflexion  $\rho_\lambda$  et de transmission  $\tau_\lambda$  pour une surface idéale.**

De nombreuses recherches sont en cours de développement et concernent de telles surfaces. Elles sont fondées sur le traitement de surface des métaux, généralement par dépôt de multicouches judicieusement choisies. Nous présentons, à titre indicatif le tableau suivant, sur lequel sont portées les valeurs du coefficient d'absorption et le coefficient d'émission. Nous remarquons que l'on est encore assez loin de la courbe idéale présentée sur la figure II.2.

Dans la pratique le rapport  $\frac{\alpha_s}{\varepsilon}$  : ( $\alpha_s$ : facteur total d'absorption relatif au spectre solaire) atteint généralement une valeur voisine de 10. Il reste à réduire le coût des matériaux sélectifs, important du fait de la complexité de leur élaboration, et à tester la fiabilité des systèmes obtenus [BELA 00].

Support de traitement	$\alpha$	$\varepsilon$
Acier et Nickel noir sur Nickel	0.95	0.07
Acier et chrome noir sur nickel	0.97	0.09
Acier et chrome noir	0.91	0.07
Cuivre et chrome noir	0.95	0.14
Acier galvanisé et chrome noir	0.95	0.16
Cuivre et cuivre noir	0.88	0.15
Acier et oxyde de fer	0.85	0.08
Aluminium et oxyde de manganèse	0.7	0.08
Acier et couche organique sur chrome noir	0.94	0.2
Peinture noir époxy	0.95	0.18
Peinture blanche époxy	0.25	0.91

**Tableau II.1: Le coefficient d'absorption et le coefficient d'émission donnés pour les supports les plus utilisés comme absorbeur**

Pour absorber au maximum l'énergie rayonnée du soleil, il suffit d'une surface plane placée de façon judicieuse (étude de l'inclinaison et de l'orientation); cette surface doit être dotée du coefficient d'absorption de la couche superficielle la plus élevée possible.

Les meilleurs coefficients sont de l'ordre de 0,95. Seules les couleurs foncées permettent d'obtenir des valeurs aussi élevées, l'idéal étant le noir évidemment. Par ailleurs, il vaut mieux que cet aspect noir a été obtenu par un traitement (chimique ou autre) plutôt que par une couche de peinture (celle-ci étant toujours plus ou moins isolante).

Pour limiter les pertes par réémission de rayonnement infrarouge, il importe que l'absorbeur possède aussi la propriété d'émissivité superficielle la plus faible possible (valeur inférieure à 0,15). Dans ce cas, l'absorbeur sera qualifié de sélectif.

Après transformation du rayonnement en chaleur sur la face superficielle exposée, il y a lieu de transmettre cette chaleur le plus possible au fluide. Pour ce faire, il importe que la plaque soit métallique car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur.

Le Cuivre: Le meilleur mais aussi le plus coûteux avec un coefficient de conduction de l'ordre de 300.

L'acier: déjà très employé par les chauffagistes. En fait de nombreux capteurs utilisent comme absorbeur des radiateurs extra plats de chauffage central.

L'aluminium: dont la conductibilité et la légèreté sont appréciables mais qui, de ces trois métaux, semble le plus vulnérable à la corrosion.



Plus le coefficient de conduction est faible et plus la plaque doit être épaisse, ce qui augmente le prix, le poids et l'inertie de l'absorbeur. Un tel dispositif représente donc un véritable piège au rayonnement solaire, qui peut être amélioré en munissant le capteur d'une double couverture.

#### II.2.2.2.2. Isolation

L'isolation joue un rôle très important dans les applications thermiques de l'énergie solaire, pour limiter les pertes par conduction et convection vers le milieu environnant, au niveau des côtés et en bas du capteur. L'isolant doit être opaque aux rayonnements de grandes longueurs d'onde, dans le domaine de l'infrarouge émis par la plaque rayonnante (absorbeur). Un bon isolant doit avoir les qualités suivantes :

- Une faible conductivité thermique
- Une faible densité (pour une faible inertie thermique)
- La chaleur massique doit être basse

On distingue trois types d'isolants:

##### a) Isolants minéraux

- La pierre ponce, est une roche volcanique qui s'est solidifiée en enfermant de nombreuses bulles d'air.

- La laine de verre constituée de fibres de verre très fines, commercialisée sous de nombreuses formes : en plaques, en rouleaux et enrobée dans du plâtre. Sa conductivité varie entre  $0,034 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  à  $0^\circ\text{C}$  et  $0,053 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  à  $200^\circ\text{C}$ . La laine de verre est un matériau efficace, mais désagréable à manipuler en raison des fibres qui s'échappent. Elle doit être gardée au sec, sous peine de perdre ses propriétés isolantes.

- La vermiculite connue aussi sous le nom de mica, dont la conductibilité varie de  $0,12$  à  $0,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  et qui se présente sous forme de granulés très légers.

Ces trois isolants minéraux sont de nature incombustible et non dégradables par la chaleur.

##### b) Isolants d'origine végétale

-Le bois bien sec, sa conductibilité varie entre  $0,13$  et  $0,40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , ses qualités isolantes peuvent être améliorées, s'il est sous forme de fibres agglomérées (conductivité de  $0$  à  $0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

-La sciure de bois (conductivité  $0,11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), qui a deux inconvénients : Son inflammabilité et sa conductibilité qui ont tendance à augmenter avec la chaleur, ce qui la rend inadéquate pour la calorifugation.

##### c) Isolants organiques

Ils ont la propriété d'être insensibles à l'humidité, cependant ils dégagent des gaz toxiques en cas d'incendie.

L'absorbeur doit transmettre l'énergie qu'il capte au fluide caloporteur en évitant les pertes (conduction, convection, rayonnement) des différentes parties périphériques vers l'extérieur, les solutions adoptées sont les suivantes:

Partie avant de l'absorbeur : La lame d'air d'épaisseur  $e'$  située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission par conductibilité; mais si  $e'$  est trop grand, une convection naturelle de l'air intervient, ce qui entraîne des pertes non négligeables par convection. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan on prend :  $e' \sim 2,5\text{cm}$ . En plaçant deux vitres on limite évidemment les pertes dues à la réémission (double effet de serre) et on limite aussi les pertes par conduction – convection [BELA 00].

Les parties arrière et latérales: on place un isolant (laine de verre, polystyrène, polyuréthane) sur ces parties afin de limiter les pertes par conduction – convection à la périphérie.

### II.2.2.2.3. Intérêt des surfaces sélectives

Les phénomènes physiques intervenant dans un capteur sont représentés sur la figure II.3. Une fraction de l'énergie incidente est transmise au fluide de transfert circulant dans l'absorbeur. Une autre part de l'énergie incidente est perdue par réflexion sur la couverture du capteur dans le cas où il en possède une ainsi que sur la surface de l'absorbeur.

Nous les qualifions de pertes optiques. Une autre part de l'énergie thermique produite par l'absorption des photons incidents est perdue par transfert vers l'environnement du capteur par convection, conduction et rayonnement.

Là nous les qualifions de pertes thermiques. Les pertes thermiques par convection et conduction sont en première approximation proportionnelles à la température [SPIT 79].

Selon la loi de Stefan-Boltzmann, les pertes thermiques par rayonnement sont par contre proportionnelles à la puissance quatrième de la température.

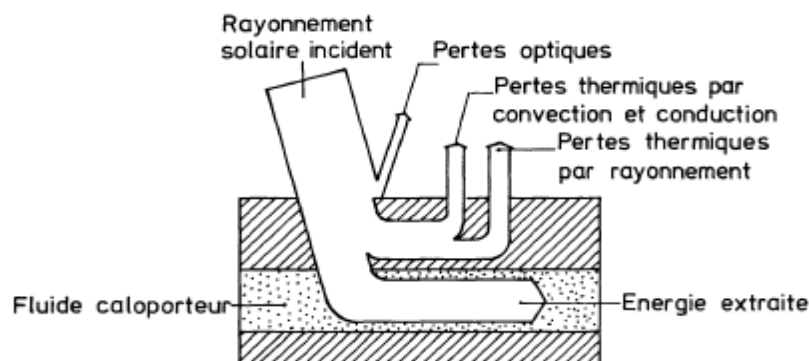
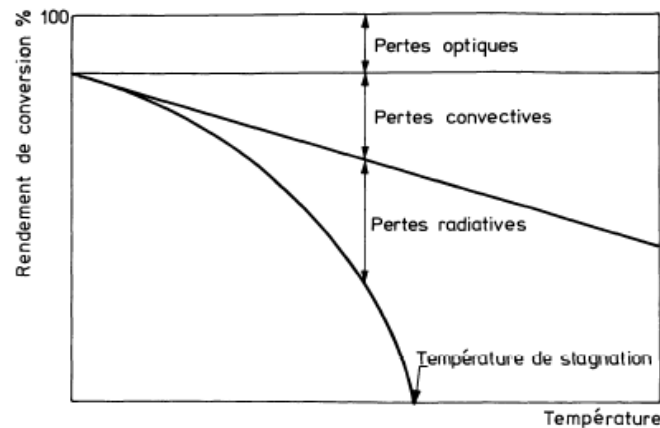


Figure II.3 : Bilan énergétique d'un capteur [SPIT 79]

Les pertes par convection et conduction, plus particulièrement liées à la conception du capteur, sont prépondérantes pour les basses températures.



**Figure II.4 : Evaluation des pertes d'un capteur en fonction de la température [SPIT 79]**

Les pertes radiatives, relatives aux propriétés optiques des matériaux de l'absorbeur et du vitrage, deviennent plus importantes puis prépondérantes aux moyennes puis aux hautes températures. Pour ces trois domaines de température, la variation des pertes optiques avec la température peut être considérée comme faible par rapport aux variations des autres pertes.

L'augmentation de la puissance extraite du capteur à une température donnée est obtenue par réduction à une valeur acceptable des pertes thermiques par convection et conduction en agissant sur la géométrie et l'isolation thermique du capteur.

A une température donnée l'augmentation du rendement est obtenue par action sur la conception du capteur par augmentation du facteur de concentration, moyennant un effort technologique non négligeable et la perte de la quasi-totalité du rayonnement diffus. Aussi cette augmentation de rendement est obtenue par action sur les propriétés optiques des matériaux composant la couverture et la surface de l'absorbeur de façon à conserver ou augmenter l'absorption de l'énergie solaire incidente et simultanément diminuer ses pertes radiatives à la température de fonctionnement.

En approximant le rayonnement solaire par le rayonnement d'un corps noir à 5900 K et les températures de conversion étant dans tous les cas inférieures à 1000 K, comme le montre la figure II.5.

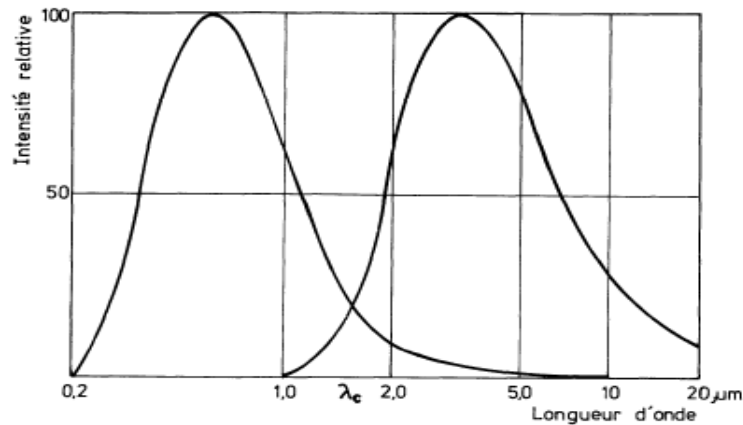


Figure II.5 : Intensité spectrale du rayonnement émis par un corps noir à 900 K. [SPIT 79]

On peut définir une longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  [SPIT 79], en introduisant une séparation très nette entre la distribution spectrale du rayonnement solaire et celle du rayonnement thermique émis par le capteur.

Les propriétés optiques des capteurs sont donc en général bien définies pour une température de fonctionnement  $T$  par son absorptivité spectrale  $\alpha(\lambda, T)$  et son émissivité spectrale  $\varepsilon(\lambda, T)$  intégrées dans tout le demi-espace afin de tenir compte de leur anisotropie. Le capteur sélectif idéal est défini tel que :

$$\left. \begin{array}{ll} \alpha(\lambda, T) & \text{pour } 0 < \lambda < \lambda_c \\ \varepsilon(\lambda, T) & \text{pour } \lambda_c < \lambda \end{array} \right\}$$

Si le capteur dispose d'un vitrage placé en avant de l'absorbeur (afin de diminuer les pertes convectives et utiliser l'effet de serre), on peut approcher ces conditions idéales de deux manières différentes:

- La première consiste à équiper le capteur d'un absorbeur sélectif. Dans ce cas, et en supposant le revêtement de l'absorbeur opaque, on cherche à réaliser :

$$\left. \begin{array}{ll} \rho(\lambda, T) = 0 & \text{pour } 0 < \lambda < \lambda_c \\ \rho(\lambda, T) = 1 & \text{pour } \lambda_c < \lambda \end{array} \right\}$$

où  $\rho(\lambda, T)$  est la réflectivité spectrale hémisphérique du revêtement. La surface de l'absorbeur est alors absorbante ou noire vis-à-vis du rayonnement solaire et réfléchissante ou blanche vis-à-vis du rayonnement infrarouge.

- Une deuxième solution consiste à utiliser un vitrage sélectif. On réalise alors un traitement du vitrage ayant les propriétés suivantes :

$$\left. \begin{array}{ll} \tau(\lambda, T) = 1 & \text{pour } 0 < \lambda < \lambda_c \\ \rho(\lambda, T) = 1 & \text{pour } \lambda_c < \lambda \end{array} \right\}$$

où  $\tau(\lambda, T)$  représente la transmittivité spectrale hémisphérique, c'est-à-dire transparent pour le rayonnement solaire et réfléchissant vis-à-vis du rayonnement infrarouge émis par l'absorbeur, supposé alors parfaitement absorbant pour le rayonnement solaire.

Comme mentionné sur la figure II.4, dans le domaine des basses températures solaires, les pertes thermiques par convection et conduction sont prépondérantes et une réduction même notable des pertes thermiques radiatives ne conduit pas à une augmentation appréciable du rendement. La sélectivité présente donc peu d'intérêt pour des températures de conversion inférieures à 60 °C.

Dans le domaine des températures moyennes (60 à 150 °C), la sélectivité spectrale peut accroître d'une manière appréciable le rendement, bien que les pertes convectives et conductives représentent encore une part importante des pertes globales.

Dans la gamme des hautes températures solaires, il est nécessaire d'utiliser des systèmes concentrateurs du flux solaire et dans ces conditions, les pertes par convection et conduction peuvent être négligées en première approximation par rapport aux pertes radiatives.

#### II.2.2.4.Principe de fonctionnement d'un capteur plan

Les capteurs solaires plans sont les capteurs les plus courants sur le marché de l'énergie solaire thermique. Dans un capteur plan, le rayonnement traverse le vitrage du capteur et pénètre l'absorbeur. C'est sur la surface de l'absorbeur que le rayonnement solaire est converti en chaleur.

Un liquide caloporteur, qui circule en contact avec l'absorbeur, conduit la chaleur captée vers le consommateur. Le vitrage solaire crée un effet de serre, qui augmente le rendement du capteur, quand la température extérieure est inférieure à la température du capteur. Il a la propriété de mieux laisser passer le rayonnement solaire que le rayonnement infrarouge, émis par l'absorbeur. La chaleur est ainsi piégée dans le capteur. La couverture évite aussi le refroidissement de l'absorbeur par le vent. L'isolation dessous et autour de l'absorbeur diminue les pertes de chaleur. Un autre élément, qui augmente considérablement l'efficacité du capteur, est la couche sélective de l'absorbeur. Elle augmente jusqu'à 85% la captation de l'énergie solaire comparée à une couche noire non sélective. La couche sélective à base de chrome noir absorbe l'énergie solaire de façon optimale tout en limitant considérablement les pertes par rayonnement. Le liquide caloporteur chauffé dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers un échangeur de chaleur, où sa chaleur est transmise au consommateur [2].

#### II.2.2.3. Applications possibles de l'énergie solaire photothermique

Il est très commun d'utiliser l'énergie solaire pour le séchage des produits agricoles, la production de sels par évaporation et la culture en serres. Or, ce qui est envisageable avec le photothermique solaire est de trouver des applications à basse température tel que : le chauffage

de l'eau, la climatisation des habitations, le dessalement de l'eau, la réfrigération solaire, etc. Ces réalisations répondraient à un grand nombre de besoins ne nécessitant pas une puissance énergétique élevée. Dans le domaine des températures relativement plus élevées, il est possible de développer des cuiseurs et fours solaires. Toutefois, ces techniques requièrent une assez forte concentration du rayonnement solaire.

#### II.2.2.3.1. Chauffage des piscines

L'énergie thermo-solaire active permet de chauffer l'eau et stocker l'eau chaude dans la piscine. Les collecteurs permettent de faire circuler efficacement l'eau dans les différentes parties de la piscine.

#### II.2.2.3.2. Eau chaude sanitaire par voie solaire



**Figure II.6 :Chauffe-eau solaire [3]**

Le capteur solaire permet de récupérer l'énergie thermique solaire. Le système est composé d'un capteur plan, d'une cuve de stockage, d'un régulateur et d'une source d'appoint en eau recyclable.

En bac plat du chauffe-eau présente une capacité généralement de 200 litres, le tout couvert d'une plaque de verre.

Le système est incliné de telle façon que les rayons solaires captés soient perpendiculaires à la surface de captage ; l'énergie est ainsi captée optimalement. Le bac de stockage permet de récupérer l'eau chaude dans un réservoir calorifugé. Ce système élémentaire peut être sujet à un gel la nuit.

A cet effet, on peut réaliser un chauffe-eau indirect avec un liquide à bas point de congélation circulant dans un serpentin qui traverse le réservoir d'eau à chauffer. La quantité d'eau réduite permet de réagir à de faibles insulations.

Les panneaux de captages constituent le collecteur d'énergie solaire. Elles peuvent être constituées de feuilles d'aluminium noircies (d'épaisseur 1,5 mm). Elles sont recouvertes par une plaque de verre (d'épaisseur de 3 mm), distantes d'une dizaine de millimètres de feuilles d'aluminium.

En général, nous adoptons une orientation Est-Ouest ou Sud, avec une inclinaison de «latitude du lieu+10°» [CHAK 03].

Aussi nous pouvons concevoir un système de captage par thermosiphon où le réservoir est placé au-dessus du collecteur évitant ainsi l'inversion du cycle thermique durant la nuit. Une pompe accélératrice peut être prévue pour les grandes installations. Le système est doté d'un vase d'expansion avec purge automatique.

Ce système peut présenter un rendement de 70% pour un ensoleillement parfait et un rendement inférieur à 50% pour une forte nébulosité (prévoir dans ce cas un chauffage d'appoint).

Pour un insolateur de 3 m<sup>2</sup>, on peut récupérer près de 200 litres par jour d'eau à 60°C. Le coût d'investissement est de l'ordre de 100 000 DA est amortie sur 5 ans avec une consommation de combustible presque nulle, sinon le coût de l'entretien des matériaux.

#### II.2.2.3.3. Chauffage solaire des habitations

Les capteurs à air ou à eau permettent le chauffage des locaux, d'habitations ou de service.

Le fluide caloporteur circule dans les capteurs thermosolaires placés sur les toits et les façades des habitations, permettent ainsi de redistribuer les calories captées au profit des demeures.

Pour les capteurs à eau, l'énergie est stockée sous forme d'eau chaude pour des réservoirs de plusieurs m<sup>3</sup>, permettant ainsi de ne pas être affecté du caractère aléatoire du rayonnement solaire.

Pour l'air chaud on ne peut envisager un tel système de stockage.

Pour pallier à cette difficulté, un système original (Trombe Michel) a permis d'implanter des serres sur les façades verticales exposées au soleil. La surface réceptrice (mur en béton) permet d'absorber l'air chaud entre la vitre et le mur, constituant une colonne de densité plus faible que celle de l'air de pièce à chauffer, montrant et pénétrant la pièce pour une ouverture supérieure.

L'air de la pièce plus frais soit par une ouverture inférieure.

Le mur en béton joue alors le rôle d'un accumulateur de chaleur. En général un mur de 40 cm permet le stockage d'une moitié de calories reçues, l'autre moitié étant transmise à l'air libre.

La serre à double vitrage revient à double vitrage revient à 3000 DA/m<sup>2</sup>, le taux d'amortissement de la serre est de 10% par an. Le gain de KWh solaire serait de 3 fois moins que le KWh électrique du réseau. [CHAK 03]

#### II.2.2.3.4. Distillation solaire

La distillation thermosolaire utilise la conversion de l'énergie solaire (rayonnement) en énergie thermique [CHEK 07] pour produire de l'eau potable à partir d'eau saline.

Dans le cas des besoins modérés en eau douce, nous pouvons recourir à la distillation solaire directe. Elle présente de nombreux avantages : régions isolées, absence de main d'œuvre, interventions limitées, coûts... [CHAK 03]

Le taux de recouvrement des installations de distillation est faible (5%), malgré la mise en place d'une stratégie de gestion d'eau douce dans les zones arides et isolées.

Le bac noirci pourvu d'eau à distiller est recouvert par une surface transparente assurant la transmis. Cette production peut être évaluée à  $7 \text{ l/m}^2$  soit  $2,5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{an}$ . Le coût des matériaux et installations est estimé à  $1000 \text{ DA/m}^2$ , ou encore à  $100 \text{ DA/m}^3$  d'eau distillée. A titre comparatif, on évalue le coût de transport de l'eau à  $1000 \text{ DA/m}^3$  en milieu saharien.

Ainsi nous notons que la distillation solaire reste au-delà des grandes installations où les rendements d'échelle interviennent pour un rendement du prix de revient très compétitif (La production doit être au-delà de  $85 \text{ m}^3/\text{jour}$ ).

#### II.2.2.3.5. Réfrigération solaire

Pour les pays où l'isolation est très appréciable comme l'Algérie, on peut établir une corrélation entre l'ensoleillement et les besoins en froid (Climatisation).

A cet effet on peut envisager les réfrigérateurs solaires à absorption munie d'une solution ammoniacale concentrée. Dans un condenseur, l'ammoniac se dégage et se liquéfie sous sa propre pression, puis il se vaporise en empruntant de la chaleur au milieu à refroidir.

Un nouveau cycle permet à la vapeur d'ammoniac d'être absorbée dans l'eau.

Pour une surface de captage de  $18 \text{ m}^2$ , on peut obtenir jusqu'à  $30\,000 \text{ kg}$  de glace par an, et pour une insolation de 4 heures par jours.

La réfrigération solaire peut se faire par adsorption. Dans ce cas on introduit du charbon actif avec du méthanol ( $22 \text{ kg}$ ) pour une surface de captage de  $1 \text{ m}^2$ , un condenseur de  $10 \text{ m}^2$ , un évaporateur de  $1 \text{ m}^2$  et une chambre froide de 100 litres produisant  $5 \text{ Kg}$  de glace/jour.

Les systèmes de conversion thermiques, tels que la réfrigération solaire, la distillation solaire, le chauffage solaire, le chauffage de l'eau, que nous avons présenté sont à moyenne et basse température et n'engendrant aucun effet de concentration basé sur la réflexion optique.

Dans le cas d'une focalisation optique ponctuelle, on utilise un champ de miroirs plan captant le rayonnement solaire et le réfléchissant sur un miroir parabolique fixe (Four d'Odeillo) ; la température peut monter jusqu'à  $3500^\circ\text{C}$ .



Aussi on peut utiliser un plusieurs miroirs plans ou paraboliques réfléchissant l'image du soleil au sommet d'une tour atteignant les 100 mètres de hauteur (centrale à tour).

Aussi on peut concevoir un système à collecteurs distribués ; le réflecteur est un assemblage de miroirs plan présentant une enveloppe parabolôïde de révolution (Capteur Teck).

Dans le cas d'une concentration linéaire, des bandes de miroirs plans ou cylindro-paraboliques constituent le système de focalisation concentrant le rayonnement solaire un tube-chaudière.

Les températures obtenues sont de l'ordre de 100 à 250°C. [CHAK 03]

#### II.2.2.3.6. Four solaire

La technologie est assez complexe et très coûteuse (63 miroirs de 45 m<sup>2</sup> chacun, munis d'un système optique et électronique de poursuite. La concentration est portée sur un miroir concave parabolique fixe, avec une tour au foyer. Ce miroir est réalisé à partir de 9500 glaces argentées réparties sur une surface de 2500 m<sup>2</sup>. La température peut atteindre 3500°C.

Une des utilisations des fours solaires, porte sur la fusion de l'aluminium à 2050°C afin d'obtenir du corindon ou du quartz (pour le verre de silice très pur). [CHAK 03]

#### II.2.2.3.7. Centrales solaires thermodynamiques

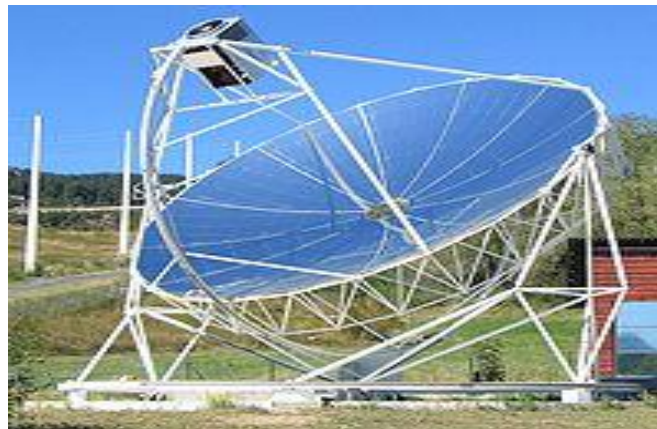


Figure II.7 : Centrale solaire thermodynamique [4]

La concentration de l'énergie solaire en un foyer précis peut engendrer des températures hautement élevées, permettant ainsi le développement des systèmes de production d'énergie thermique appréciable.

Aussi on peut noter le développement de la production électrique par des turbines à vapeur d'eau ou par des moteurs thermiques, tels que le moteur Stirling.

Il est possible de concevoir et réaliser des collecteurs paraboliques pour chauffer un fluide caloporteur se déplaçant dans une tuyauterie appropriée et placée au foyer.

Cette alternative de production d'électricité solaire par concentration présente des avantages sur le plan économique.

Ce mode de production d'électricité réside essentiellement dans la technique optimale de chauffer le fluide caloporteur : eau, sels fondus, huiles synthétiques ou vapeur.

La non disponibilité permanente de l'énergie solaire peut être prise en charge par :

- Le stockage de la chaleur dans un réservoir de fluide chaud.
- L'hybridation des concentrateurs solaires avec une centrale thermique classique où la chaudière et la chaleur solaire alimentent la même turbine à vapeur.

L'irrégularité propre de l'énergie solaire peut être palliée, soit en stockant de la chaleur avec un réservoir de fluide chaud ou en hybridant les concentrateurs solaires avec une centrale thermique classique où la chaudière et la chaleur solaire nourrissant la même turbine à vapeur.

- La centrale de Mojave vers 1980, avait fait figure de projet pionnier. Cette filière revient d'actualité face aux inquiétudes sur le réchauffement climatique et sur les réserves d'hydrocarbures, avec de nombreux projets pilotes dans une dizaine de pays [5].
- La centrale thermo-solaire Nevada Solar One est en construction depuis le 11 février 2006 à Boulder City. En 2009 elle est raccordée au réseau et développera à terme une puissance de 64 mégawatts (troisième puissance au monde) [6].

Selon ses concepteurs, elle permettra d'éliminer une pollution équivalente à celle d'un million de voitures en circulation sur le territoire des États-Unis.

- La Pacific Gas and Electric a annoncé en novembre 2007 une centrale solaire à San Luis Obispo, qui produira 177 MW d'électricité pour 120 000 foyers [7].
- La centrale solaire Thémis, expérimentale a également en France produit de l'électricité dans les années 1980 avant sa mise en sommeil faute de rentabilité face à la chute du prix du pétrole et à une électricité nucléaire moins chère. Elle est en cours de reconversion.
- La centrale d'Almeria en Espagne n'a pas eu de suite majeure pour les mêmes raisons. Le 31 mars 2007, à 25 km de Séville a été officiellement inaugurée une centrale solaire nommée PS10 d'une puissance de 11 MW électrique, dont la production prévue est d'environ 23 GWh par an (soit la production à pleine puissance de 2000 h/an) [8]. D'autres centrales similaires sont prévues [9].
- En 2011, Alba Nova 1, située en Corse, est la première centrale solaire thermodynamique française d'envergure à avoir obtenu un permis de construire depuis plus de 30 ans [10].
- La tour solaire de 1 000 mètres de hauteur, est l'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie alternative. Ce serait une usine d'énergie renouvelable qui fournirait la même puissance qu'un petit réacteur nucléaire tout en étant plus sûre et plus propre.

- Un moteur Stirling relié à une génératrice peut aussi bien utiliser un système de concentrateurs paraboliques ou des capteurs plats à fluide caloporteur, selon son gradient thermique de fonctionnement.
- La centrale hybride thermo-solaire (Gaz-solaire) 150 MW de HASSI-R'MEL (Algérie).

### II.3. Les concentrateurs solaires

Le concentrateur est un capteur solaire qui permet de transformer les rayons solaires en énergie thermique. Il comporte un système optique (réflecteur, lentilles...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement reçu (d'où le nom de capteur à concentration).

Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. En utilisant des réflecteurs afin de concentrer les rayons du soleil sur l'absorbeur d'un capteur solaire, cela permet de diminuer grandement la taille de l'absorbeur, ce qui réduit les pertes de chaleur et augmente le rendement de chauffage.

#### II.3.1. Dispositifs de la concentration du rayonnement solaire

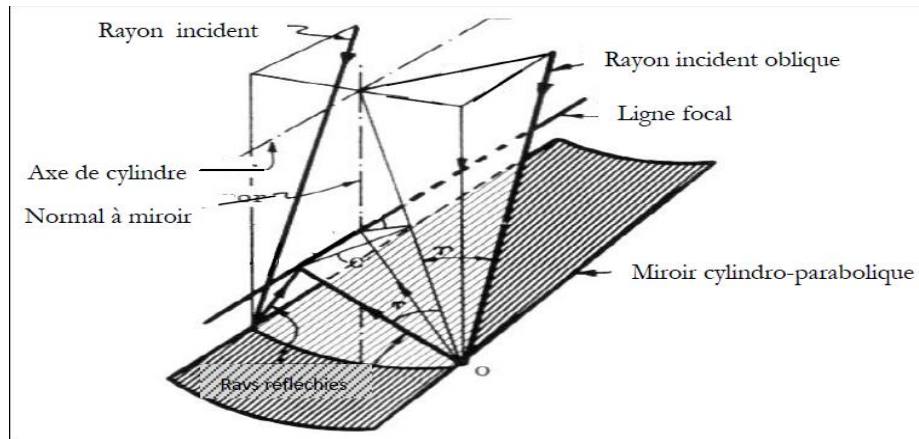
Deux concepts ont été développés en plus ou moins commercialisés : les systèmes à récepteurs central et les systèmes à collecteurs distribués (Cylindro-parabolique et parabolique).

En fonction du niveau de température de la chaleur, l'énergie solaire à concentration peut être utilisée pour faire fonctionner des centrales à vapeur, des turbines à gaz,...

#### II.3.2. Systèmes à collecteurs distribués

##### II.3.2.1. Concentrateur cylindro-parabolique

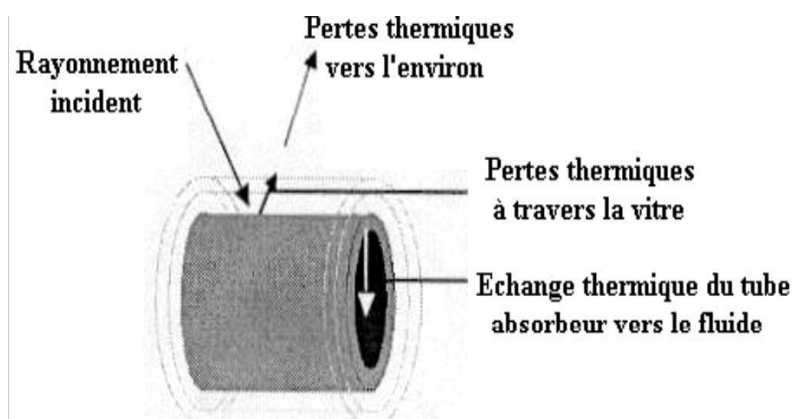
Les réflecteurs cylindro-paraboliques sont des systèmes en forme de « U ». Ils concentrent les rayons du soleil sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Parfois un tube en verre transparent entoure le tube récepteur afin de réduire les pertes de chaleur. [11]



**Figure II.8:Schéma d'un collecteur à concentrateur cylindro-parabolique**

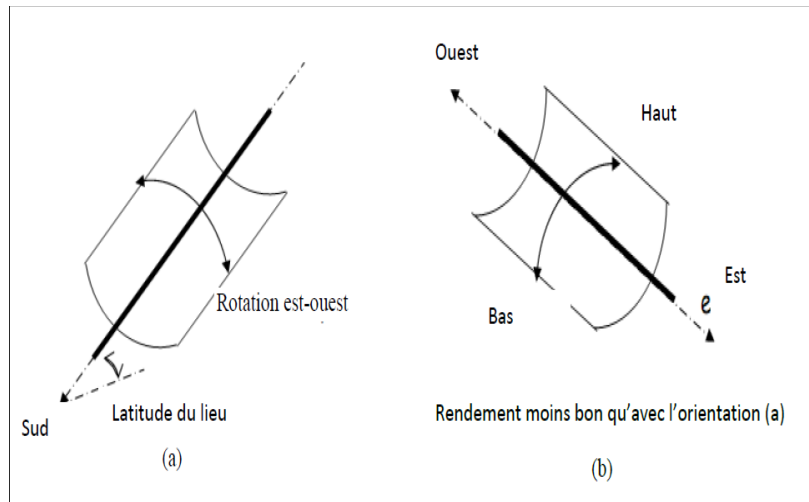
L'élément le plus important dans ces systèmes est le tube absorbeur, à l'intérieur duquel circule le fluide caloporteur. Le tube absorbeur est souvent en cuivre recouvert d'une couche sélective, est entouré d'une enveloppe transparente en verre. Il est placé le long de la ligne focale du concentrateur cylindro- parabolique.

Les températures sont de l'ordre de 400°C. L'énergie solaire incidente absorbée, est partiellement transmise au fluide caloporteur, une partie est dissipée sous forme de pertes thermiques entre l'absorbeur et la vitre. Nous déterminons les différentes parts d'énergies, celle recueillie par le fluide et perdue vers l'ambiance telle qu'elle est montrée par la figure II.9. [OGIL 03].



**Figure II.9:Schématisation des échanges thermiques entre les différents éléments du collecteur cylindro-parabolique.**

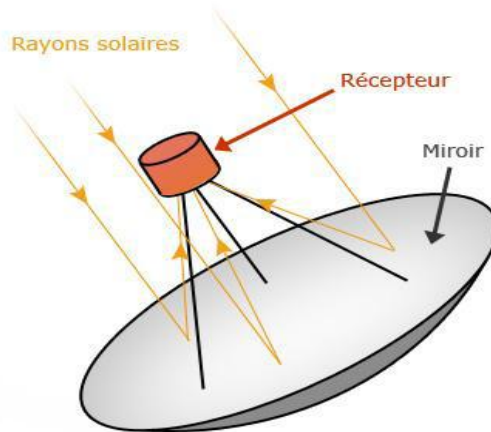
Pour être efficaces, ces concentrateurs doivent se déplacer pour suivre la course apparente du soleil avec deux orientations possibles (Voir figure II.10) [OGIL 03]:



**Figure II.10: L'orientation d'un concentrateur cylindro-parabolique : (a) : Orientation axe rotation terrestre Tube récepteur // axe rotation Terre ; (b) : Orientation est – Ouest Tube récepteur // axe est - ouest. Suivi solaire haut/bas 2-3 fois/jour.**

### II.3.2.2. Concentrateur parabolique

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbants) qui capte la chaleur ainsi concentrée. Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1500 °) sur le récepteur. [11].



**Figure II.11: Concentrateur parabolique**

Le miroir parabolique se compose de deux parties [SENO 94]:

- (1) : Le support annulaire; c'est l'ensemble des alliages d'aluminium, ce qui lui assure une bonne résistance aux intempéries de même de bonne qualité mécanique en plus d'une légèreté.
- (2) : Le réflecteur et la couverture transparente; ils sont constitués d'une feuille de plastique de ,1mm d'épaisseur possédant de bonne qualité optiques et mécaniques.

Pour le réflecteur, la feuille de calcul le constituant, est recouverte d'un revêtement d'argenture, la feuille de plastique est fluoro-polymérique, sa grande inertie chimique lui assure une longévité accrue de même que la constante pour ses qualités mécaniques et optiques. Après 5 ans d'utilisation et d'expérimentation à l'extérieur, les caractéristiques mécaniques et optiques du film plastique ne change pas.

Après 1 ans d'utilisation intensive, les qualités mécaniques et optiques se dégradent d'environ 5%. La géométrie essentielle du miroir est montrée par la figure II.12. [OGIL 03]:

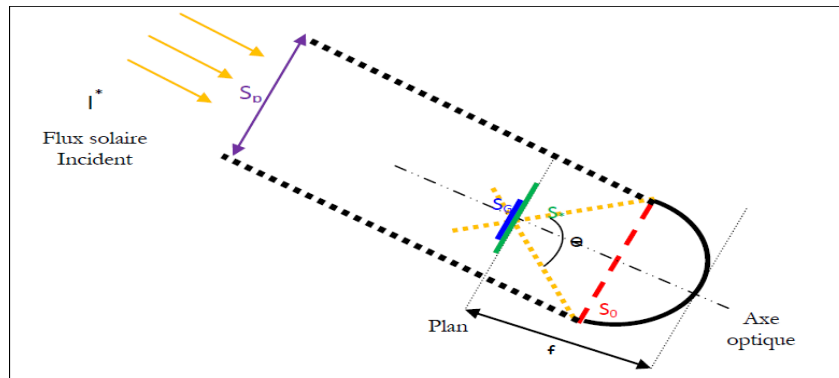


Figure II.12:Grandeurs caractéristiques du concentrateur parabolique. [OGIL 03]

Avec

$S_0$  : Section d'ouverture ( $m^2$ )

$S_p$ : Section de passage du rayonnement solaire entrant dans le concentrateur ( $m^2$ )

$S_p = S_0$  si  $I_*$  est // à l'axe optique

$S_G$  : surface de Gauss image du soleil au plan focal par les rayons proches de l'axe optique (par axiaux) ( $m^2$ )

$S_*$  : surface de l'image réelle du soleil dans le plan focal ( $m^2$ )

$\theta$ : angle d'ouverture du concentrateur (angle dont on voit le concentrateur du plan focal) ( $^\circ$ )

$f$  : distance focale (m)

Les systèmes concentrateurs à miroirs paraboliques peuvent être de deux types

[SENO 94]:

a) : Réception indirecte aux moyens de miroirs plans orienteurs mobiles renvoyant les rayons solaires sur un paraboloïde fixe.

b) : Réception directe sur le paraboloïde fixe ou mobile constamment dirigé vers le soleil.

Bien que la réception directe sur un paraboloïde mobile, comporte une seule réflexion, elle a l'inconvénient de donner un foyer mobile dans l'espace, ce qui entraîne de sérieux problèmes pratiques d'utilisation. [ZIDA 13].

#### II.4. Fibres optiques

Les fibres optiques sont des tubes capillaires de faible diamètre composées de deux types de matériaux naturels ou synthétiques. Elles transmettent la lumière le long d'un trajet rectiligne ou incurvé suivant le principe de réflexion totale interne. Elles possèdent un cœur central et en général une seule couche de revêtement externe appelée gaine.

Cependant l'un des avantages de la fibre optique est son utilisation en faisceau; il y aurait donc des contacts multiples des fibres les unes avec les autres. Afin d'éviter le passage de lumière d'une fibre à l'autre, elles doivent être isolées les unes des autres par une gaine.

Une fibre optique est une baguette très fine d'un matériau transparent étiré dont l'aspect filiforme lui confère de la souplesse, c'est un guide d'onde constitué de deux ou plusieurs couches de matériaux diélectriques transparents (verre ou plastique) d'indices de réfraction différents assurant le confinement de la lumière au voisinage du centre [ZIDA 02].

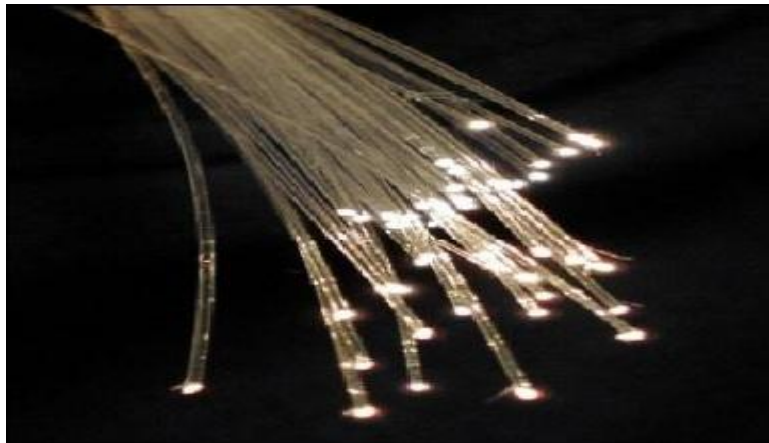


Figure II.13 : Fibre optique [12]

La fibre optique est un guide de lumière, régi par la loi de Snell-Descartes, constituée d'un cœur dans lequel se propage l'onde lumineuse en se réfléchissant sur la gaine optique d'indice de réfraction plus faible. La lumière qui se propage à l'intérieur d'une fibre optique obéit au principe de la réflexion totale interne. Chaque fibre optique est constituée d'un cœur, enveloppé par une gaine. Un faisceau à fibres optiques est utilisé pour transmettre de la lumière soit indépendamment soit couplé à un appareil d'analyse.

Lorsqu'un faisceau lumineux heurte obliquement la surface qui sépare deux milieux plus ou moins transparents, il se divise en deux : une partie est réfléchié tandis que l'autre est réfractée, c'est à dire transmise dans le second milieu en changeant de direction. L'indice de réfraction est une grandeur caractéristique des propriétés optiques d'un matériau. Il est obtenu en divisant la vitesse de la lumière dans le vide ( $C_v=299\,792\text{ Km/s}$ ) par la vitesse de cette même onde dans le matériau. Plus l'indice est grand, et plus la lumière est lente. Ainsi, dans l'air, la vitesse de la

lumière est à peu près égale à  $C_v$  ; dans l'eau, elle est égale à 75% de  $C_v$ ; dans le verre, elle est égale à environ 55% ou 60% de  $C_v$  selon le type de matériau [ZIDA 02].

Dans le but de transporter le maximum d'énergie solaire lumineuse par des fibres optiques on opte pour l'utilisation des fibres ayant un large diamètre du coeur. Le choix de la fibre optique dépend de son utilisation soit pour l'éclairage, soit pour la conception des systèmes photothermiques. Dans notre étude, nous proposons deux types de fibres solaires : la fibre optique fabriquée en Polyméthylméthacrylat et la fibre fabriquée en Silice. [ZIDA 13].

#### II.4.1. Fibres optiques en PMMA

Le Polyméthylméthacrylat, dont l'abréviation est PMMA, est un plastique transparent utilisé comme un remplacement pour le verre incassable. Le PMMA est également commercialisé sous le plexiglas.

Le PMMA est un polymère vinylique, par polymérisation radicalaire vinylique du méthacrylate de méthyle monomère. Les PMMA ont les propriétés suivantes :

- dur.
- rigide.
- transparente (très clair de voir à travers).
- point de ramollissement à 125 ° C.
- absorbe très peu de lumière visible, mais il ya une réflexion de 4% à chaque interface polymère-air pour la lumière incidente normale.
- Un bon isolant électrique à basses fréquences, mais moins satisfaisant à des fréquences supérieures.
- Bonne résistance à l'eau.[ZIDA 13].

#### II.4.2. Fibres optiques en Silice

La silice est la forme naturelle du dioxyde de silicium ( $SiO_2$ ) qui entre dans la composition de nombreux minéraux. La silice est un matériau transparent dans tout le spectre du visible ce qui lui donne des applications intéressantes en optique. Cependant ses propriétés de transparence se perdent dans les spectres de l'UV et d'infrarouge, ce qui impose l'usage d'autres matériaux pour travailler dans ces longueurs d'onde par exemple en spectrométrie infrarouge. Cet effet est mis à profit dans l'effet de serre où la lumière peut pénétrer, mais dont les infrarouges ne peuvent sortir, d'où un échauffement ou, tout au moins, le maintien d'une température plus élevée qu'à l'extérieur sans chauffage.



La silice se présente soit sous forme de cristaux non-moléculaires formés de motifs tétraédriques  $\text{SiO}_4$  liés entre eux par les atomes d'oxygène de façon régulière, comme dans le quartz, soit sous forme amorphe, comme dans le verre.

La silice sert également de support isolant en électronique.

La silice est aussi l'un des meilleurs isolants électriques qui existe. Pour cette raison, elle est souvent utilisée sur des circuits électriques de silicium, simplement en oxydant les couches voulues.

Le verre de silice est de la silice non cristallisée utilisée dans la fabrication des instruments d'optique, d'appareils de laboratoire et de fibre optique de verre. [ZIDA 13].

### II.4.3. Composantes de base des fibres optiques

#### II.4.3.1. Filaments conducteurs

Lorsqu'un faisceau linéaire de lumière entre dans une fibre optique incurvée, il pénètre sous un angle qui peut varier de  $15^\circ$  à  $130^\circ$  jusqu'à ce qu'il heurte l'interface entre l'âme de la fibre et son revêtement. Le faisceau n'est pas réorienté et il se propage à l'intérieur de l'âme avec un angle faible par rapport à l'axe optique. La propagation du faisceau suit la courbure de l'âme de la fibre optique. Durant la propagation de la lumière dans la fibre optique, il y a une diminution de l'énergie due aux pertes d'absorption au niveau des points critiques.

La lumière infrarouge est moins soumise à l'absorption que la lumière visible ou ultraviolette. [ZIDA 02].

#### II.4.3.2. Structure des fibres optiques :

Il existe deux types de structures de fibres optiques ; avec et sans revêtement. La première est employée pour l'éclairage dans les applications de visualisation et de détection. Dans les deux types, le matériau transparent le plus dense constitue l'âme. Un rayon lumineux réfléchi à l'interface revêtement/âme pénètre dans le revêtement, sur une distance équivalente à une demi-longueur d'onde de la lumière transmise par la fibre. Par suite, l'épaisseur du revêtement ne peut pas être inférieure à une demi-longueur d'onde. Le revêtement offre une certaine protection à l'âme, ainsi qu'à la lumière réfléchi. [ZIDA 02].

#### II.4.3.3. Matériaux pour fibres optiques :

- Pour la fabrication des fibres optiques, on utilise deux sortes de matériaux, naturels et synthétiques. Les matériaux synthétiques sont obtenus par polymérisation de matériaux naturels.

Les matières premières naturelles sont souvent à base de silice ( $\text{SiO}_2$ ). Les fibres synthétiques sont obtenues à partir des matériaux polymères. [ZIDA 02].

#### II.4.3.4. Propriétés des fibres optiques

Les propriétés des fibres optiques se répartissent en propriétés : optiques, thermiques, électriques, mécaniques, et acoustiques.

-Optiques : Un certain nombre délimité de longueurs lumineuses peuvent transmettre la lumière et sous un certain angle.

-Thermiques : utilisation entre  $-40$  et  $+80^\circ\text{C}$ .

-Electriques : ne conduisent pas l'électricité,

-Acoustiques : Le transport des ondes lumineuses entraîne une perte acoustique de quelques dB par Km due à la réflexion du rayon lumineux,

-Mécanique : faible diamètre, fragile et flexible. [ZIDA 02].

## II.5. Four solaire

### II.5.1. Historique

C'est depuis 1767 que le concept de cuiseur solaire existe. **Horace Bénédicte de Saussure**, considéré comme l'ancêtre du capteur solaire, célèbre géologue et naturaliste suisse de son époque, mit au point un instrument de mesure lui permettant d'étudier les effets calorifiques des rayons du soleil qu'il nomme : « **hélio thermomètre** », et qui ressemble beaucoup aux capteurs solaires modernes. Il pense même aux possibilités d'applications au domaine de la maison, avec l'usage de fenêtres à double châssis. De nos jours, cet instrument est devenu **un moyen écologique** afin d'exploiter l'énergie solaire et est surtout utilisé dans les pays ayant un climat favorisant le rendement : aride, tropical, équatorial ou encore méditerranéen.

Il est aujourd'hui, avec l'évolution technologique, utilisable pour diverses raisons :

- Culinaires (réchauffement de nourriture).
- Scientifiques (étude des chocs thermiques et conversion d'énergie, etc...).
- Artisanales (création de la céramique) ou encore industrielles.

Il existe deux types de fours solaires:

- **Les fours solaires concentrateurs** basés sur la double réfraction des rayons lumineux.
- **Les fours à effet de serre** basés sur la transparence et la sélectivité des matériaux, plus généralement sur l'accumulation et la concentration de l'énergie solaire. [13]

## II.5.2. Définition générale

Le concept de four solaire (ou cuiseur solaire) est un procédé de chauffage reposant sur la saisie des rayonnements solaires émis et leur conversion en chaleur.

Cette concentration d'énergie permettra la réutilisation de la chaleur obtenue à maintes fins selon la capacité du four.

Le développement de ce principe permettrait, par exemple, de freiner les déforestations et de réduire les consommations excessives des énergies fossiles. [13]

### II.5.2.1. Les fours solaires à concentration

Ce type de four solaire fonctionne grâce à **l'effet de convergence des rayons solaires sur une surface donnée**. Ce procédé permet de stocker et de concentrer l'énergie, utilisée ensuite selon les besoins. Ces fours, semblables à des **convecteurs solaires ou miroirs**, sont aussi appelés **héliostats**. La forme de ces fours solaires peut être plate ou parabolique selon l'utilisation et l'utilité du four. Prenons comme exemple le four solaire d'Odeillo disposant d'une série d'héliostats plats orientable selon la position du soleil et pouvant atteindre des températures extrêmes (jusqu'à 3000°C) contrairement au four solaire de Mont Louis qui possède un héliostat parabolique. [13]

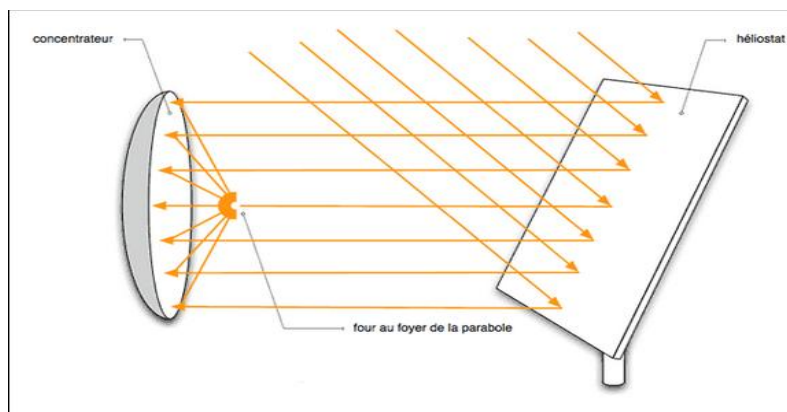


Figure II.14: schéma de principe de la concentration solaire à double réflexion [13]

### II.5.2.2. Les fours solaires à effet de serre :

Ce type de four solaire est comme son nom l'indique basé sur le principe d'effet de serre, c'est à dire, **la concentration des rayons lumineux**. L'énergie ainsi concentrée est ensuite utilisée directement ou transportée grâce à un fluide caloporteur : fluide chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de températures (eau ou air) afin de fournir du chauffage, de l'eau chaude sanitaire, de l'air chaud pour un séchoir, etc...[13]

**Deux effets combinés réalisent l'effet de serre :**

- **La transparence des matériaux** : c'est à dire la capacité d'un matériau à réguler les rayonnements suivant leur longueur d'onde. Généralement, dans le four solaire on

cherchera un matériau transparent aux rayonnements inférieurs à 3000 nm et opaque aux rayonnements supérieurs 3000 nm. Le plexiglas et le verre par exemple sont de tels matériaux.

- **La sélectivité des matériaux** c'est à dire le phénomène qui va permettre aux matériaux du four solaire de transformer la longueur d'onde du rayonnement souhaité pour optimiser le rendement.
- **La sélectivité** est le rapport entre le facteur d'absorption d'une longueur d'onde, et le facteur d'émission d'une autre longueur d'onde, d'un matériau.

Habituellement, dans les fours solaires, les longueurs d'onde concernées sont les rayonnements de courte longueur d'onde inférieurs à 3000 nm pour le facteur d'absorption et les rayonnements supérieurs à 3000 nm (infrarouge et au-dessus) pour le facteur d'émission.[13]

- **L'effet de serre est efficace lorsque la sélectivité et la transparence de deux matériaux se complètent.**

Dans un premier temps, le rayonnement source traverse le matériau à la longueur d'onde du rayonnement source. Celui ci voit ensuite sa longueur d'onde modifiée par la sélectivité d'un second matériau en une longueur d'onde à laquelle le premier matériau est opaque. De ce fait, le rayonnement est emprisonné entre deux matériaux et l'on obtient l'effet de serre.

Dans notre four solaire, nous mettrons en œuvre ce principe en utilisant des plaques de verres et de l'aluminium.

Voici un schéma représentant un four solaire à effet de serre qui utilise, ici, le verre comme matériau sélectif.

**Dans ce cas**, nous avons un double-vitrage qui laisse passer les rayons du soleil et qui viennent chauffer la marmite et l'intérieur du four. **L'énergie est " coincée " à l'intérieur** car la chaleur ne peut pas s'évacuer par conduction grâce à l'isolant (placé entre la cuve et le bâti) et au double-vitrage (qui isole mieux qu'une simple vitre grâce à la couche d'air entre les 2 vitres). De plus, le rayonnement de la marmite et des parois de la cuve est bloqué par le verre du double-vitrage : c'est ce qu'on appelle **l'effet de serre**. En effet, le verre est transparent pour les rayons du soleil (dont la température extérieure est de 6000°C) mais il est opaque par rapport au rayonnement des corps plus froids (jusqu'à quelques centaines de °C). Finalement la température de la marmite augmente jusqu'à presque 100 °C. [13]

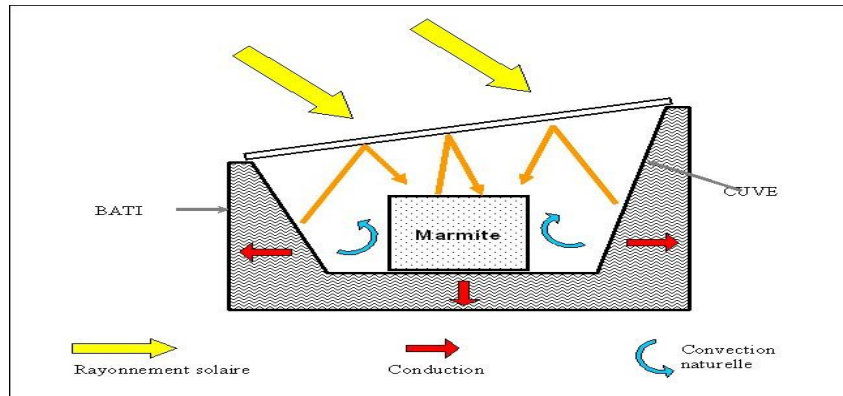


Figure II.15: schéma de principe d'effet de serre. [13]

### II.5.3. Fonctionnement et caractéristique d'un four solaire

Il existe des centaines de modèles des fours solaires, pour les débutants, il suffit de savoir faire la différence entre les systèmes à concentration comme la parabole solaire Alsol et ceux à accumulation. Ci dessous, quelques un des modèles les plus connus des dénommés fours solaires :

#### II.5.3.1. fours de type «boîte»

C'est un premier prototype réalisé, dans un but purement expérimental, comme montré en figures. Il est essentiellement réalisé à partir de plaques de bois en contre plaqué, des miroirs plans et une plaque chauffante en tôle métallique ordinaire noircie.

Avec ce type de système, on cherche à faire élever la température d'une plaque métallique qui supportera l'ustensile de cuisine en l'exposant au rayonnement solaire. Pour cela, on dispose la plaque métallique dans une boîte thermiquement isolée sur la partie arrière par une couche de laine de verre soigneusement enveloppée dans une feuille d'Aluminium.

Dans le volume interne de la boîte, on place quatre miroirs, chacun fixé sur un côté de la boîte et incliné de  $65^\circ$  par rapport au fond de la boîte, de telle sorte qu'il puisse réfléchir l'ensemble du rayonnement solaire traversant la surface d'ouverture de la boîte et incident sur sa face réfléchissante, vers la plaque chauffante.

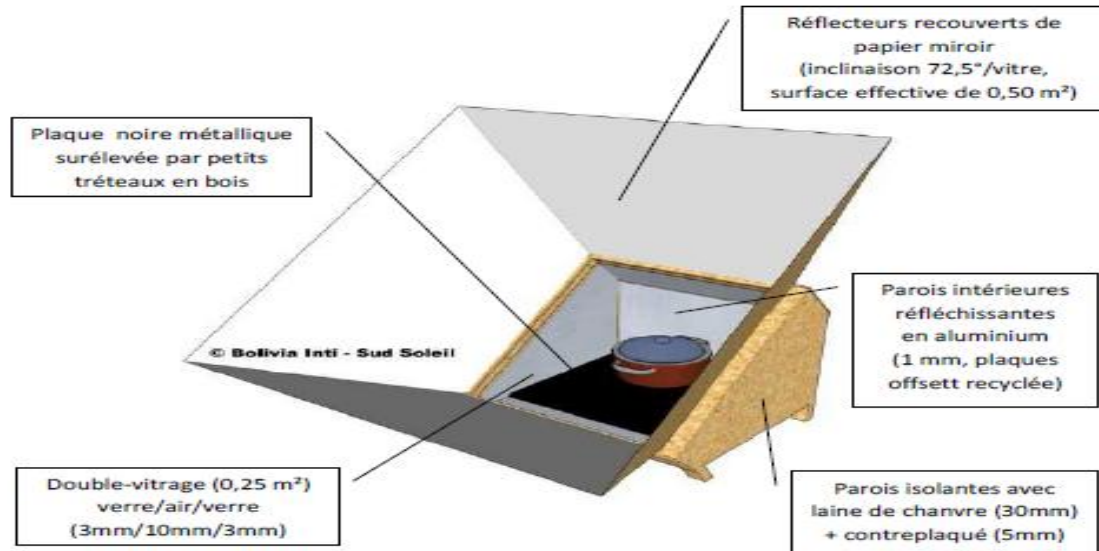


Figure II.16: Schéma représentant le cuiseur solaire de type boîte étudié [HAR 07]

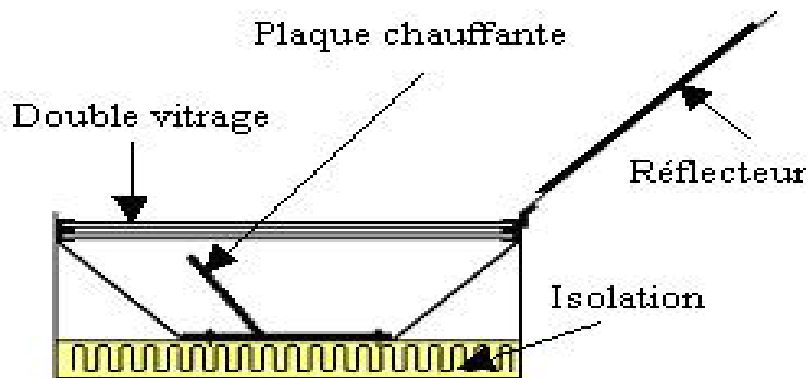
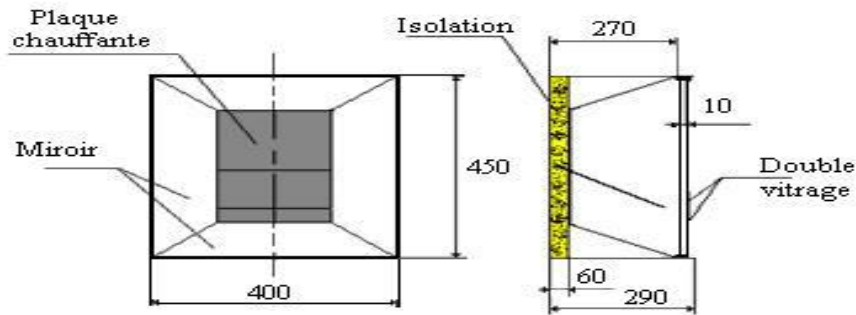


Figure II.17: Schéma montrant la disposition de l'isolation et de la plaque chauffante métallique [HAR 07]

Afin de créer l'effet de serre et de minimiser les pertes thermiques de la plaque chauffante vers le milieu ambiant, on dispose sur la face avant une couverture transparente de 10 mm d'épaisseur constituée de deux vitres ordinaires de 3 mm d'épaisseur séparées par un ruban en liège. Cette couverture est directement posée sur les bords des miroirs internes qui sont munis d'un joint en caoutchouc. Cette configuration permet l'ouverture facile de la cuisinière pour avoir l'accès à la plaque chauffante. Les dimensions d'envergure du système sont montrées sur la figure suivante.



**Figure II.18: Dimensions d'envergures du cuiseur solaire de type boîte[HAR 07]**

Afin d'atteindre des températures très élevées, il faut augmenter le rayonnement absorbé par la plaque chauffante. Pour cela, on utilise trois réflecteurs en miroirs plans disposés sur des plaques de contre-plaqué qui sont fixées sur le bord supérieur de la boîte. La fixation est assurée par des cornières en aluminium avec des charnières qui permettent l'orientation des réflecteurs quand le système est exposé au soleil. En dehors des moments de fonctionnement, les trois réflecteurs seront rabattus et la cuisinière sera fermée.

Durant la période d'utilisation de la cuisinière solaire, on doit l'orienter de telle sorte que le rayonnement solaire direct soit perpendiculaire à sa surface d'ouverture. Pour cela on installe la boîte sur une structure en aluminium dotée d'un axe de rotation vertical permettant son orientation journalière qui se fait chaque 15 à 20 minute. L'inclinaison de la structure est variable selon les saisons. Pour la période hivernale, on adopte un calage de  $50^\circ$  par rapport à l'horizontale et en période estivale on adopte un calage de  $30^\circ$ . Tel que décrit, notre cuiseur solaire de type boîte se distingue par rapport à ceux du même type développés ailleurs [3-5], par le fait que sa surface d'ouverture est inclinée par rapport à l'horizontale. Cette configuration permet une meilleure captation du rayonnement solaire et une plus grande durée d'utilisation journalière car le fonctionnement du cuiseur peut être obtenu dès le lever du soleil. [14].

### II.5.3.2. Four solaire parabolique alsol 1.4

#### a) Description de la parabole solaire

L'alSol 1.4 est le résultat de 20 ans de développement de cuisinières solaires paraboliques à usage domestique. Ce modèle de parabole solaire porte également le nom de barbecue solaire ou four solaire parabolique.

Développée par Climat Inter change en Allemagne elle est aujourd'hui mise à la disposition exclusive de l'entreprise alSol tecnologías solares s.l.

L'alSol 1.4 incorpore l'aluminium comme matériau de base de son éco design, il est d'un apport technique précieux et entièrement recyclable.

L'aluminium réfléchissant qui équipe l'alSol 1.4 est un produit innovant de l'industrie de l'aluminium: Solar Surface de Alcan, qui lui permet une très longue durée de vie d'utilisation.

Tous les composants qui forment la parabole solaire alSol 1.4 ont été sélectionnés à partir de critères de production industriels locaux et respectueux de l'environnement.

La parabole solaire alSol 1.4 est produite intégralement en Catalogne, Espagne, Europe, participant aux plus rigoureux contrôles de qualité sociale et environnementale. [14]



**FIGURE II.19 : la parabole solaire alsol 1.4**

### II.5.3.3. Four solaire à panneaux

Le cuiseur solaire familial pliant n'est ni un four solaire, ni un réflecteur parabolique, mais un astucieux mélange. Son faible coût met la cuisson solaire à la portée d'un plus grand nombre d'utilisateur.

Il permet de cuire les aliments et le pain, pasteuriser l'eau et apprendre les bases de l'énergie solaire. [14]

#### a) Construction

Commencer par découper et plier un grand morceau de carton d'environ 1 m x 1.33 (3'x4') comme indiqué. Les angles et plis indiqués sont les meilleurs, mais de faibles écarts sont sans importance.

**b) Conseil:** Pour faire des plis droits dans du carton, commencer par faire une marque le long du trait avec un objet tranchant comme un manche de cuiller, puis plier en s'appuyant sur un angle rectiligne.

Découper les fentes (slot) légèrement trop étroites afin qu'elles retiennent le panneau avant. Coller du papier d'aluminium sur la face qui se trouvera à l'intérieur lorsque le cuiseur sera monté. Pour le montage, étaler le panneau, côté brillant au-dessus. Replier les parties avant et arrière et engager les coins dans les fentes de l'avant.



Vous êtes prêt à cuisiner ! Placer la nourriture dans un pot de couleur sombre. Mettre ensuite le pot dans un sac en plastique (un sac pour la cuisson au four résistera mieux à la chaleur). Fermer le sac et placer le pot et le sac au centre du cuiseur.

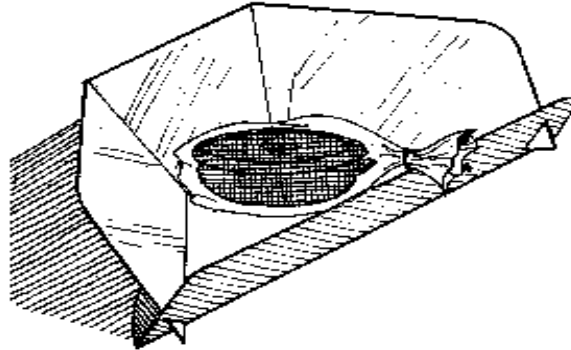


Figure II.20 : Four solaire à panneaux [14]

## II.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous présentons les paramètres et les éléments essentiels des systèmes photothermiques pour une bonne conception donc nous avons à choisir les concentrateurs paraboliques. Vu le très grand nombre d'inconvénients de l'utilisation de l'énergie solaire concentrée dans la zone de forte concentration, on est amené à la transporter par des fibres optiques au milieu désiré. Le choix de types de fibres dépend de l'objectif à atteindre, deux types peuvent être conçues pour le transport de l'énergie solaire concentrée : les fibres optiques fabriquées en Polyméthylméthacrylat ou en Silice.

Ainsi, nous avons pu voir à travers nos différentes expériences que les matériaux et la géométrie des différentes composantes du four solaire ont leur importance à la fois dans la capture d'un maximum d'énergie solaire mais aussi dans sa conservation en son sein.

## Références bibliographiques

- [BENA 11] Benahmed A., Temimi M. « étude des propriétés électriques des cellules photovoltaïques organiques ». Thèse de Magister, Université de Tlemcen, (2011), pp.7.
- [BENY 04] Benyarou F., « Conversion des énergies », Cours EN01, Université de TLEMEN, 2004.
- [BELA 00] Belaribi M., « Etude et Conception Assistée par Ordinateur D'un Système De Réfrigération par Voie Solaire », Thèse de Magister, Université de TLEMEN, 2000.
- [BERN 83] Bernard R., Menguy G., Schwartz M., « Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique et Applications », Technique et Documentation Lavoisier, Paris, (1983),
- [CHAK 03] Chaker A., « Promesses et Perspectives du Photothermique », Rev. Energ. Ren., (2003), ICPWE (Tlemcen), pp. 27-32.
- [CHEK 07] Chekirou W., Boukheit N., Kerbache T., « Différents Modes de Transfert de Chaleur Dans Un Absorbeur d'un Concentrateur Solaire Cylindro –Parabolique », Rev. Energ. Ren., (2007), ICRES (Tlemcen), pp. 21-28.
- [HAR 07] A. Harmim\*, M. Boukar et M. Amar ; « Etude expérimentale d'un cuiseur solaire de type boîte à trois réflecteurs plans et une surface d'ouverture inclinée » Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien B.P 478, Route de Reggane, Adrar, Algérie.
- [OGIL 03] Ogilvie K., « L'Abc des Technologies de l'Energie Renouvelables », Pollution Probe, Canada, (2003).
- [SACA 00] Sacadura J.F., « Initiation aux Transferts Thermiques », 6<sup>e</sup> tirage, Technique et Documentation, Lavoisier, (2000), Paris (France), pp. 445.
- [SENO 94] Senoussaoui N., « Etude et Réalisation D'un Concentrateur Parabolique, Mesure et Simulation ». Thèse de Magister, Université de Tlemcen, (1994).
- [SPIT 79] Spitz J., Aubert A., Behaghel J.M., Berthier S., Lafait J., Rivory J., « Matériaux Sélectifs Pour la Conversion Photothermique De L'énergie Solaire », Revue de Physique Appliquée, Vol. 14, (1979), PP. 67-80.
- [ZIDA 02] Zidani C., « Etude du transport d'énergie solaire par fibres optique. Application aux systèmes à concentrations ». Thèse de Magister, Université de Tlemcen, 2002.
- [ZIDA 13] Zidani C., Benyoucef B., « Conception et modélisation des systèmes photothermiques. Applications aux systèmes photothermiques alimentés par fibres optiques », thèse de Doctorat, (2013), Université de TLEMEN.

## Webographie

- [1] [www.clipsol.com/lenergie-solaire/tout-lhistorique/le-capteur-solaire.html](http://www.clipsol.com/lenergie-solaire/tout-lhistorique/le-capteur-solaire.html)

- [2] [www.web.co.bw/sib/somes\\_3\\_2\\_description.pdf](http://www.web.co.bw/sib/somes_3_2_description.pdf)
- [3] [www.wikipedia.org/wiki/solar\\_heater\\_dsc00632.jpg](http://www.wikipedia.org/wiki/solar_heater_dsc00632.jpg)
- [4] [www.wikipedia.org/wiki/Dish\\_stirling\\_at\\_odeillo.jpg](http://www.wikipedia.org/wiki/Dish_stirling_at_odeillo.jpg)
- [5] [www.wikipedia.org/wiki/Energie\\_solaire\\_thermique](http://www.wikipedia.org/wiki/Energie_solaire_thermique)
- [6] [www.lemonde.fr/web/article/0,1-0.html](http://www.lemonde.fr/web/article/0,1-0.html)
- [7] [www.nytimes.com/2008/02/01/technology/01solar.html](http://www.nytimes.com/2008/02/01/technology/01solar.html)
- [8] [www.ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/csp/ps10\\_final\\_report.pdf](http://www.ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/csp/ps10_final_report.pdf)
- [9] [www.actu-environnement.com/ae/news/espagne\\_solaire\\_concentration.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/news/espagne_solaire_concentration.php4)
- [10] [www.tenerrdis.fr/rep-edito/p-456.html](http://www.tenerrdis.fr/rep-edito/p-456.html)
- [11] [www.Wikipedia.org/wiki/Fibre\\_optique](http://www.Wikipedia.org/wiki/Fibre_optique).
- [12] <http://foursolaire.yolasite.com/quest-ce-quun-four-solaire.php>
- [13] <http://www.atlascuisinesolaire.com/four-solaire.php>
- [14] [http://www.ouest-atlantis.com/org/soleil/four\\_solaire\\_a\\_panneaux.htm](http://www.ouest-atlantis.com/org/soleil/four_solaire_a_panneaux.htm)

## **CHAPITRE III**

# **MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME**

## **PHOTOTHERMIQUE**

# Chapitre III

## Modélisation et simulation du système photothermique

### III.1. Introduction

L'utilisation croissante de l'énergie solaire concentrée a nécessité le développement de nouvelles techniques pour atteindre des températures de quelques milliers de degrés et qui peuvent résoudre quelques problèmes d'industrie. Parmi ces techniques, notons les systèmes photothermiques et en particulier les fours solaires sphériques et cylindriques. Leur utilisation en industrie est limitée par quelques inconvénients tels que l'utilisation des réflecteurs à symétrie axiale, l'adaptation de l'ouverture du dispositif, le récepteur au cône fermé par la réflexion de la lumière, le déplacement du concentrateur et du récepteur suivant le soleil. Cependant l'utilisation des fibres optiques remédie ces insuffisances de façon remarquable [1].

Après avoir modélisé l'énergie solaire incidente sur les concentrateurs solaires et après avoir décrit le mécanisme du transport de l'énergie solaire concentrée par fibres optiques, nous disposons à l'extrémité du conducteur de lumière une puissance radiative qui peut être utile. Parmi les applications que nous envisageons, c'est d'avoir une approche des systèmes thermiques destinés à l'obtention de très hautes températures.

Une modélisation des parties du système du transport de l'énergie solaire concentrée est nécessaire pour établir une relation directe entre l'énergie produite par ce système et la température fournie par le four solaire sphérique et cylindrique.

Cette modélisation permet l'estimation des propriétés d'adaptation du système à chaque période de l'année. Elle permet aussi de prévoir les caractéristiques de chaque partie du système en fonction des données météorologiques.

## III.2 L'énergie solaire

La radiation globale reçue par un capteur  $(\alpha, \gamma)$  se compose généralement de deux rayons (si nous négligeons la radiation dispersée par la terre) : direct et diffus. Ces rayons varient au hasard selon la hauteur du soleil, l'orientation du champ photothermique, le temps et l'état de visibilité atmosphérique.

En comprenant des méthodes empiriques Perrin De Brichambaut et formules approximatives Kasten nous établissons un modèle pour estimer l'énergie reçue par un détecteur d'orientation arbitraire

### III.2.1. Puissance instantanée

#### III.2.1.1. Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair)

Pour un ciel clair, les pouvoirs de radiation Directe ( $E_D$ ), diffus ( $E_D$ ) et global ( $E_G$ ) reçu par un capteur  $(\alpha, \gamma)$  incliné  $\beta$  en ce qui concerne le plan horizontal sont donnés par les relations suivantes

- **Modèle simplifié :**

$$\begin{cases} E_S = A_1 \cos(i) e^{\frac{-1}{A_2 \sin(h+2)}} \\ E_D = \left(\frac{1+\cos(\beta)}{2}\right) D_H + \left(\frac{1-\cos(\beta)}{2}\right) \alpha^* G_H \text{ avec } \begin{cases} D_H = B_1 (\sin h)^{0,4} \\ G_H = B_2 (\sin h)^c \end{cases} \\ E_G = E_S + E_D \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$D_H$  : Eclaircissement diffus reçus par une surface horizontale ( $W/m^2$ )

$G_H$  : Eclaircissement global reçus par une surface horizontale ( $W/m^2$ )

$\alpha^*$  : étant l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol).

$$\alpha^* \begin{cases} 0,2 \text{ à } 0,4 \text{ verdure} \\ 0,4 \text{ à } 0,8 \text{ solclair} \\ 0,8 \text{ à } 0,9 \text{ Neige} \end{cases}$$

$A_1, A_2, B_1, B_2, C$ , sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère

Etat de l'atmosphère	A1	A2	B1	B2	C
Ciel bleu foncé	1300	6	87	1150	1,15
Ciel bleu clair	1230	4	125	1080	1,22
Ciel bleu laiteux	1200	2,5	187	990	1,25

Tableau III.1 : Constantes caractérisant l'état du ciel

- **Modèle précis :**

A partir des résultats de mesures météorologiques disponibles pour un site [couleur du ciel ( $\beta_A$ ), hauteur d'eau condensable ( $w_e$ ), à tension de vapeur d'eau ( $e$ ), à visibilité au sol ( $v$ )...], on peut déterminer le facteur de trouble de Linke ( $T_L$ ) qui caractérise l'extinction du rayonnement solaire à travers l'atmosphère [BRIC 84]:

$\beta_A$  facteur de trouble Angstrom :

$$\begin{cases} \beta_A = 0,04 \text{ pour un ciel bleu foncé} \\ \beta_A = 0,08 \text{ pour un ciel bleu clair} \\ \beta_A = 0,12 \text{ pour un ciel bleu laiteux} \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_L = 2,5 + 16 \beta_A + 0,5 \log(w_e) \text{ avec } w_e(\text{cm}) \\ T_L \text{ facteur de trouble de Linke : } T_L = 1,6 + 16 \beta_A + 0,5 \log(e) \text{ avec } e \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right) \\ T_L = -2,4 + \frac{24}{\log(v)} \text{ avec } v \text{ (km)} \end{cases}$$

L'air masse  $m = (1 - 0,1Z)/\sin(h)$

avec :  $Z$  : Altitude du site (km)

$$\begin{cases} E_S = I_0 \cos(i) e^{\frac{m T_L}{0,9m+0,94}} \\ E_D = I_0 \sqrt{\sin h} (T_L - 0,5 - \sqrt{\sin h})/25 \\ E_G = E_S + E_D \text{ avec } I_0 = 1367 \text{ W/m}^2 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

### III.2.1.2. Estimation d'énergie instantanée (ciel couvert)

Le ciel est des cieux gris couverts complètement remplis des couches de nuage continues, plus ou moins denses optiquement et par lequel il n'est pas possible de distinguer le disque solaire. Sous ces conditions la radiation directe est non-existante et la radiation totale se compose radiation seulement diffuse.

Si la couverture de nuage est homogène nous pouvons estimer que la radiation de ciel diffuse est isotrope aussi bien que radiation diffuse de la terre. La radiation totale couverte est alors définie par [BRIC 84]:

$$E'_G = E'_D = K E_D (1 + 0,3 \sin h) \quad (\text{III.3})$$

$K$  est un coefficient qui dépend de l'état du ciel d'un site (avant d'être couvert par les nuages)

$K = 0,6$  pour le ciel bleu foncé,

$K = 0,3$  pour le ciel bleu clair,

$K = 0,15$  pour le ciel bleu laiteux.

### III.2.2. Estimation de l'énergie journalière

En utilisant les outils mathématiques d'intégration des formules de  $E_s$ ,  $E_D$ ,  $E_G$  sur toute la durée d'ensoleillement ( $D_j$ ), l'énergie journalière reçue par un capteur ( $\alpha, \gamma$ ) est :

$$E_{js} = \int_{H_{L'}}^{H_{C'}} E_s dH E_{jD} = \int_{H_{L'}}^{H_{C'}} E_D dH E_{jG} = \int_{H_{L'}}^{H_{C'}} E_G dH \quad (III.4)$$

L'intégration tout au long du jour ne fournit pas la bonne valeur parce qu'il est difficile de correctement évaluer le temps.

Pour tout capteur d'orientation, l'énergie quotidienne ( $E_{JS}$ =directe,  $E_{JD}$ =diffuse et  $E_{JG}$ =globale) reçu dépend du nombre d'heures de disc-jockey de soleil 'nous ne pouvons pas prédire. Pour l'estimation, nous avons entrepris une méthode numérique qui travaille le ciel bien clair [KLEI 76] :

$$E_{js} = \frac{1}{n} D'_j \sum_n E_s E_{jD} = \frac{1}{n} D'_j \sum_n E_D \quad E_{jG} = \frac{1}{n} D'_j \sum_n E_G \quad (III.5)$$

Avec : n : Nombre d'itérations

On appelle fraction d'insolation KIS le rapport de la durée d'insolation sur la durée du jour : ( $KIS = DIS/D_j$ ) et par ciel partiellement couvert, on multiplie ces valeurs par KIS (ou KIS moyen du mois).

### III.2.3. Estimation de l'énergie annuelle

L'énergie annuelle reçue pour un capteur d'orientation quelconque est déterminée par le programme de simulation en faisant la somme des énergies journalières.

$$E_{as} = \sum_i^N E_{js} E_{aD} = \sum_i^N E_{jD} E_{aG} = \sum_i^N E_{jG} \text{ avec } N = 365 (\text{ou } 366) \quad (III.6)$$

### III.2.4. Durée du jour et durée d'insolation

**a) Durée du jour :** La durée du jour ( $D_j$ ) est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil, elle est définie par la relation :

$$D_j = \frac{H_c - H_L}{15} = \frac{2}{15} \text{Arccos } T \text{ avec } T = -\tan \delta \tan \varphi \quad (III.7)$$

**b) Durée d'insolation :** La durée d'insolation ( $D_{IS}$ ) est la durée effective d'ensoleillement d'un capteur mesurée par un héliographe et définie à partir d'un seuil minimum ( $\approx 25$  W/m<sup>2</sup>). Pour Tlemcen nous l'avons modélisé par [KLEI 76]:

$$D_{IS} = D_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{c}{4(M-B)^2 + C^2} \quad (III.8)$$



### III.2.5. Dispositif proposé

#### III.2.5.1. Energie incidente horaire

Les données météorologiques disponibles d'un site sont généralement prises (ou enregistrées) sur un capteur horizontal. Elles sont pratiquement inexistantes sur un capteur d'orientation quelconque. Dans ce cas on fait appel à des modèles empiriques pour les adapter au champ photothermique. Les énergies par tranche horaire (moyennes mensuelles) à Tlemcen de l'Atlas Solaire de l'Algérie [ZIDA 03] sont représentées sur le tableau III.1.

Mois	Ray	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	S <sub>journee</sub>
Janvier	Dir S	0	113	280	410	502	549	3159
	Glo G	0	156	380	557	684	750	5054
Février	Dir S	18	127	249	351	424	462	3262
	Glo G	30	197	382	537	649	708	5006
Mars	Dir S	33	133	240	332	397	431	3132
	Glo G	62	231	403	550	657	713	5232
Avril	Dir S	45	159	277	378	450	488	3594
	Glo G	95	272	450	602	714	774	5814
Mai	Dir S	55	184	316	428	510	552	4090
	Glo G	114	298	481	639	757	819	6216
Juin	Dir S	56	186	317	430	512	554	4110
	Glo G	118	297	477	632	748	809	6234
Juillet	Dir S	62	210	362	492	587	636	4698
	Glo G	117	311	507	679	806	873	6586
Août	Dir S	60	213	373	512	612	665	4870
	Glo G	106	309	516	697	831	903	6724
Septembre	Dir S	46	185	337	468	563	612	4422
	Glo G	79	274	478	655	786	855	6254
Octobre	Dir S	26	160	315	447	543	592	4166
	Glo G	40	231	440	619	749	818	5794
Novembre	Dir S	6	113	261	384	471	516	3502
	Glo G	10	165	367	536	657	720	4910
Décembre	Dir S	0	96	264	397	490	538	3570
	Glo G	0	135	355	533	658	724	4810

Tableau III.2: Energie (en Wh/m<sup>2</sup>) incidente sur le capteur TEL à Tlemcen

#### III.2.5.2. Variation de la température ambiante

La température ambiante affecte le fonctionnement des éléments du système photothermique en particulier des concentrateurs solaires. Affectant directement les rendements des éléments du système, il est un paramètre essentiel au bon dimensionnement [AMAR 04]. La température ambiante dépend d'un grand nombre de paramètres climatologiques, elle est aussi difficilement modélisable. Le traitement des données météorologiques nous a permis de déterminer une plage de variations de cette grandeur et une modélisation journalière (Voir figure III.1).

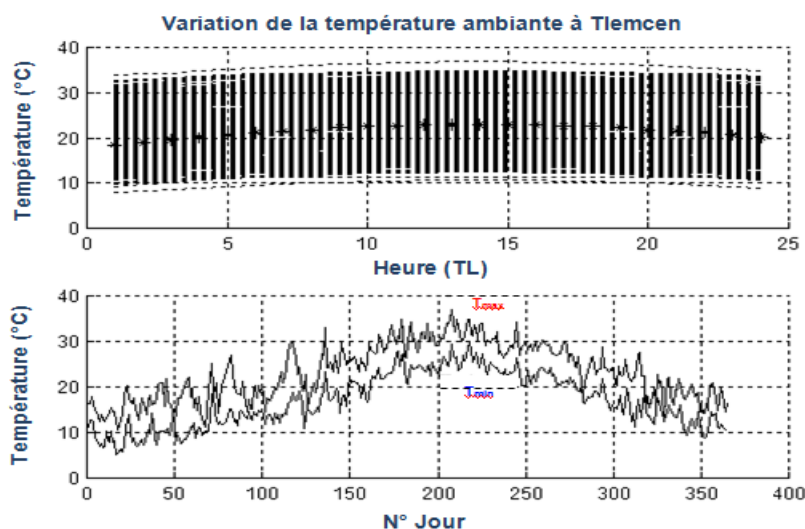


Figure III.1 : Variation de température ambiante à Tlemcen [AMAR 04]

Le traitement des données météorologiques de l'Office National de Météorologie (station Zénata Tlemcen 1999-2000-2001) nous a permis de déterminer les températures moyennes journalières (sur les 3ans) maximales et minimales (voir figure III.1) du site de Tlemcen. On constate que la plage de variations de la température moyenne journalière pendant la durée d'ensoleillement d'un système photothermique est de 1°C à 5°C et durant l'année est de 7°C à 37°C. Les moyennes mensuelles des températures journalières maximales et minimales sont représentées sur le tableau suivant :

Mois	Températures ambiantes Moyenne (°C)	
	Maximales	Minimales
Janvier	17,26	4,66
Février	19,2	5,57
Mars	20,97	8,38
Avril	21,78	10,33
Mai	24,88	12,92
Juin	29	17
Juillet	31,89	19,09
Août	30,66	20,04
Septembre	29,26	17,44
Octobre	25,02	13,81
Novembre	21,01	10,71
Décembre	19,03	6,94

Tableau III.3 : Moyennes mensuelles des températures journalières du mois

### III.2.5.3. Energie reçue par un capteur photothermique plan

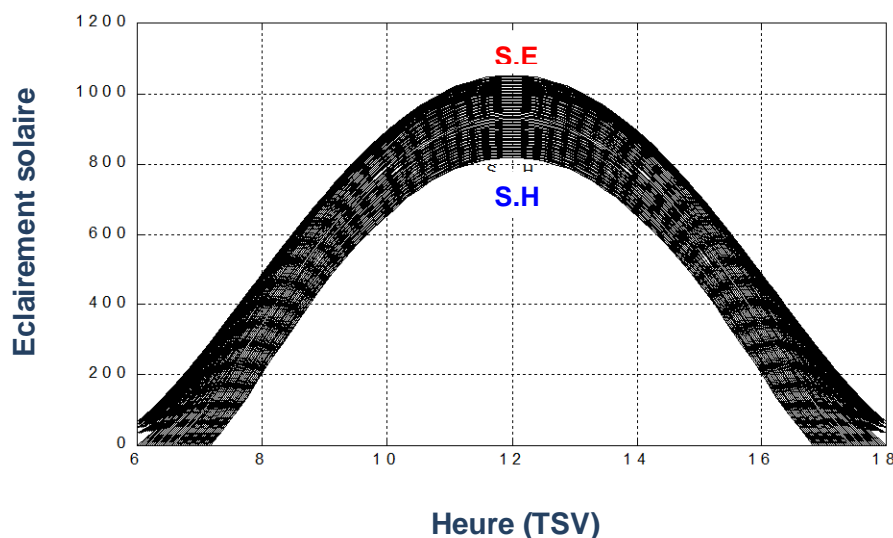
Afin de permettre une conception optimale des systèmes photothermiques, nous avons élaboré un programme d'estimation d'énergie incidente sur le champ de captation. Ce programme introduit les plages de variations d'un grand nombre de paramètres influençant les rendements des éléments du système (orientation, durée d'insolation, ...).

#### III.2.5.3.1. Energie incidente

L'estimation de l'énergie instantanée incidente sur un champ photothermique, est basée sur un modèle dérivé des modèles empiriques de P. De Brichambaut et Kasten [BRIC 84] pour les différents états du ciel. La simulation de cette énergie sur toute l'année permet de cerner la plage de variation et de prédire les performances nécessaires à la conception des systèmes photothermiques. La connaissance de cette énergie à chaque instant de la journée et de l'année permet l'analyse fine du système de captation. Elle permet aussi l'étude du comportement du système vis-à-vis le four solaire alimenté par fibres optiques.

Nous avons établi un programme de simulation en utilisant un code de calcul numérique pour l'estimation d'énergie captée pour les différentes orientations du champ de captation de notre système. Ce programme permet l'optimisation des énergies incidentes et la détermination des plages de variations horaires, mensuelles et annuelles.

La simulation d'énergie instantanée sur un capteur photothermique plan d'orientation TEL à Tlemcen et par ciel bleu clair est représentée sur la figure III.2:



**Figure III.2 : Plage de variation de l'éclairement solaire sur un capteur TEL à Tlemcen**

La plage de variations de l'énergie instantanée sur une journée à Tlemcen varie de 0 à 800 W/m<sup>2</sup> au solstice hivers et de 0 à 1100 W/m<sup>2</sup> au solstice été. Cette plage varie à 12h TSV de 800 W/m<sup>2</sup> à 1100 W/m<sup>2</sup> durant l'année sur un capteur TEL et par temps clair.

La simulation montre que l'orientation face au sud du capteur photothermique est privilégiée pour un meilleur captage d'énergie solaire.

### III.2.5.3.2. Choix du type de champ photothermique

Parmi les champs photothermiques recevant le maximum d'énergie journalière et annuelle, on trouve les champs d'orientation Tel, avec suivi 1 axe et avec suivi 2 axes.

Par ciel bleu clair, nous simulons la variation de l'énergie instantanée sur les trois types de champs. Nous constatons qu'aux équinoxes, l'énergie estimée par les trois capteurs à midi TSV prend la même valeur, tandis qu'aux solstices cette variation est appréciable pour le capteur deux axes tel que schématisée sur la Figure III.3.

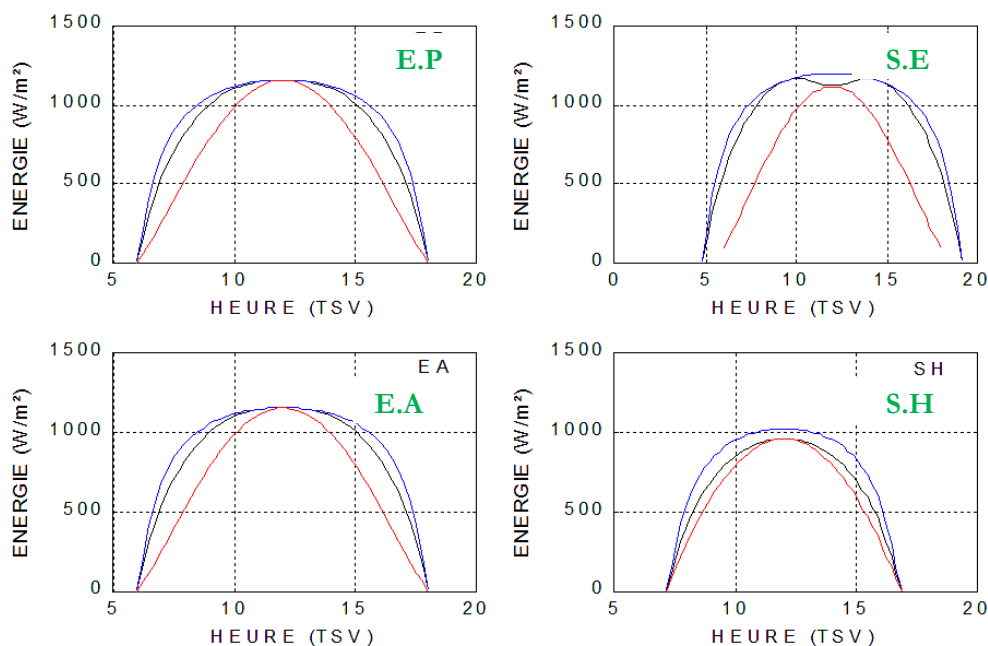
La valeur maximale d'énergie instantanée captée à midi TSV pour :

$$\text{Capteur 1 axe : } E_{G\text{Max}} = 1050,7 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Capteur 2 axes : } E_{G\text{Max}} = 1086,5 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Capteur TEL : } E_{G\text{Max}} = 1034,2 \text{ W/m}^2$$

- Capteur 2 axes
- Capteur 1 axe
- Capteur Tel



**Figure III.3 : Estimation d'énergie globale instantanée incidente aux équinoxes et solstices sur les capteurs (1 axe, 2 axes et TEL) pour un ciel bleu clair**

L'écart d'énergie entre les capteurs deux axes et un axe à 12h TSV est:  $35,3 \text{ W/m}^2$ .

L'écart d'énergie entre les capteurs deux axes et TEL à 12h TSV est:  $52,5 \text{ W/m}^2$ .

De part et d'autre de 12h TSV, on note un écart appréciable entre le capteur qui suit le soleil et le capteur TEL.

Pour prédire le type de capteur à utiliser dans le système photothermique, il est nécessaire d'estimer l'énergie journalière afin de répondre au besoin d'énergie demandée.

L'écart important d'énergie journalière est enregistré pour les capteurs un axe et deux axes par rapport au capteur Tel durant la période EP-SE-EA.

### III.3. Modélisation du TESC par fibres optiques

La modélisation du système du transport de l'énergie solaire concentrée nécessite une analyse complète des paramètres géométriques. Cette analyse est optimale lors du couplage entre le concentrateur parabolique et la fibre optique.

Pour déterminer les meilleures conditions de couplage entre un concentrateur et le conducteur de lumière qui lui est associé, il est nécessaire de préciser la nature du concentrateur le plus adéquat. Pour aboutir à ce choix dans le cas général, il faut caractériser la répartition énergétique fournie dans un plan quelconque par un concentrateur éclairé par le soleil, tout en sachant que la connaissance des notions de la topographie énergétique est insuffisante. La limite de l'ouverture angulaire de la fibre impose aussi de connaître les conditions angulaires de cet éclairage.

Avec ces restrictions, on est amené au concentrateur susceptible de fournir le flux maximal dans le disque constitué par la face d'entrée du conducteur.

La symétrie cylindrique des conducteurs de lumière limite ce choix parmi les concentrateurs ayant la symétrie de révolution.

Par ailleurs, les ouvertures admissibles des faisceaux de lumière après concentration sont trop importantes pour que les méthodes de l'optique de Gauss soient satisfaites. En particulier, il n'y a pas lieu de considérer des « images du soleil » au sens strict du terme.

L'optimisation de la répartition énergétique dépend de la nature du concentrateur, du plan sur le quel elle est étudiée et de la brillance du soleil. Cette optimisation est atteinte, si toutes les autres conditions sont parfaites.

Chaque fibre optique possède un cœur pur et transparent d'indice de réfraction  $n_1$  et d'un revêtement appelé Cladding pur et transparent aussi et qui possède un indice de réfraction  $n_2$  inférieur à  $n_1$ .

L'angle d'admission d'une fibre optique est caractérisé par un angle limite  $\theta_{max}$  défini par la relation suivante :

$$NA = \sin \theta_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (III.9)$$

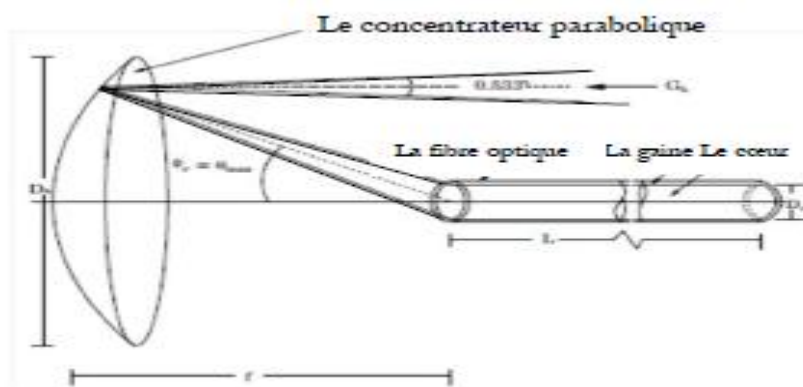
Avec NA : ouverture numérique ;

$n_1$  : Indice de réfraction du Cœur de la fibre ;

$n_2$  : Indice de réfraction du Cladding de la fibre.

Le coefficient de réflexion interne s'écrit :  $\mu = 1 - x$ , ( $x \ll 1$ ). Ceci est dû du fait que les diélectriques constituant le cœur et la gaine ne sont pas parfaits, l'indice de réfraction relatif est donc mathématiquement un nombre complexe. Cette atténuation s'explique par la notion de décalage transversal (Effet Gauss-Hanschen) qui se produit lors de la réflexion totale : l'onde associée à un pinceau lumineux élémentaire parcourt une très légèrement absorbant. Ce phénomène négligeable pour une seule réflexion est bien évident, mais devient sensible dans une fibre optique en présence d'un grand nombre de réflexions [ZIDA 02].

Il est important de mentionner que l'angle  $\phi_r$  du concentrateur parabolique (voir la figure III.4) est inférieur ou égal à l'angle d'acceptance du conducteur de lumière. Dans les conditions optimales, pour s'assurer que les rayons lumineux qui pénètrent dans la fibre et qui se propagent par réflexions totales internes, la valeur maximale de l'angle  $\phi_r$  du concentrateur doit être égale à  $\theta_{max}$ .



**Figure III.4 : Couplage entre le concentrateur parabolique et la fibre optique**

$$\phi_r = \theta_{max} \quad (III.10)$$

Pour le concentrateur parabolique, la relation entre la distance focale  $f$  et le diamètre  $D_a$  est donnée par :

$$\frac{f}{D_a} = \frac{1}{4 \tan(\frac{\phi_r}{2})} \quad (III.11)$$

D'autre part le diamètre de la surface réceptrice du concentrateur est obtenu par :

$$D_r = \frac{D_a \sin 0,267^\circ}{\sin \phi_r \cos(\phi_r + 0,267^\circ)} \quad (III.12)$$

Tenant en compte que la valeur de la concentration est le rapport de la surface de l'ouverture du concentrateur  $A_a$  avec la surface réceptrice  $A_r$ , la concentration maximale est obtenu par l'interception du rayonnement spéculaire réfléchi dans le cône avec un angle de  $0,533^\circ + \delta$  :

$$C_{max} = \left(\frac{D_a}{D_r}\right)^2 = \frac{\sin^2 \theta_{max} \cos^2(\theta_{max} + 0,267^\circ + \frac{\delta}{2})}{\sin^2(0,267^\circ + \frac{\delta}{2})} \quad (\text{III.13})$$

Ou  $\delta$  est une mesure des erreurs angulaires de la surface de réflexion et que  $0,267^\circ$  est le demi-angle du cône incident du rayonnement solaire. Il est important d'indiquer aussi que le diamètre du récepteur  $D_r$  est remplacé par le diamètre  $D_c$  du cœur la section d'entrée des câbles à fibres optiques. Tenant compte des équations (III.3) et (III.5), on peut déduire la distance focale optimale  $f_o$  :

$$f_o = \frac{D_c}{4 \tan\left(\frac{\theta_{max}}{2}\right)} (C_{max})^{1/2} \quad (\text{III.14})$$

Après avoir établi les paramètres géométriques du système, nous déterminons l'énergie à la sortie de la fibre optique.

Lorsque la fibre optique est placée au foyer, l'énergie reçue par le concentrateur parabolique est donnée par la relation suivante :

$$Q = \pi f^2 \rho_m G_b (\sin^2 \phi_r - \sin^2 \phi_{min}) \quad (\text{III.15})$$

Avec  $f$  : Distance focale ;

$\rho_m$  : Reflectance de la surface réceptrice du concentrateur ;

$\phi_r$  : Angle du bord du concentrateur ;

$\phi_{min}$  : Angle d'ombre ;

$G_b$  : Irradiance du rayonnement solaire.

Nous supposons que l'image du soleil soit sur le plan focal, c'est-à-dire que nous avons un concentrateur idéal.

En combinant les équations (III.13) et (III.15), nous obtenons le maximum d'énergie à l'entrée de la fibre optique  $Q_{in}$  et qui est exprimée comme suit :

$$Q_{in} = (1 - \rho_f) \frac{\pi D_c^2}{16 \tan^2\left(\frac{\theta_{max}}{2}\right)} C_{max} \rho_m G_b (\sin^2 \theta_{max} - \sin^2 \phi_{min}) \quad (\text{III.16})$$

Ou  $\rho_f$  : Coefficient de réflexion des rayons non polarisés au moment du passage du rayonnement de l'environnement au matériau du cœur de la fibre optique.

Par conséquent les pertes sont prises en compte par  $(1 - \rho_f)$ .

Pour les capteurs à concentration l'énergie se concentre optiquement avant d'être transformée en chaleur. L'énergie reçue par le plan focal est donnée par la relation suivante :

$$Q_f = Q_{in} + U_r A_{of} (T_f - T_0) \quad (\text{III.17})$$

Avec  $U_r$  : Coefficient du transfert de la chaleur du récepteur à la température ambiante.

$T_0$  : Température ambiante (K)

$T_f$  : Température du récepteur (K)

D'autre part l'énergie transportée par la fibre optique est donnée par la relation suivante :

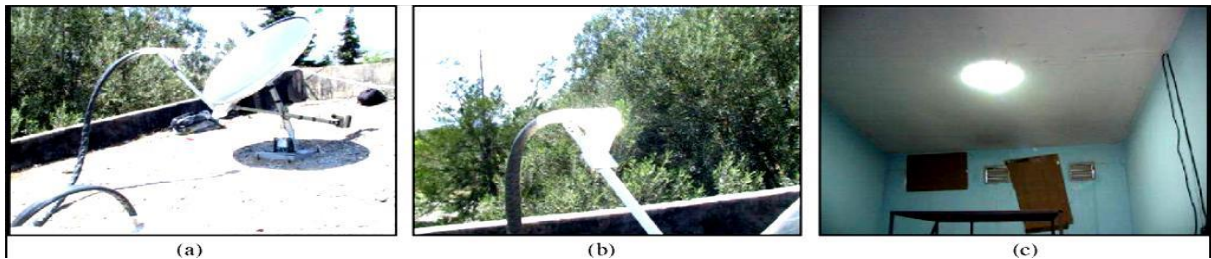
$$Q_{out} = 10^{-\left(L \frac{dB_{loss}}{10}\right)} Q_{in} \quad (III.18)$$

Avec L : Longueur de la fibre (m),

dB : Pertes dans la fibre (dB/m). [ZIDA 13]

### III.3.1. Description du système du TESC par un câble à fibre optique

Notre système est composé d'un concentrateur parabolique muni d'un système de suivi du soleil à deux axes et un câble constitué des plusieurs fibres optiques pour transporter le maximum d'énergie solaire. Ce dispositif est installé à l'Institut de l'Energie Solaire à l'Université de Ege en turquie (voir figure III.5)



**Figure III.5 : Système du transport de l'énergie solaire concentrée par un câble à fibres optiques**

**(a): Apparence générale du système,**

**(b): Concentration de l'énergie solaire dans le plan focal,**

**(c): Energie solaire issue du système [KAND 08]**

Le concentrateur utilisé est une simple antenne satellite traitée en Chrome pour avoir une bonne réflectivité ; la poursuite du soleil en deux axes est assurée par un système de carte électronique intégrée avec quatre capteurs et deux moteurs.

L'utilisation d'un filtre optique pour protéger les fibres optiques des dommages thermiques, est nécessaire car les filtres optiques ont la propriété de ne pas transmettre les rayonnements Infrarouge (IR) et Ultraviolet (UV) avec une transmission élevée du rayonnement visible, ils ont une faible dilatation thermique, une résistance aux chocs thermiques avec une bonne stabilité en haute température, elle peut aller jusqu'à 450°C pendant des longues périodes (jusqu'à 10 h).

L'énergie solaire concentrée n'est pas transportée par un fluide, elle est transférée par un câble à fibres optiques, la lumière est diffusée par l'effet de dispersion Rayleigh à l'entrée du câble ; cet effet peut entraîner un fardeau excessif de chaleur. Pour le minimiser, deux types de



fibres optiques de diamètres différents doivent se réunir pour la constitution du câble (type 1 : 3,0 mm et type 2 : 2,5 mm) [KAND 09]:

Trente et une fibres de types 1 sont placées au centre du câble et soixante-quatre fibres de type 2 sont installées sur leur périphérie. Les propriétés spectrales de ce câble à fibres optiques sont très performantes pour le transport de l'énergie solaire concentrée par fibres optiques.

Le tableau (III.4) indique les paramètres essentiels du système. Le câble à fibres optiques utilisé est composé des fibres optiques possédant un large diamètre du cœur fabriqué en Polyméthylméthacrylat L'angle solide du concentrateur est donné par l'équation (III.3).

L'atténuation du câble est de 300dB/km, la réflectivité du concentrateur est de 0.60.

Paramètres	Valeur	Paramètres	Valeur
$D_a(\text{m})$	1,04	$\theta_{max}(\text{°})$	30,7
$D_r(\text{m})$	0,03	$\theta_{min}(\text{°})$	0
$A_{0f}(\text{m}^2)$	0,00049	$\theta_r(\text{°})$	36,87
$A_a(\text{m}^2)$	0,85	$C_{max}$	1731
$f(\text{m})$	0,78	$\rho_m$	0,60
$f_a(\text{m})$	0,87	$\delta/2(\text{°})$	0,39
$L(\text{m})$	3	$dB_{loss}(\text{dB/m})$	0,30

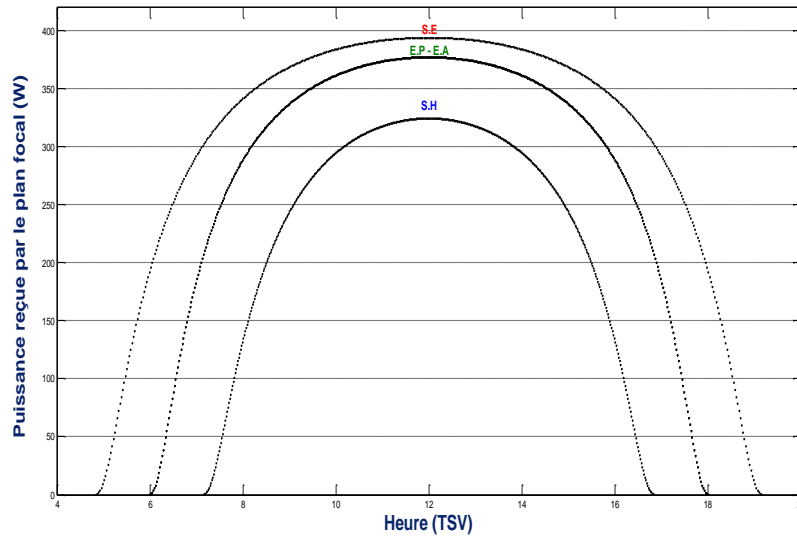
**Tableau III.4 : Paramètres du système du transport de l'énergie solaire concentrée par un câble à fibres optiques.**

La concentration maximale est estimée à 1731.

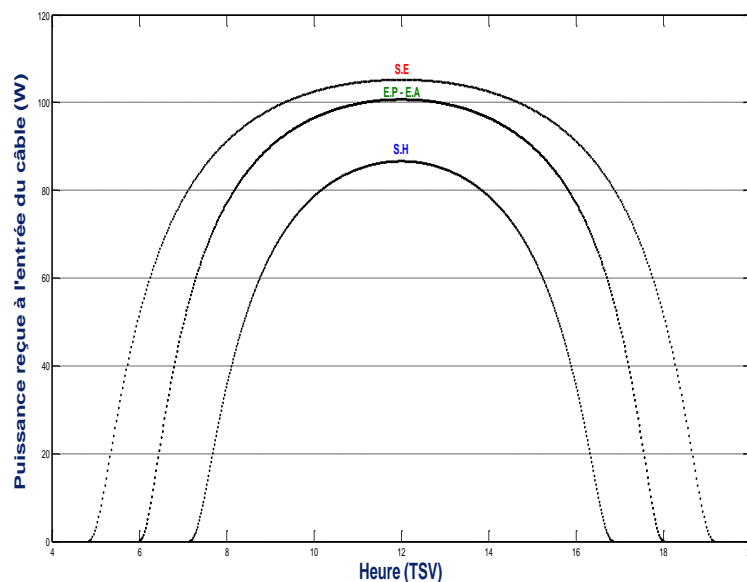
### III.3.1.1. Résultats du dispositif proposé

Le système est composé d'un concentrateur parabolique muni d'un système de suivi du soleil à deux axes et un câble constitué de plusieurs fibres optiques pour transporter le maximum d'énergie solaire. Le concentrateur utilisé est une simple antenne satellite traitée en chrome. Le câble à fibres optiques est composé de fibres optiques possédant un large diamètre du cœur fabriqué en Polyméthylméthacrylat (PMMA). La longueur du câble est de 3 m.

L'angle d'acceptance est déterminé par l'équation (1). L'atténuation du câble est de 300 dB/km, la réflectivité du concentrateur est 0,60. La concentration maximale est estimé 1731.



**Figure III.6 : Puissance reçue par le concentrateur parabolique pour les solstices et équinoxes**



**Figure III.7 : Puissance maximale reçue à l'entrée du câble à fibres optiques (W) pour les solstices et les équinoxes**

La figure III.6 illustre la puissance moyenne quotidienne reçue par le concentrateur parabolique pour les solstices et les équinoxes. Nous notons qu'à partir du graphe cette puissance peut atteindre 324,70 W à midi TSV au solstice hiver, 377,46 W aux équinoxes printemps et automne. Pour le solstice été, les valeurs dépassent 394 W.

De même, la figure III.7 montre la variation de la puissance moyenne quotidienne reçue à l'entrée du câble à fibres optiques. Nous remarquons que la puissance est de 86,68 W à midi TSV au solstice hiver, 100,77 W aux équinoxes printemps et automne. Les valeurs dépassent

105,24 W au solstice été à midi TSV. L'énergie solaire concentrée est exposée à un certains nombres de pertes avant de se pénétrer dans le câble à fibres optiques. [ZIDA 13]

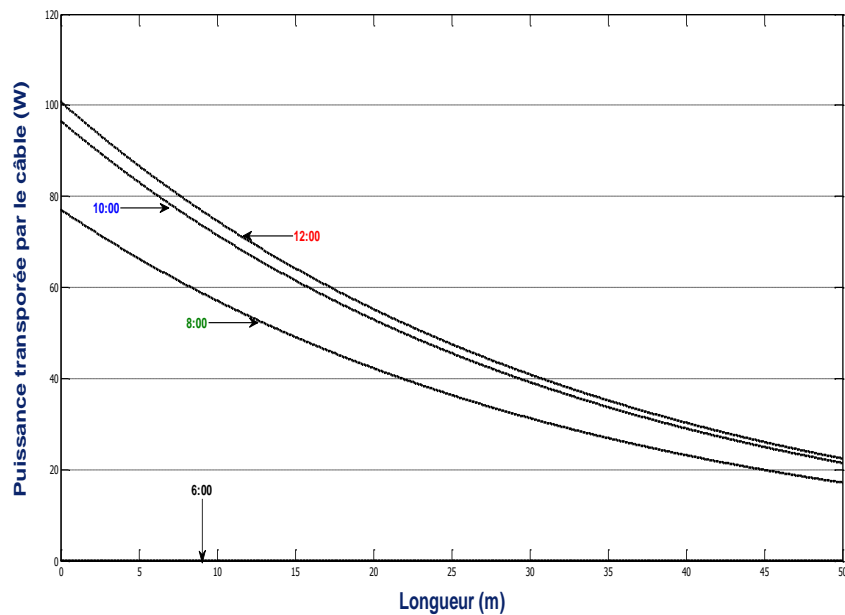


Figure III.8 : Variation de la puissance aux équinoxes, en fonction des différentes longueurs du câble à fibres optiques

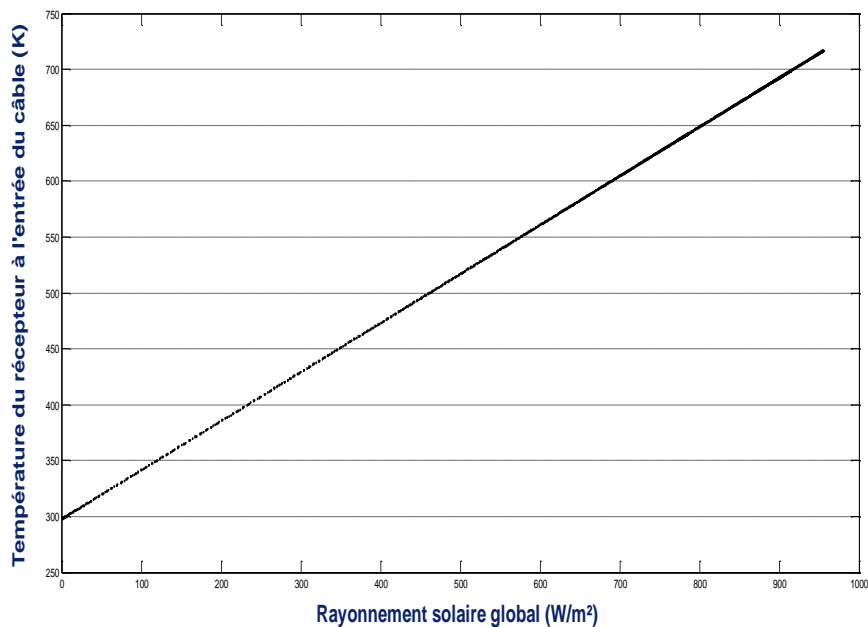


Figure III.9 : Variation entre le rayonnement solaire global et la température du récepteur

Le 21 Mars (équinoxe printemps), à 12 TSV, le rayonnement global reçu est de 1034 W/m<sup>2</sup>, le rayonnement direct est estimé à 914 W/m<sup>2</sup>, la température ambiante est de 298 K

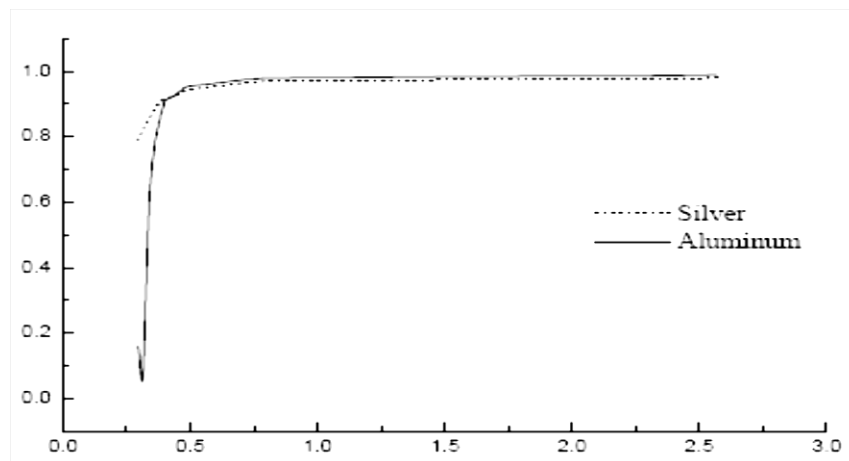
(25°C) et la vitesse du vent vaut 2 m/s. La température calculée du récepteur au point focal est de 699 K (424°C).

Cette température du récepteur au point focal est de 424°C, qu'on ne peut pas la dépasser car on est limité par la température de fusion de ces câbles à fibres optiques. Ces limitations ne nous permettent pas d'atteindre nos objectifs pour la réalisation des fours solaires ; c'est pour cette raison que nous avons adopté un autre modèle pour le transport de l'énergie solaire concentrée. [ZIDA 13]

### III.3.2. Description du système du TESC par une fibre optique

Notre système est composé d'un concentrateur parabolique muni d'un système de suivi du soleil à deux et une fibre optique pour transporter l'énergie solaire concentrée.

L'énergie solaire incidente se concentre par un miroir parabolique possédant une surface réfléchissante, son diamètre est de 21,8 cm et sa distance focale est de 51,9 cm, la réflectivité du miroir, la concentration maximale est donnée par l'équation III.13.



**Figure III.10: Courbes de réflectance spectrale d'une surface réfléchissante fabriquée en Aluminium et en Argent [HEGG 88]**

La fibre optique utilisée pour le transport de l'énergie solaire est fabriquée en Silice  $\text{SiO}_2$ , son diamètre est de 5 mm, L'ouverture est estimée à  $12^\circ$  et son atténuation est de 250 dB/km (Voir figure III.10).

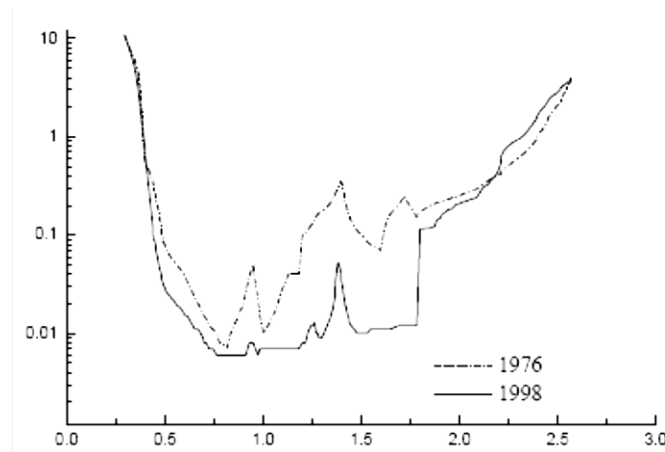


Figure III.11: Comparaison des fibres optiques fabriquées en  $\text{SiO}_2$  en 1976 [KATO 76] et en 1998 [2]

Paramètres	Valeur	Paramètres	Valeur
$D_a$ (m)	0,218	$\phi_{\min}$ ( $^\circ$ )	0
$D_c$ (m)	0,005	$\phi_r$ ( $^\circ$ )	12
$A_{of}$ ( $\text{m}^2$ )	$1,96 \cdot 10^{-5}$	$C_{\max}$	1900
$L$ (m)	3	$f_0$ (m)	0,519
$\text{dB}_{\text{loss}}$ (dB/m)	0,25	$\rho_m$	0,95
$\theta_{\max}$ ( $^\circ$ )	12	$\delta/2$ ( $^\circ$ )	0

Tableau III.4: Paramètres du système du transport de l'énergie solaire concentrée par une fibre optique fabriquée en  $\text{SiO}_2$

### III.3.2.1. Résultats du dispositif proposé

Le système est composé d'un miroir parabolique muni d'un système de suivi du soleil à deux axes et une fibre optique pour transporter l'énergie solaire concentrée.

L'énergie solaire incidente se concentre par un miroir parabolique possédant une surface réfléchissante, son diamètre est de 21,8 cm et sa distance focale est de 51,9 cm. La réflectivité du miroir est de 0,95. La concentration maximale est estimée à 1900.

La fibre optique utilisée pour le transport de l'énergie solaire est fabriquée en Silice  $\text{SiO}_2$ , son diamètre est de 5 mm et sa longueur est de 3 m. L'ouverture est estimée à  $12^\circ$  et son atténuation est de 250 dB/km.

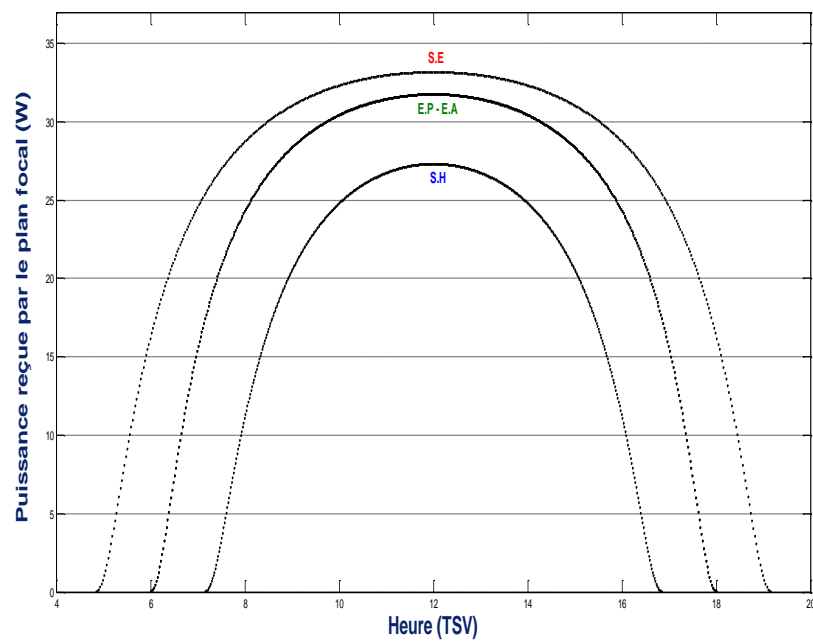


Figure III.12 : Puissance reçue par le plan focal du miroir parabolique pour les solstices et équinoxes

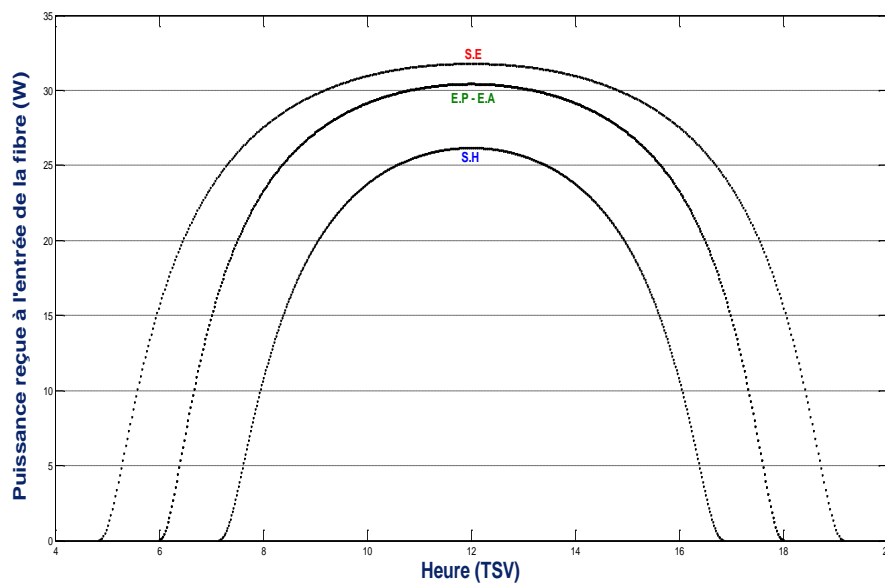


Figure III.13 : Puissance maximale reçue à l'entrée de la fibre optique (W) pour les solstices et les équinoxes

La figure III.12 illustre la puissance moyenne quotidienne reçue par le concentrateur parabolique pour les solstices et les équinoxes. A partir du graphe nous remarquons que la puissance peut atteindre 27,33 W à midi TSV au solstice hiver, 31,77 W aux équinoxes printemps et automne. Pour le solstice été, les valeurs dépassent 33,18 W.

De même, la figure III.13 montre la variation de la puissance moyenne quotidienne reçue à l'entrée du câble à fibres optiques. Nous remarquons que la puissance est de 26,11 W à midi TSV au solstice hiver, 30,43 W aux équinoxes printemps et automne. Les valeurs dépassent 31,78 W au solstice été à midi TSV.

L'énergie solaire concentrée est exposée à un certain nombre de pertes avant de pénétrer dans la fibre optique.

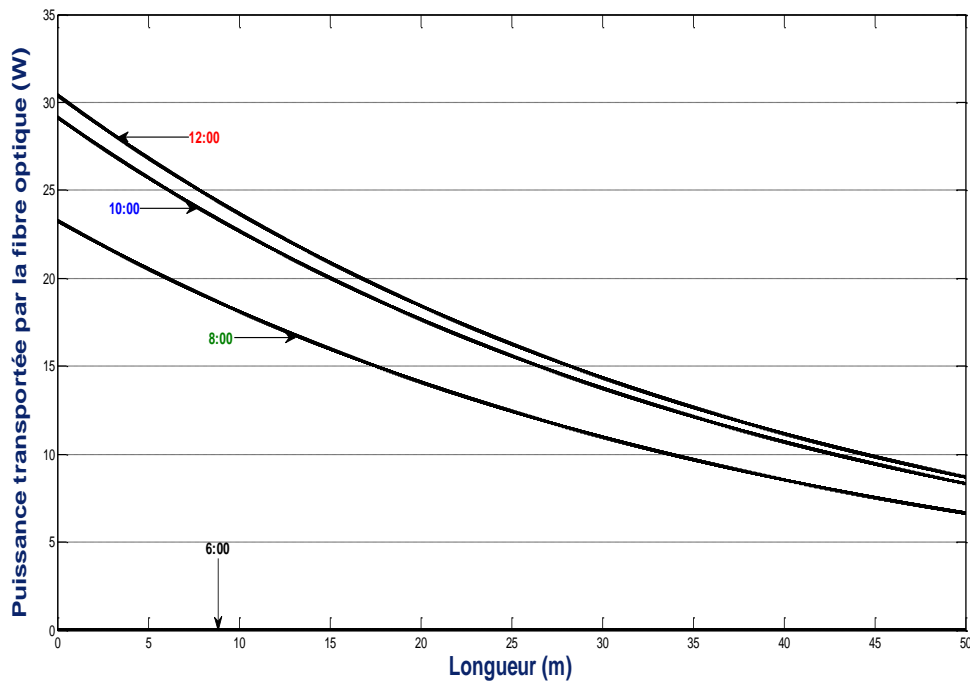


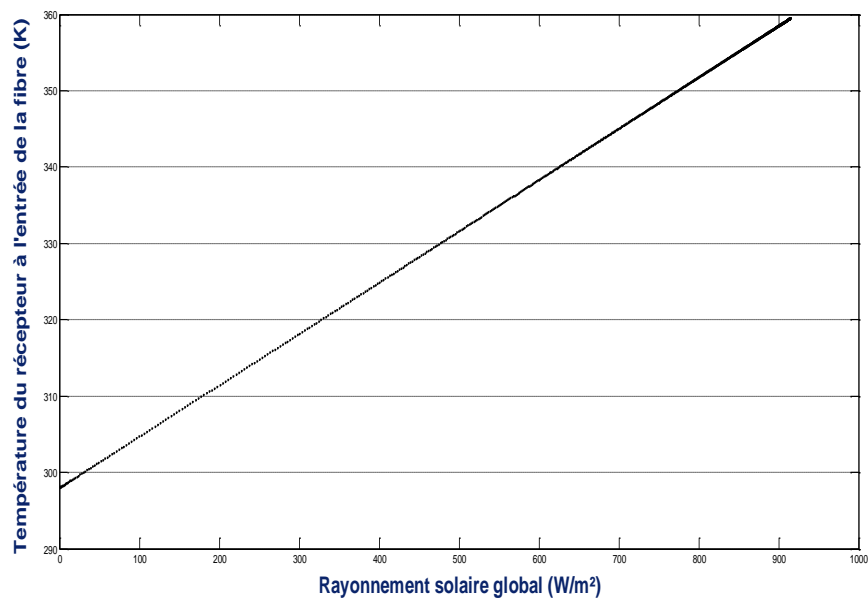
Figure III.14 : Variation de la puissance aux équinoxes, en fonction des différentes longueurs de la fibre

	L = 0 m	L = 3 m
6 h (TSV)	0,031 W	0,029 W
8 h (TSV)	23,29 W	21,16 W
10 h (TSV)	29,16 W	27,05 W
12 h (TSV)	30,43 W	28,23 W

Tableau III.5 : Variation horaire de la puissance de sortie de la fibre optique pour L = 0 m et L = 3 m

Pour le 21 Mars (équinoxe printemps), de 6h (lever du soleil) à 12h (TSV) la variation de la puissance en fonction des différentes longueurs de la fibre optique est obtenue par la figure III.14. Nous observons que le flux de chaleur diminue, quand la longueur de la fibre augmente. Bien que l'atténuation augmente avec la longueur.

D'après la figure III.14, nous constatons qu'à 12h (TSV) la puissance à l'entrée de la fibre optique est de 30,16 W diminue jusqu'à 28,23 W pour une longueur de 3 m. [ZIDA13]



**Figure III.15 : Variation entre le rayonnement solaire global et la température du récepteur**

Concernant la courbe représentative de la variation du rayonnement solaire global et la température du récepteur donnée sur la figure III.15, nous remarquons que cette température augmente avec l'augmentation de la valeur du rayonnement solaire global.

Une tendance linéaire est définie entre le rayonnement global et la température.

Le 21 Mars (équinoxe printemps), à 12 TSV, le rayonnement global reçu est de 1034 W/m<sup>2</sup>, le rayonnement direct est estimé à 914 W/m<sup>2</sup>, la température ambiante est de 298 K (25°C) et la vitesse du vent vaut 2 m/s. La température d'équilibre du récepteur au point focal est de 359,5 K (86,35°C).

Cette température d'équilibre du récepteur au point focal à l'entrée de la fibre optique est de 359,5 K (86,35°C). Ces bons résultats de température confèrent à notre modèle sa fiabilité.

La fibre optique fabriquée en Silice résiste mieux aux hautes températures et son utilisation dans la conception des systèmes photothermiques est recommandée.



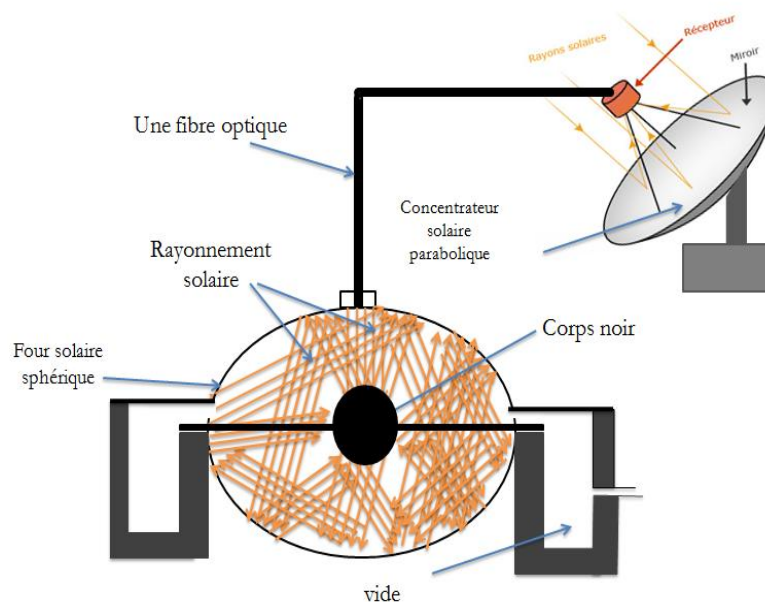
### III.4. LE FOUR SOLAIRE SPHERIQUE ET CYLINDRIQUE

#### III.4.1. Modélisation d'un four solaire sphérique alimenté par fibre optique

Après avoir décrit le mécanisme du transport de l'énergie solaire concentrée par fibres optiques, la puissance radiative disposée à l'extrémité du conducteur de lumière peut nous servir à concevoir un dispositif. Ce dispositif appelé four solaire sphérique alimenté par fibres optiques nous permet d'avoir une approche des systèmes thermiques destinés à l'obtention de très hautes températures.

##### III.4.1.1. Dispositif proposé

La figure III.16 décrit le système du four solaire sphérique alimenté par fibre optique proposé dans cette étude.



**Figure III.16 : Dispositif proposé d'un four solaire sphérique alimenté par fibre optique**

Notre nouvelle conception se compose d'un système du transport de l'énergie solaire concentrée, le deuxième système porte sur un four solaire sphérique alimenté par fibre optique.

En effet, contrairement à ce qui se passe avec les fours solaires traditionnels, notre prototype est constitué d'une enceinte sphérique entourant un récepteur éclairé par une fibre optique. Le récepteur reçoit le rayonnement d'un corps noir à la température d'équilibre de surface du soleil.

En créant le vide autour du récepteur, nous éliminons les pertes par convection. Du fait que la paroi intérieure est réfléchissante, les pertes radiatives sont minimisées.

Le récepteur que nous utilisons est une sphère d'aluminium, sa surface est noircie par une oxydation anodique pour la rendre plus absorbante au rayonnement solaire.

L'enceinte se réalise à partir d'un ballon de verre de 20 cm de diamètre qui peut être scié suivant un grand cercle. L'une des deux hémisphères est fixée sur un cylindre métallique creux utilisé à la fois comme socle et comme pièce de liaison vers une pompe à palettes. L'autre hémisphère comporte une traversée étanche permettant le passage de la fibre optique. Enfin, le récepteur proprement dit est maintenu par une baguette de quartz de 600  $\mu\text{m}$  de diamètre qui limite les échanges par conduction avec l'enceinte.

On définit pour le récepteur les paramètres suivants :

$m$  : Masse (Kg),

$S_r$  : Surface ( $\text{m}^2$ ),

$T_r$  : Température absolue (K),

$C$  : Chaleur massique du matériau (J/Kg K)

$\alpha_s$  : Coefficient d'absorption moyen de sa surface pour un rayonnement solaire,

$\alpha_T$  : Coefficient d'absorption moyen de sa surface pour un rayonnement émis à la température  $T$ .

Remarquons que les trois dernières grandeurs dépendent de la température, Toutefois, l'écart entre la température d'équilibre et la température ambiante est suffisamment petit pour que ces paramètres puissent être considérés comme constants dans ce domaine de variation.

On définit pour l'enveloppe le paramètre suivant :

$R$  : Paramètre de « renvoi » du rayonnement, Il tient compte essentiellement du coefficient de réflectivité de la paroi interne, mais aussi des défauts géométriques de la surface de l'enceinte et des écarts de centrage entre les deux sphères.

Il convient de définir ce paramètre pour le rayonnement solaire ( $R_s$ ) et pour le rayonnement émis à la température  $T$  ( $R_T$ ). Cependant, seule la composante due au coefficient de réflectivité dépend de la nature du rayonnement.

Nous admettons qu'elle prend sensiblement la même valeur pour le rayonnement solaire et le rayonnement propre du récepteur, On pose donc :  $R_s = R_T = R$ , [ZIDA 13]

Paramètres	Valeur
$S_r(\text{m})$	$3.14 \cdot 10^{-4}$
$T_0$ (K)	298
$\alpha_s$	0,5
$\alpha_T$	0,6
$R$	0,7

**Tableau III.6 : Paramètres essentielles du four solaire sphérique proposé**

### III.4.1.2. Bilan énergétique du récepteur

Le récepteur porté à la température  $T_r$ , reçoit du conducteur optique une puissance  $p_s$  dont il absorbe la fraction  $\alpha_s$ , Il réfléchit le complément,  $(1-\alpha_s)P$ , qui est son tour renvoyé par l'enveloppe vers le récepteur qui absorbe à nouveau la fraction  $\alpha_s$  et ainsi de suite ...

Finalement la puissance provenant du soleil et effectivement absorbé s'écrit [CARI 85] :

$$P_{as} = \alpha P_s [1 + R(1 - \alpha_s) + R(1 - \alpha_s)^2 + \dots] = \frac{\alpha_s P_s}{1 - R + \alpha_s R} \quad (\text{III.20})$$

Le récepteur s'échauffe, Pour élever sa température de  $dT$  pendant un  $dt$ , il a utilisé la puissance :

$$P_T = mc \frac{dT}{dt} \quad (\text{III.21})$$

A la température  $T_r$ , il émet une puissance  $P_{eT}$  :

$$P_{eT} = \alpha_T \sigma S_r T_r^4 \quad (\text{III.22})$$

Le rayonnement émis subit à son tour des va-et-vient analogues à ceux envisagés pour le rayonnement solaires, le récepteur absorbe une fraction de son propre rayonnement égale à :

$$P_{aT} = \frac{\alpha_T R P_{eT}}{1 - R + \alpha_T R} \quad (\text{III.23})$$

Enfin, les parois de l'enceinte, à la température ambiante  $T_a$ , émettent une puissance qu'il n'est pas utile d'explicitier, Le récepteur en absorbe la fraction  $P_{ap}$  qu'il est possible d'évaluer en se plaçant à l'équilibre à la température ambiante.

Le bilan global s'écrit alors :

$$P_{as} + P_{aT} + P_{ap} = P_{eT} + P_T \quad (\text{III.24})$$

Comme nous venons de le signaler  $P_{ap}$  s'exprime en fonction des différents paramètres du système en faisant :

$$T_r = T_a, P_{as} = 0, dT = 0,$$

On a alors :

$$P_{ap} = \alpha_T \sigma S_r T_r^4 \left[ \frac{1-R}{1-R+\alpha_T R} \right] \quad (\text{III.25})$$

On remplaçant dans l'équation III.24 les différents termes par leurs expressions on trouve l'équation différentielle à laquelle obéit la température  $T = T_r$  ;

$$mc \frac{dT}{dt} + \frac{\alpha_T \sigma S_r}{1 - R + \alpha_T R} (1 - R)(T^4 - T_a^4) = \frac{\alpha_s P_s}{1 - R + \alpha_s R} \quad (\text{III.26})$$

L'équation différentielle III.26 permet en effet d'obtenir l'expression analytique de la grandeur accessible suivante :

-à la température d'équilibre  $T_e$ , on a :  $dT/dt=0$ , alors :

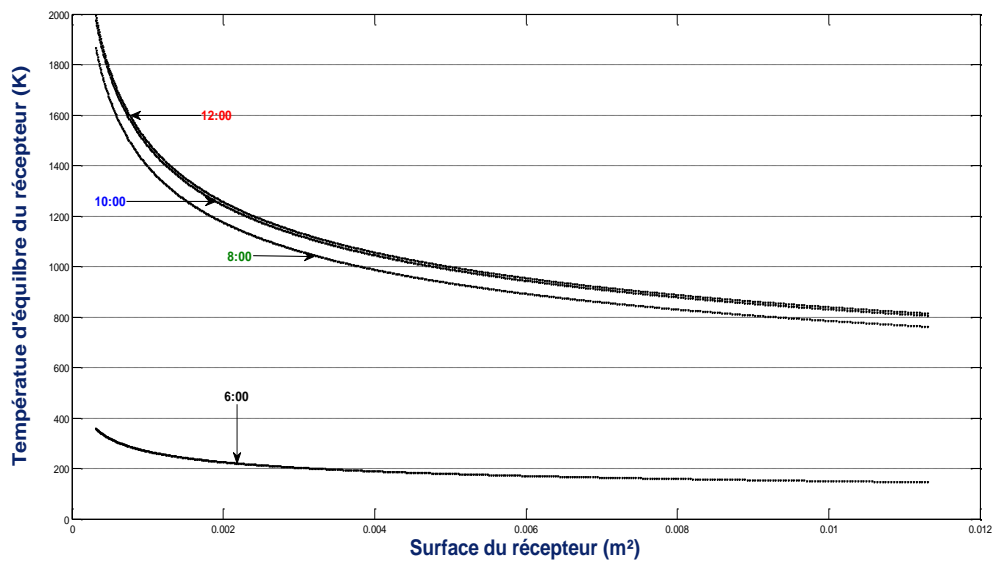
$$T_e^4 - T_a^4 = \frac{1}{\sigma S_r} \frac{\alpha_s}{\alpha_T(1-R)} \frac{1-R+\alpha_T R}{1-R+\alpha_s R} P_s \quad (\text{III.27})$$

[ZIDA 13].

### III.4.1.3. Limites thermiques du four solaire sphérique alimenté par fibre optique

Après avoir étudié le système du transport de l'énergie solaire concentrée avec une fibre optique nous présentons une étude permettant un bon dimensionnement du four solaire proposé et assurant l'obtention de hautes températures.

Nous présentons les résultats de la variation de la température du récepteur du four solaire en fonction de sa surface (Voir figure III.17).



**Figure III.17 : Variation de la température du récepteur du four solaire en fonction de sa surface**

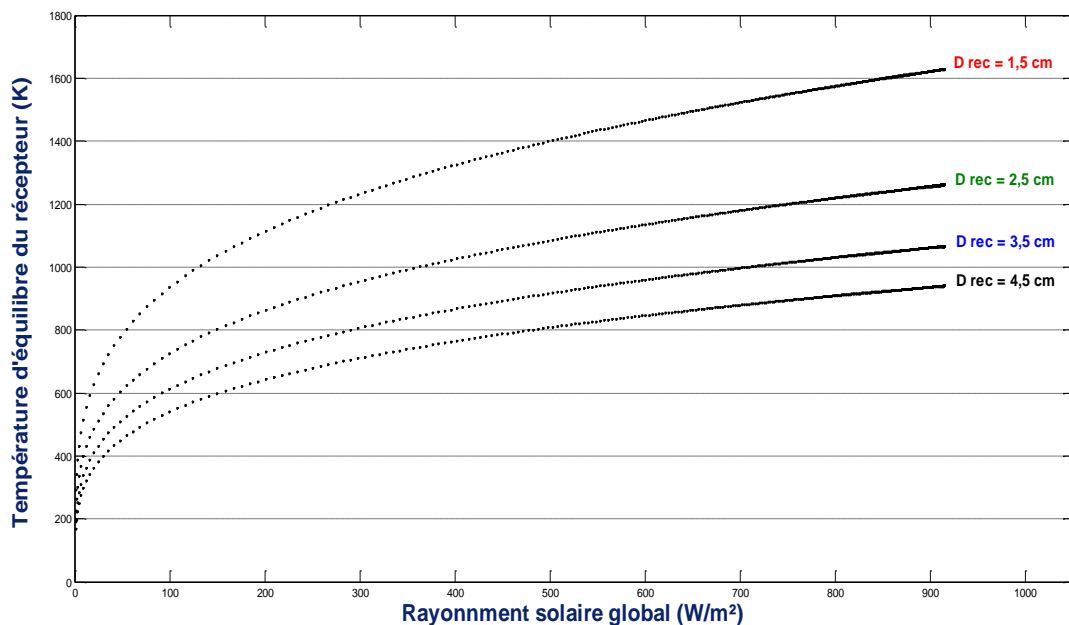
Le 21 Mars (équinoxe printemps), à 6h (lever du soleil) nous distinguons une légère diminution de la température d'équilibre qui se stabilise entre les surfaces de 0,002 m<sup>2</sup> et 0,01 m<sup>2</sup>. Entre 8h et 12h une baisse plus importante de cette température est observée. Cependant, cette baisse devient moins accentuée à partir d'une surface de 0,003 m<sup>2</sup> (Voir figure III.17).

Donc, les petites surfaces du récepteur sont plus favorables pour l'obtention de hautes températures.

Le tableau III.7 suivant montre la variation de la température en fonction du diamètre du récepteur.

	100	350	700	850	900	914
	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
<b>D<sub>rec</sub> = 1,5 cm</b>	938 K	1281 K	1523 K	1600 K	1623 K	1629 K
<b>D<sub>rec</sub> = 2,5 cm</b>	727 K	993 K	1180 K	1240 K	1257 K	1262 K
<b>D<sub>rec</sub> = 3,5 cm</b>	614 K	839 K	998 K	1048 K	1063 K	1067 K
<b>D<sub>rec</sub> = 4,5 cm</b>	542 K	740 K	880 K	925 K	937 K	940 K

**Tableau III.7 : Variation de la température en fonction du diamètre du récepteur pour différents flux**



**Figure III.18 : Variation de la température d'équilibre du récepteur du four solaire en fonction du rayonnement solaire global pour différents diamètres.**

D'après les résultats mentionnés nous concluons que la température d'équilibre du récepteur croît avec l'augmentation du rayonnement solaire global, ainsi que les petites surfaces du récepteur sont plus favorables pour l'obtention de hautes températures (Voir figure III.18).

Dans le but de déterminer le traitement le mieux adapté de la surface de l'enceinte qui entoure le récepteur, ou encore le traitement qui permet une meilleure réflexion du rayonnement, nous proposons une simulation réalisée par le code de calcul numérique, définissant le changement de la température d'équilibre en fonction du coefficient de renvoi de la paroi intérieure de l'enceinte qui entoure le récepteur, ce dernier possède un diamètre optimisée de 1,5 cm dans le but d'obtenir des températures maximales.

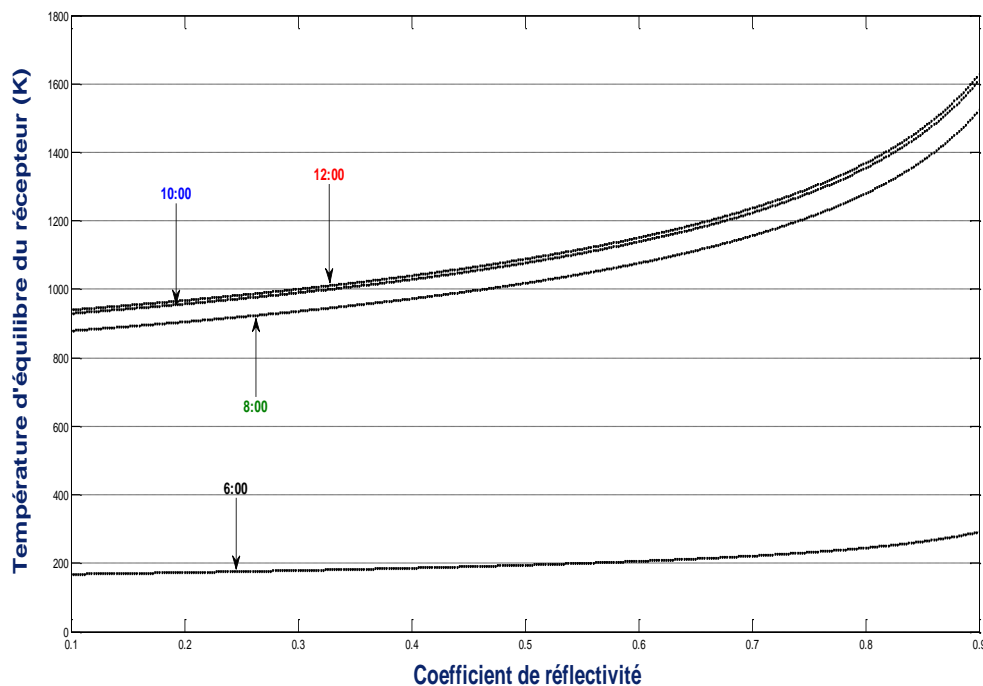
Le 21 Mars (Equinoxes printemps) à 12 TSV les résultats de simulation de la variation de la température d'équilibre du récepteur en fonction du coefficient de réflectivité de la paroi interne de l'enceinte sont donnés sur le tableau suivant :

	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<b>6h (TSV)</b>	169 K	174 K	180 K	187 K	196 K	207 K	222 K	246 K	293 K
<b>8h (TSV)</b>	880 K	906 K	937 K	974 K	1019 K	1078 K	1158 K	1282 K	1524 K
<b>10h (TSV)</b>	931 K	959 K	990,9 K	1030 K	1078 K	1140 K	1225 K	1356 K	1612 K
<b>12h (TSV)</b>	941 K	969 K	1002 K	1041 K	1090 K	1152 K	1238 K	1370 K	1629 K

**Tableau III.8 : Variation de la température d'équilibre du récepteur en fonction du coefficient de réflectivité de la paroi interne de l'enceinte**

Ces valeurs montrent qu'il doit être possible d'obtenir une température d'équilibre plus élevée, en réalisant des traitements de surface de la paroi intérieure de l'enceinte le mieux adaptés.

Concernant le matériau de construction du récepteur, nous simulons les températures d'équilibre pour deux surfaces de coefficients d'absorption différents.



**Figure III.19 : Variation de la température du récepteur du four solaire en fonction du coefficient de réflectivité de la paroi intérieure de l'enceinte.**

D'après les résultats présentés sur la figure III.19, nous remarquons une légère croissance de la température d'équilibre du récepteur qui devient plus prononcée à partir d'une valeur du paramètre de renvoi du rayonnement égal à 0,6.

Hormis le lever du soleil soit à 6h, la température d'équilibre du récepteur reste pratiquement inchangée.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas eu de changement entre un récepteur de surface noircie (corps noir) et un récepteur de surface sélective.

Le rayonnement réfléchi par la surface du matériau du récepteur subira à des vas et viens pour ensuite retourner au récepteur.

Nous concluons que le choix d'un corps noir pour la surface du récepteur d'un four solaire est plus intéressant qu'une surface sélective malgré les avantages et les rendements élevés qui peut nous offrir un capteur muni d'un absorbeur fabriqué avec une telle surface.

Notre conception devient donc moins onéreuse, vu le prix de reviens d'un corps noir comparé au prix d'une surface sélective, en gardant toujours le bon rendement du système.

### III.4.2. Modélisation d'un four solaire cylindrique alimenté par fibre optique

Après avoir décrit le mécanisme du transport de l'énergie solaire concentrée par fibres optiques, la puissance radiative disposée à l'extrémité du conducteur de lumière peut nous servir à concevoir un dispositif. Ce dispositif appelé four solaire cylindrique alimenté par fibre optique nous permet d'avoir une approche des systèmes thermiques destinés à l'obtention de hautes températures.

#### III.4.2.1. Dispositif proposé

La figure III.20 décrit le système du four solaire cylindrique alimenté par fibre optique proposé dans cette étude.

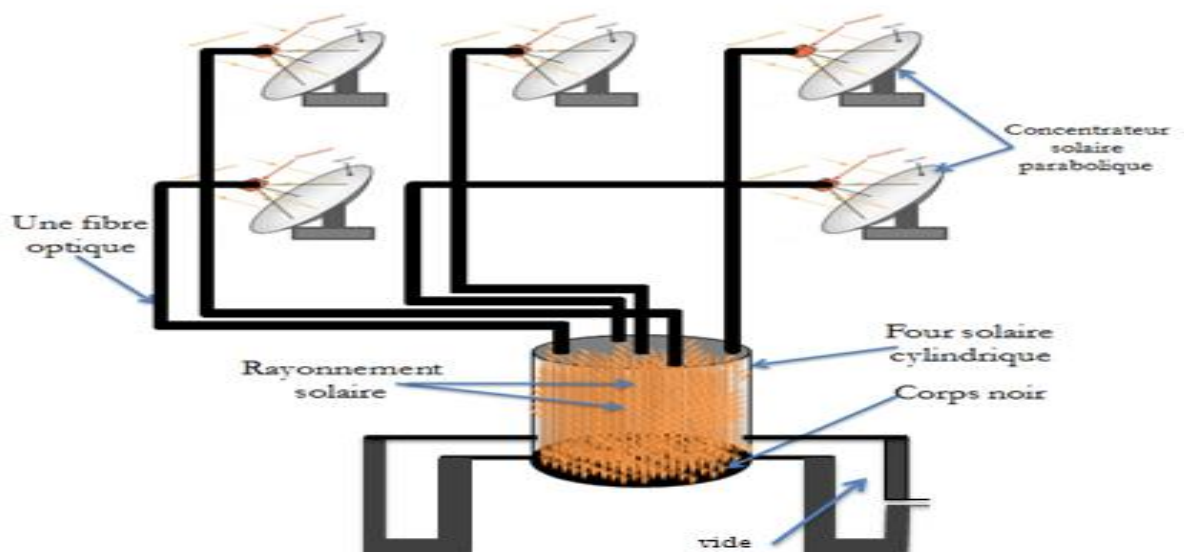


Figure III.20 : Dispositif proposé d'un four solaire cylindrique alimenté par fibre optique

Notre nouvelle conception se compose d'un système du transport de l'énergie solaire concentrée, le deuxième système porte sur un four solaire cylindrique alimenté par fibre optique.

En effet, notre prototype est constitué d'une forme cylindrique composée :

D'une base circulaire supérieure permettant l'emplacement de cinq fibres optiques.

D'une base circulaire inférieure fabriquée d'un corps noir, éclairée par fibres optiques.

Son diamètre est de 1.5 cm

D'une surface réfléchissante étalée sur la paroi intérieure du cylindre. La hauteur est de 5 cm.

En créant le vide dans le cylindre, nous éliminons les pertes par convection. Du fait que la paroi intérieure est réfléchissante, les pertes radiatives sont minimisées.

Le récepteur que nous utilisons est un cercle d'aluminium noirci par une oxydation anodique pour le rendre plus absorbant au rayonnement solaire.

On définit pour le récepteur les paramètres suivants :

$m$  : Masse (Kg),

$S_r$  : Surface ( $m^2$ ),

$T_r$  : Température absolue (K),

$C$  : Chaleur massique du matériau (J/Kg K)

$\alpha_s$  : Coefficient d'absorption moyen de sa surface pour un rayonnement solaire,

$\alpha_T$  : Coefficient d'absorption moyen de sa surface pour un rayonnement émis à la température  $T$ .

Remarquons que les trois dernières grandeurs dépendent de la température, Toutefois, l'écart entre la température d'équilibre et la température ambiante est suffisamment petit pour que ces paramètres puissent être considérés comme constants dans ce domaine de variation.

On définit pour l'enveloppe le paramètre suivant :

$R$  : Paramètre de « renvoi » du rayonnement, Il tient compte essentiellement du coefficient de réflectivité des aspects internes, mais aussi des imperfections géométriques sur la surface de l'enceinte et les espaces entre les portes centrées de la fibre optique.

Il convient de définir ce paramètre pour le rayonnement solaire ( $R_s$ ) et pour le rayonnement émis à la température  $T$  ( $R_T$ ). Cependant, seule la composante due au coefficient de réflectivité dépend de la nature du rayonnement.

Nous admettons qu'elle prend sensiblement la même valeur pour le rayonnement solaire et le rayonnement propre du récepteur, On pose donc :  $R_s = R_T = R$ .

La Surface de la fibre optique  $= 1.96 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

$S$  : surface de la base supérieure du cylindre  $= 9.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ , pour l'admission des fibres.



Paramètres	Valeur
$S_r(m^2)$	0.05
$T_0 (K)$	298
$\alpha_s$	0,5
$\alpha_T$	0,6
R	0,7

**Tableau III.9 : Paramètres essentielles du four solaire cylindrique proposé**

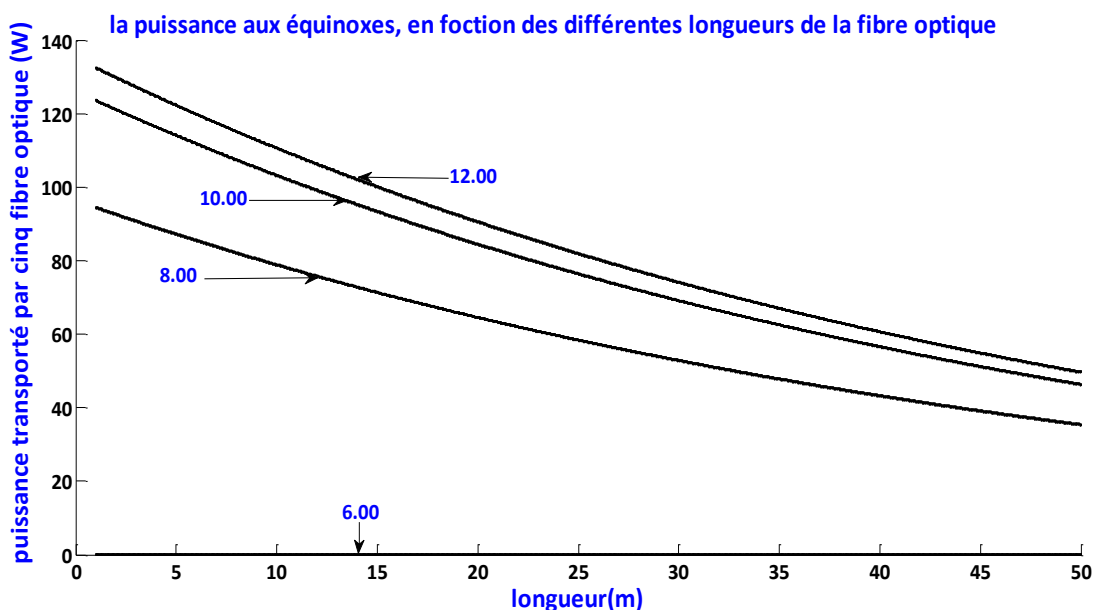
### III.4.2.2. Limites thermiques du four solaire cylindrique alimenté par fibre optique

Le système est composé de cinq concentrateurs paraboliques, d'un système de suivi du soleil à deux axes et cinq fibres optiques pour transporter l'énergie solaire concentrée.

L'énergie solaire incidente se concentre par chaque concentrateur parabolique possédant une surface réfléchissante, son diamètre est de 21,8 cm et sa distance focale est de 51,9 cm. La réflectivité du miroir est de 0,95. La concentration maximale est estimée à 1900.

La fibre optique utilisée pour le transport de l'énergie solaire est fabriquée en Silice  $SiO_2$ , son diamètre est de 5 mm et sa longueur est de 3 m. L'ouverture est estimée à  $12^\circ$  et son atténuation est de 250 dB/km.

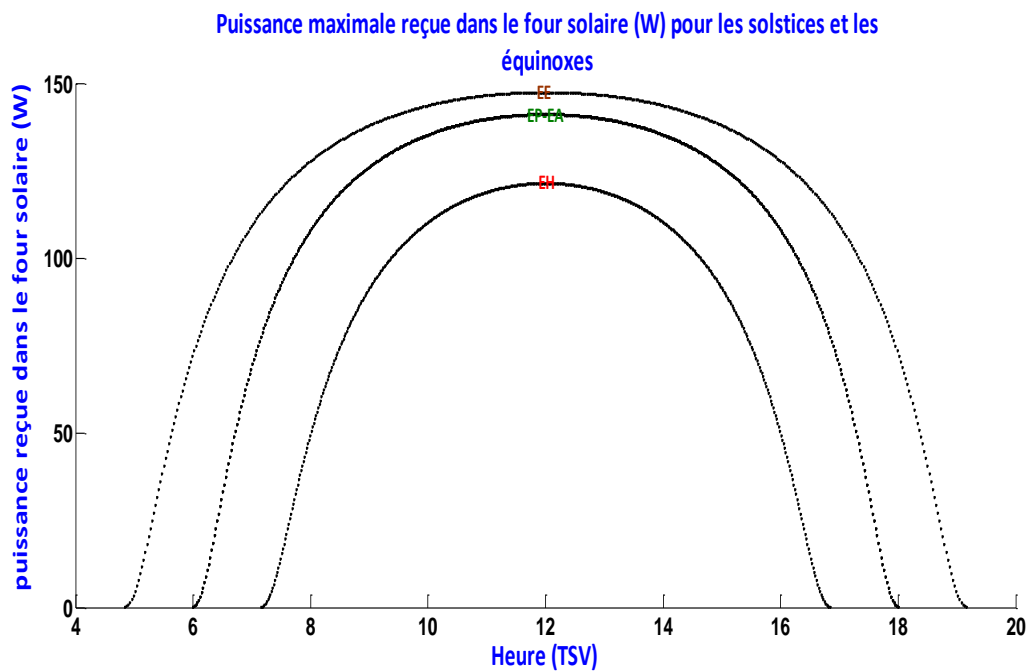
Après avoir étudié le système du transport de l'énergie solaire concentrée avec cinq fibres optiques nous présentons une étude permettant un bon dimensionnement du four solaire cylindrique proposé et assurant l'obtention de hautes températures.



**Figure III.25 : Variation de la puissance aux équinoxes, en fonction des différentes longueurs de la fibre optique**

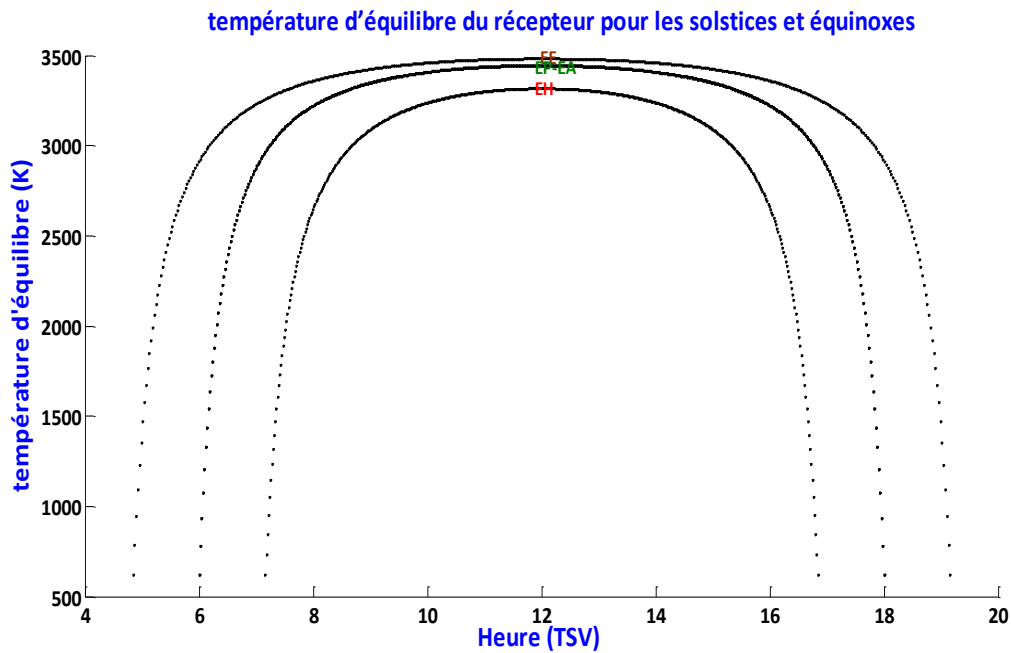
Pour le 21 Mars (équinoxe printemps), de 6h (lever du soleil) à 12h (TSV) la variation de la puissance en fonction des différentes longueurs de la fibre optique est obtenue par la figure III.25. Nous observons que le flux de chaleur diminue, quand la longueur de la fibre augmente. Bien que l'atténuation augmente avec la longueur.

D'après la figure III.25, nous constatons qu'à 12h (TSV) la puissance à l'entrée de la fibre optique est de 128,21 W diminue jusqu'à 50,08 W pour une longueur de 3 m.



**Figure III.26 : Puissance maximale reçue dans le four solaire (W) pour les solstices et les équinoxes**

Figure III.26 illustre la variation de la puissance maximale dans le four solaire qu'ils sont arrivés par cinq fibres optiques. Nous notons qu'à partir du graphe cette puissance peut atteindre 121,43 W à midi TSV au solstice hiver, 141,16 W aux équinoxes printemps et automne. Pour le solstice été, les valeurs jusqu'à 147,42 W.



**Figure III.27 : variation de température d'équilibre du récepteur pour les solstices et équinoxes**

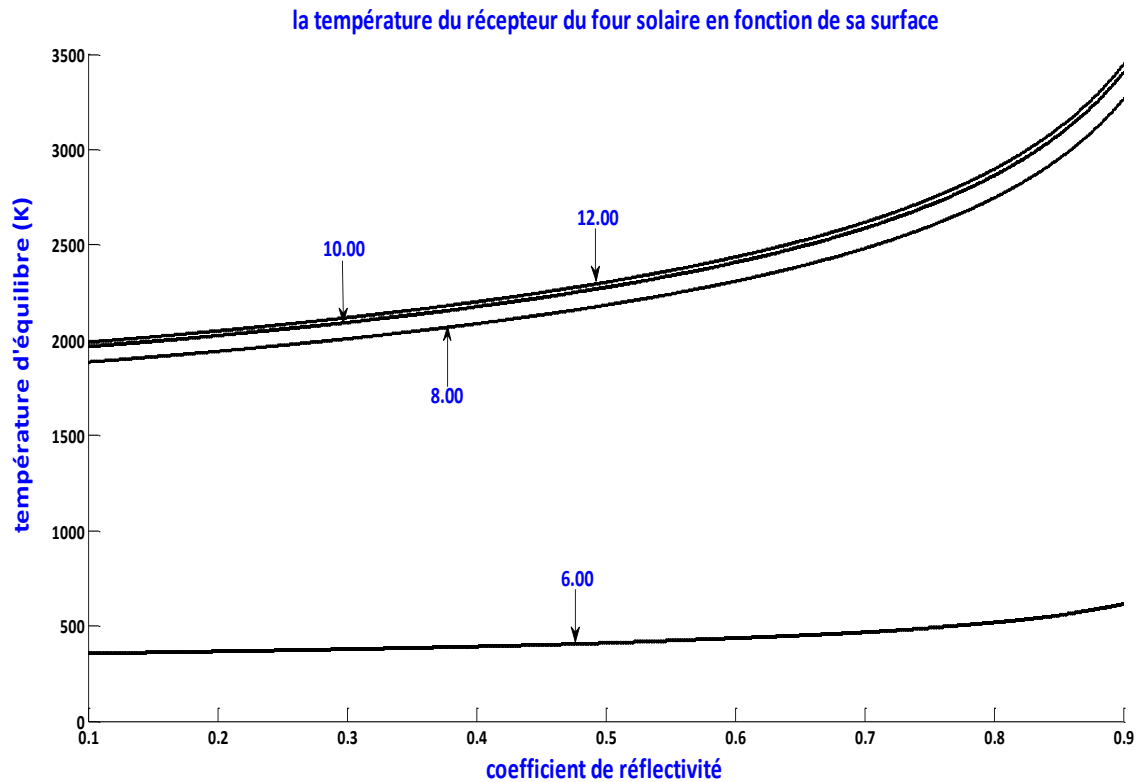
Nous présentons la variation de température d'équilibre du récepteur pour les solstices et équinoxes.

A partir du graphe, la température d'équilibre peut atteindre 3317,9 K à midi au solstice hiver, 3445,1 K aux équinoxes printemps et automne. Pour le solstice été, la valeur est égale 3482,8 K. D'après ces valeurs, nous remarquons que la température du récepteur augmente avec l'augmentation de la valeur du rayonnement solaire global.

Le 21 Mars (Equinoxes printemps) à 12 TSV les résultats de simulation de la variation de la température d'équilibre du récepteur en fonction du coefficient de réflectivité de la paroi interne de cylindre sont donnés sur le tableau suivant :

	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
<b>6h (TSV)</b>	357,3 K	368 K	380,5 K	395,5 K	413,9 K	437,6 K	470,3 K	520,5 K	618,9 K
<b>8h (TSV)</b>	1824,7 K	1879,3 K	1943,1 K	2019,4 K	2113,6 K	2234,8 K	2401,5 K	2657,7 K	3160,5K
<b>10h (TSV)</b>	1951,4K	2009,7 K	2078 K	2159,6 K	2260,3 K	2390 K	2568,2 K	2842,2 K	3380 K
<b>12h (TSV)</b>	1985,5 K	2044,9 K	2114,3 K	2197,4 K	2299,8 K	2431,8 K	2613,1 K	2891,9 K	3439,1 K

**Tableau III.10 : Variation de la température d'équilibre du récepteur en fonction du coefficient de réflectivité de la paroi intérieure du cylindre**



**Figure III.28 : Variation de la température du récepteur du four solaire en fonction de coefficient de réflectivité de la paroi intérieure du cylindre**

D'après les résultats présentés sur la figure III.28, nous remarquons une légère croissance de la température d'équilibre du récepteur qui devient plus prononcée à partir d'une valeur de paramètre de renvoi du rayonnement égal à 0,6.

Hormis le lever du soleil soit à 6h, la température d'équilibre du récepteur reste pratiquement inchangée.

Ces valeurs montrent qu'il doit être possible d'obtenir une température d'équilibre plus élevée (jusqu'à 3500 k), en réalisant des traitements de surface de la paroi intérieure du cylindre le mieux adapté.

Concernant le matériau de construction du récepteur, nous simulons les températures d'équilibre pour la surface de coefficient d'absorption.

Les petites surfaces du récepteur sont plus favorables pour l'obtention de hautes températures.

Notre conception devient donc moins onéreuse, vu le prix de reviens d'un corps noir comparé au prix d'une surface sélective, en gardant toujours le bon rendement du système.

Le 21 Mars (Equinoxes printemps) à 12 TSV, le tableau III.11 suivant montre la variation de la température en fonction du diamètre du récepteur.

	100 W/m <sup>2</sup>	350 W/m <sup>2</sup>	700 W/m <sup>2</sup>	850 W/m <sup>2</sup>	900 W/m <sup>2</sup>	914 W/m <sup>2</sup>
<b>D<sub>rec</sub>=1,5 cm</b>	1657,6 K	2267,3 K	2696,3 K	2830,4 K	2871,1 K	2882,2 K
<b>D<sub>rec</sub>=1,7 cm</b>	1557,1 K	2129,7 K	2532,7 K	2658,7 K	2696,9 K	2707,3 K
<b>D<sub>rec</sub>=1,9 cm</b>	1472,8 K	2014,5 K	2395,7 K	2514,8 K	2551 K	2560,9 K
<b>D<sub>rec</sub>=2,1 cm</b>	1400,9 K	1916,2 K	2278,7 K	2392,1 K	2426,5 K	2435,9 K
<b>D<sub>rec</sub>=2,3 cm</b>	1338,7 K	1831 K	2177,4 K	2285,7 K	2318,6 K	2327,6 K

Tableau III.11 : Variation de la température en fonction du diamètre du récepteur pour différents flux

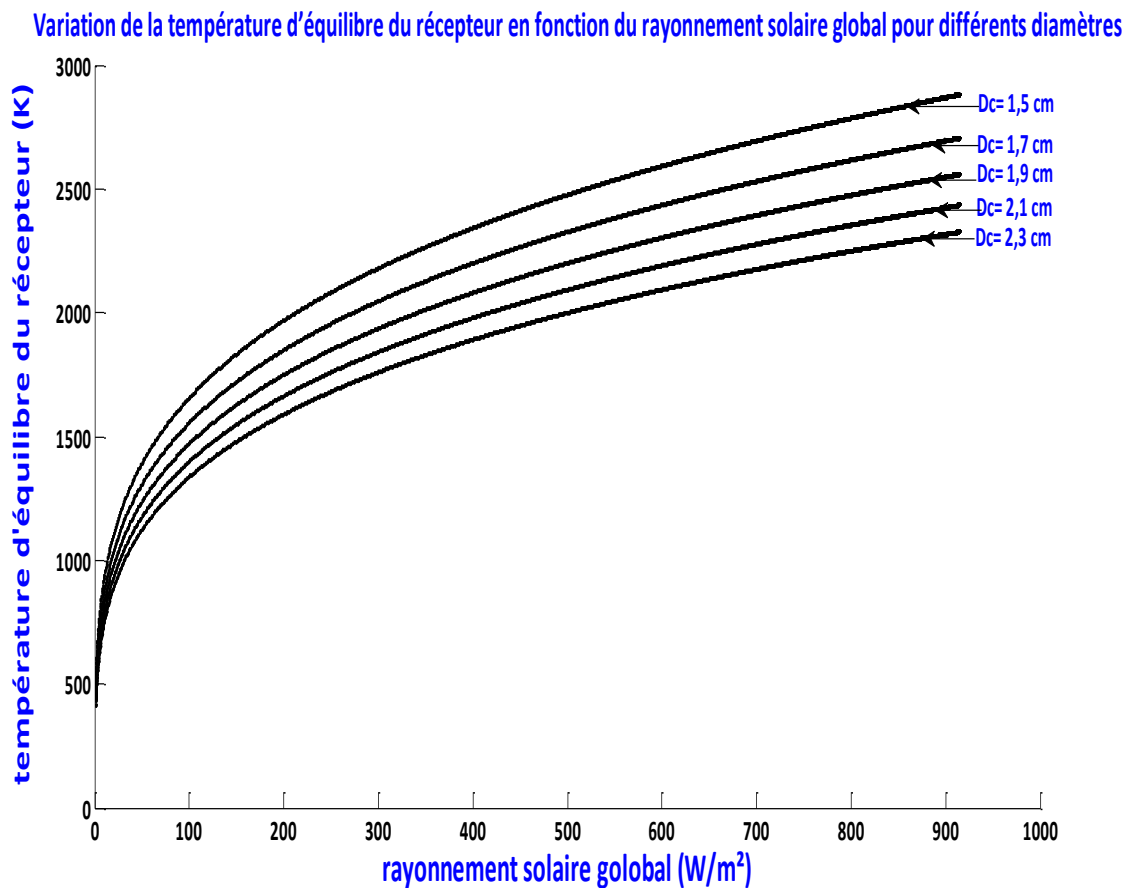


Figure III.29 : Variation de la température d'équilibre du récepteur du four solaire en fonction du rayonnement solaire global pour différents diamètres.

La figure III.29 montre la variation de la température en fonction du diamètre du récepteur.

D'après les résultats mentionnés nous concluons que la température d'équilibre du récepteur croît avec l'augmentation du rayonnement solaire global, ainsi que les petites surfaces du récepteur sont plus favorables pour l'obtention de hautes températures (voir tableau III.11).

L'accès aux très hautes températures dans des conditions particulièrement souples conduit à envisager des utilisations que ne permettent pas les fours solaires actuels. Nous pensons en particulier à la thermo dissociation ou du gaz carbonique en vue de la fabrication d'hydrogène ou d'oxyde de carbone. On sait, qu'au dessus de 2000°C, l'eau aussi bien que le gaz carbonique commencent à se dissocier.

### **III.5. Conclusion**

Dans ce dernier chapitre, nous avons modélisé une nouvelle conception d'un four solaire sphérique et cylindrique, nous avons développé un code de calcul numérique permettant l'estimation des énergies captées par un champ photothermique (capteur plan et capteur à concentration) à chaque instant de la journée et de l'année. Son application sur le site de Tlemcen a donné des résultats prometteurs. Notre étude est spécialement désignée pour les systèmes à concentration, ainsi que pour les systèmes du transport de l'énergie solaire par des conducteurs de lumières et ce pour améliorer le rendement énergétiques des fours solaires sphériques et cylindriques; leur conception a permis une analyse fine et une susceptibilité d'avoir une intégration élevée dans les systèmes photothermiques.

En appliquant ce code de calcul numérique, les travaux réalisés nous ont permis une bonne maîtrise du potentiel énergétique et une nouvelle conception des systèmes photosolaires.

## Références bibliographiques

- [AMAR 04] Amara S., « *Optimisation D'un Procédé Economique De Chauffage D'une Habitation Par Voie Solaire* », Thèse de Magister, Université de Tlemcen, (2004).
- [BRIC 84] De Brichambaut P., « *Evaluation Energétique D'un Gisement Solaire* », Tec et Doc, (1984).
- [CARI 85] Cariou JM., Dugas J., Martin L., « *Theoretical Limits Of Optical Fibre Solar Furnaces* », Solar Energy, Vol. 34, (1985), PP. 329-339.
- [HEGG 88] Heggen P.M., « *Solar Concentrating Mirrors* », USA: Energy General Press, (1988).
- [KAND 08] Kandilli C., Ulgen K., « *Exergetic Assessment Of Transmission Concentrated Solar Energy System Via Optical Fibres For Building Applications* », Ener and Build, Vol. 40, (2008), pp. 05-15.
- [KATO 76] Kato D., Nakamura T., « *Application of optical fibers to the transmission of solar radiation* » J. Appl. Phys., Vol. 40, (1976), pp. 4528.
- [KLEI 76] Klein S. A., « *Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces* », Solar Energy, Vol. 19, (1976), pp. 325 – 329.
- [ZIDA 02] Zidani C., « *Etude du Transport d'Energie Solaire par Fibres Optique. Application aux Systèmes à Concentrations* », Thèse de Magister, Université de Tlemcen, (2002).
- [ZIDA 03] Zidani C., Benyarou F., Benyoucef B., « *Simulation De La Position Apparente Du Soleil Et Estimation Des Energies Solaires Incidentes Sur Un Capteur Plan Photovoltaïque Pour La Ville De Tlemcen (Algérie)* ». Rev. Energ. Ren., Vol.6, (2003), pp.69-76.
- [ZIDA 13] Zidani C., Benyoucef B., « *Conception et modélisation des systèmes photothermiques. Applications aux systèmes photothermiques alimentés par fibres optiques* », thèse de Doctorat, (2013), Université de TLEMCCEN.

## Webographie

- [1] [www.mapage.noos.fr](http://www.mapage.noos.fr).
- [2] [www.polymicro.com](http://www.polymicro.com). Polymicro Technologies, (1998).

**CONCLUSION**

**GENERALE**



# Conclusion générale

Ce mémoire distingue les propriétés des systèmes photothermiques qui ont une grande place dans la technologie de la science et le développement de l'énergie. Mais ; il doit y avoir un équilibre entre la technologie actuellement effectuée et la production industrielle à un prix raisonnable, qui contrôle l'impact environnemental du processus de fabrication. Étant donné l'importance et la fiabilité de ces systèmes nous optons pour un système photothermique dénommé « four solaire sphérique et cylindrique alimenté par fibres optiques ». Ce travail fait l'objet d'une mise au point d'un procédé technologique.

L'apparition de la fibre optique en transmission et son application aux différents domaines lors de ces dernières années, n'étaient pas seulement dues à une volonté de créer de nouveaux systèmes mais aux caractéristiques remarquables que représentent ces conducteurs de lumière.

De nombreux champs d'applications de ces conducteurs de lumière ont été abordés en littérature. Parmi les nombreuses applications, nous pouvons citer celle de transporter l'énergie solaire en conservant sa forme radiative, du concentrateur jusqu'aux fours solaires qui ont un impact important dans l'industrie solaire. Notre étude nous a permis d'apprécier particulièrement cette application.

L'énergie solaire incidente est relativement faible, l'utilisation de la concentration permet d'augmenter la densité de puissance ; et la fibre constitue un bon support pour transporter le maximum de puissance avec des faibles atténuations.

A cause d'une limitation retrouvée dans la littérature, nous avons effectué une analyse énergétique au point focal du concentrateur solaire qui représente l'entrée de la fibre optique.

Cette étude nous a permis d'avoir plus d'information sur le comportement thermique du rayonnement solaire avant sa pénétration à l'intérieur de la fibre.

Les résultats numériques obtenus par la présente de ce mémoire ont été validés et présentés pour analyser le cheminement du rayonnement solaire incident, concentré, transporté ensuite reconcentré vers un récepteur sphérique et cylindrique. Celui-ci est en équilibre avec une

paroi émettant de toutes parts un rayonnement identique à celui du soleil. L'augmentation de la température d'équilibre du récepteur dépend de plusieurs paramètres physiques et géométriques.

L'étude numérique du système complet (concentrateur, fibre optique, four solaire) fait ressortir ce qui suit :

- Les données météorologiques d'un site (température ambiante, durée d'insolation, visibilité au sol...) sont indispensables et nécessaires pour une bonne conception des systèmes photothermiques.
- La simulation montre que l'orientation face au sud du capteur photothermique est privilégiée pour un meilleur captage d'énergie solaire.
- L'idée de transporter l'énergie solaire concentrée par des fibres optiques a commencé en 1980, c'était une source pour de nombreuses études menées dans différents domaines.
- Le rendement du système du transport de l'énergie solaire concentrée peut être nettement amélioré par un bon traitement de la surface réfléchissante du concentrateur solaire, c'est-à-dire l'utilisation de matériaux très réfléchissants.
- Le type de fibres plastique, verre ou liquide peut être choisi selon le but de l'étude et selon le domaine d'utilisation.
- Dans les systèmes du transport de l'énergie solaire concentrée, les fibres optiques fabriquées en  $\text{SiO}_2$  sont mieux adaptées aux applications thermiques que les fibres optiques fabriquées en PMMA, malgré la souplesse de ces dernières. Les fibres optiques fabriquées en  $\text{SiO}_2$  résistent mieux aux hautes températures et durent plus longtemps.
- Les fibres optiques en PMMA sont réservées uniquement aux systèmes d'éclairage solaire, elles ont un large diamètre du cœur et elles peuvent être regroupées dans un câble à cause de leur souplesse. La puissance délivrée par ces câbles est prépondérante.
- A l'heure actuelle, le diamètre du cœur des fibres optiques en verre est encore faible. Par conséquent, on peut regrouper ces fibres dans un câble tout en évitant les trous qui se forment entre eux, afin de minimiser les pertes durant le processus du transport. La forme hexagonale des fibres optiques en verre peut résoudre ce problème.
- les petites surfaces du récepteur du four solaire sont plus favorables pour l'obtention de très hautes températures.

- la température d'équilibre du récepteur croît avec l'augmentation du rayonnement solaire global.
- Les résultats obtenus par ce travail montrent qu'il doit être possible d'obtenir une température d'équilibre plus élevée, en réalisant des traitements de surface de la paroi intérieure de l'enceinte et aussi du cylindre le mieux adaptés pour les deux cas de four solaire sphérique et cylindrique.

## **PERSPECTIVES**

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de fibres optiques comme élément de transmission d'énergie solaire concentrée pour la réalisation des fours solaires (sphérique et cylindrique) est une réelle possibilité qui doit être étudiée expérimentalement.

Enfin, les systèmes du transport de l'énergie solaire concentrée peuvent avoir un grand potentiel pour des applications dans un large éventail de domaines de recherche. Les systèmes basés sur le TESCVFO idéal peuvent trouver des opportunités considérables pour être utilisés dans des études innovatrices et prospectives avec une structure de recherche pluridisciplinaire.

Plusieurs développements futurs basés sur ce code sont donc envisageables. Parmi les plus importants, en perspective, nous recommandons dans ce domaine, les points suivants :

- Pour déterminer des valeurs optimales des paramètres du système étudié, nous recommandons l'extension de ce présent travail par une étude technico-économique bien détaillée. Ce n'est qu'en franchissant cette étape que doivent devenir opérationnelles des utilisations industrielles du TESCVFO.
- La suite de ce travail de mémoire serait dirigée vers les études de modélisation et de simulation de ce système en régime dynamique, d'où la variation des paramètres physiques dépendra du temps.

## Résumé

La modélisation d'un système photothermique constitue un axe de recherche d'actualité dans de nombreux laboratoires à travers le monde.

Afin de contrôler le potentiel énergétique solaire et maîtriser le bon fonctionnement des systèmes photothermiques, nous avons développé un code de calcul numérique permettant l'estimation des énergies captées par un champ photothermique (capteur plan et capteur à concentration) à chaque instant de la journée et de l'année. Son application est présentée pour un cas d'exemple type pour la ville de Tlemcen, les résultats ont été prometteurs.

L'objectif de cette étude est spécialement désignée pour les systèmes du transport de l'énergie solaire par des conducteurs de lumières, nous nous sommes basé sur l'analyse d'une nouvelle conception d'un four solaire sphérique et cylindrique alimenté par fibre optique.

L'étude consiste d'améliorer et passer d'une énergie solaire disponible, abondante et gratuite vers une énergie thermique concurrentielle susceptible, et de faire une contribution et une intégration élevée dans les systèmes photothermiques, ainsi que de résoudre les problèmes actuelles de nos sociétés.

**Mots clés :** Modélisation, Conception, Energie Solaire, Système photothermique, Concentrateur Parabolique, Fibre Optique, Four Solaire,

## Abstract

Actually, many laboratories throughout the world dedicate significant interests for modeling photothermal systems.

In this mean, we developed a numerical code to calculate the collected energies of the photothermal field for each instant of the day and the year, and then estimate an optimized photothermal system by controlling the natural solar energy (with plane collector and concentrator collector).

In the present study, we apply our model for the town of Tlemcen, taking it as a typical example. The results show that the photothermal application seems very promising.

The objective of this study is specifically designated for a system of transmitting of the solar energy lights; we based in the analysis on new design of a spherical and a cylindrical solar oven supplied by optical fiber.

The study is to improve and move from a solar energy available, Abundant and free to a competitive thermal energy likely and to make a contribution and high integration in photothermal systems, and to solve the current problems of our societies.

**Key-words:** Modeling, Design, Solar Energy, Photothermal System, Parabolic Concentrator, Optical Fiber, Solar Furnace.

## ملخص

من خلال دراسة نمذجة النظم الفوطوحرارية في العديد من المختبرات من جميع أنحاء العالم، قد أدى إلى السيطرة على إمكانيات الطاقة الشمسية و الأداء السليم للنظم الفوطوحرارية. لهذا الغرض وضعنا رمزا عدديا لحساب الطاقات المستقبلية من قبل حقل فوطوحراري (مستقبل مسطح، مستقبل للتركيز) و ذلك في كل لحظة من اليوم و السنة.

في هذه الدراسة، قمنا بتطبيق نموذج على مدينة تلمسان، بينت النتائج أن التطبيق الفوطوحراري كان واعدًا جدًا. الهدف من هذه الدراسة نقل الطاقة الشمسية المركزة من قبل موصلات الضوء، وعلى أساس هذا قمنا بدراسة تصميم جديد للفرن الشمسي كروي وأسطواني ممول من طرف الألياف البصرية.

حيث يعد هذا العمل إلى تحسين و تمرير الطاقة الشمسية المتاحة، الوفيرة و المجانية إلى طاقة حرارية تنافسية. ذلك يؤدي إلى مساهمة كبيرة في تكامل النظم في مجال الطاقة الفوطوحرارية و من تم حل المشاكل الحالية في مجتمعاتنا.

**كلمات مفتاحية :** نمذجة، تصميم، الطاقة الشمسية، نظام فوطوحراري، ألياف بصرية، فرن شمسي.