

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



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



UNITE DE RECHERCHE MATERIAUX
ET ENERGIES RENOUVELABLES (URMER)

THÈSE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN PHYSIQUE
Spécialité : *Physique Energétique et Matériaux*

Par

Mme Chafika ZIDANI

Sur le Thème

**Conception et modélisation des systèmes photothermiques.
Applications aux systèmes photothermiques alimentés par
fibres optiques**

Soutenue publiquement en Décembre 2012, devant le Jury composé de :

Président
Directeur de Thèse
Examineurs :

Pr. Nesr-Eddine CHABANE-SARI
Pr. Boumédiène BENYOUCEF
Pr. Michel AILLERIE
Pr. Patrice BOURSON
Pr. Abla CHAKER
Pr. Tayeb BENOUAZ

(Univ. Tlemcen)
(Univ. Tlemcen)
(Univ. Metz)
(Univ. Metz)
(Univ. Constantine)
(Univ. Tlemcen)

Remerciements

Cette Thèse a pu être réalisée au sein de l'Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables de l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen en Algérie.

Merci à mon Directeur de Thèse Boumediene BENYOUCEF, Professeur à l'Université de Tlemcen et Directeur de l'« *Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables* » (URMER), pour avoir dirigé ma thèse et pour la confiance qui m'a accordé pour mener à bien ce travail, et également pour ces remarques pertinentes et constructives, ses conseils avisés et son soutien.

J'exprime ma profonde et respectueuse gratitude à Monsieur Nesr-Eddine CHABANE-SARI, Professeur à l'Université de Tlemcen et chercheur à l'« *Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables* » (URMER), qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse.

Tous mes remerciements vont également à Monsieur Michel AILLERIE et Monsieur Patrice BOURSON, Professeurs à l'Université de Metz et chercheurs au « *Laboratoire Matériaux Optiques, Photoniques et Systèmes LMOPS* », pour avoir accepté d'examiner ce travail.

J'exprime toute ma gratitude à Madame Abla CHAKER, Professeur à l'Université de Constantine, Directeur du « *Laboratoire de Physique Energétique* », pour avoir accepté d'être examinateur de cette Thèse.

Je remercie respectueusement Monsieur Tayeb BENOUAZ Professeur à l'Université de Tlemcen, Directeur du « *Laboratoire de Physique Electronique et Modélisation* », d'avoir accepté d'examiner le présent travail.

Mes remerciements vont également aux nombreuses personnes qui ont participé de près ou de loin à ma formation et à tous ceux qui m'ont enrichi de leur connaissance, je voudrais leurs exprimer ici toute ma sympathie.

Je tiens à remercier sincèrement tous les membres de l'Unité de Recherche « *Matériaux et Energies Renouvelables* » (URMER) pour leurs encouragements.

Merci à tous...

Chafika ZIDANI

SOMMAIRE



INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale	1
Problématique	3
Organisation du Travail	3
Références Bibliographiques	5



CHAPITRE I

PARAMETRES INFLUENÇANT L'ENERGIE SOLAIRE

I.1. Introduction	7
I.2. Paramètres influençant le rayonnement solaire	8
I.2.1. Mouvement Terre – Soleil	8
I.2.2. Mouvement de rotation.....	8
I.2.3. Mouvement de translation.....	8
I.2.4. Mouvement apparent du soleil.....	9
I.2.5. Position du soleil.....	10
I.2.6. Coordonnées équatoriales.....	11
I.2.7. Coordonnées horizontales	12
I.2.8. Equation de passage d'un système de coordonnées à un autre.....	13
I.2.9. Coordonnées cartésiennes du soleil.....	13
I.3. Capteur photothermique solaire	13
I.3.1. Orientation d'un capteur PT solaire.....	13
I.3.2. Angle d'incidence sur un capteur PT solaire.....	15
I.3.3. Durée d'ensoleillement d'un capteur PT solaire.....	15
I.3.4. Durée du jour.....	16
I.3.5. Rayonnement solaire.....	17
I.3.5.1. Rayonnement solaire hors atmosphère.....	18
I.3.5.2. Rayonnement solaire au sol	19
I.3.6. Concentration du rayonnement	20
I.3.6.1. Valeur limite de la concentration.....	20
I.3.6.2. Concentration maximale théorique.....	20
I.3.6.3. Concentration optimale.....	22
I.3.7. Energie solaire photothermique.....	23
I.3.7.1. Notions sur la transmission de la chaleur.....	23
I.3.7.2. Fluide caloporteur.....	27
I.3.8. Effet de masque.....	28
I.3.9. Applications possibles de l'énergie solaire photothermique.....	30
I.3.9.1. Chauffage des piscines.....	30

I.3.9.2. Eau chaude sanitaire par voie solaire.....	30
I.3.9.3. Chauffage solaire des habitations.....	31
I.3.9.4. Distillation solaire.....	32
I.3.9.5. Réfrigération solaire.....	32
I.3.9.6. Cuisinière solaire.....	33
I.3.9.7. Four solaire.....	34
I.3.9.8. Centrales solaires thermodynamiques.....	34
I.4. Conclusion.....	36
Références Bibliographiques.....	37



CHAPITRE II
LES ELEMENTS ESSENTIELS DES SYSTEMES
PHOTOTHERMIQUES

II.1. Introduction.....	39
II.2. Principaux matériaux utilisés en photothermique.....	40
II.3. Capteur solaire.....	40
II.3.1. Capteurs solaires plans.....	40
II.3.1.1. Couverture transparente.....	41
II.3.1.2. Absorbeurs.....	42
II.3.1.3. Isolation.....	44
II.3.1.4. Intérêt des surfaces sélectives.....	46
II.3.1.5. Principe de fonctionnement d'un capteur Plan.....	49
II.3.2. Systèmes solaires à concentrations.....	49
II.3.2.1. Avantages et les inconvénients des systèmes à concentration comparés aux capteurs plans.....	49
II.3.2.2. Dispositifs de la concentration du rayonnement solaire.....	51
II.3.2.2.1. Système à récepteur central	51
II.3.2.2.2. Systèmes à collecteurs distribués.....	52
II.4. Fibres optiques.....	55
II.4.1. Fibres optiques en PMMA.....	56
II.4.2. Fibres optiques en Silice.....	57
II.5. Conclusion.....	58
Références Bibliographiques.....	59



CHAPITRE III
ETUDE THEORIQUE ANALYSES DES SYSTEMES
ALIMENTES PAR FIBRES OPTIQUES

III.1. Introduction.....	61
III.2. Présentation des études antérieures.....	62
III.2.1. Caractérisation des systèmes.....	62
III.2.2. Eclairage solaire.....	66

III.2.3. Chirurgie solaire.....	67
III.2.4. Photobioréacteurs, la production d'hydrogène et réactions photochimiques.....	68
III.2.5. Production d'énergie solaire.....	72
III.2.6. Laser de pompage solaire.....	76
III.3. Conclusion.....	77
Références Bibliographiques.....	78



CHAPITRE IV
MODELISATION DES SYSTEMES
PHOTOTHERMIQUES

IV.1. Introduction	83
IV.2. Modélisation d'énergie incidente.....	84
IV.2.1. Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair).....	84
IV.2.2. Estimation d'énergie instantanée (ciel couvert).....	85
IV.2.3. Estimation de l'énergie journalière.....	86
IV.2.4. Estimation de l'énergie annuelle.....	86
IV.2.5. Durée du jour et durée d'insolation.....	86
IV.3. Modélisation du transport d'énergie solaire concentrée par des	
Fibres optiques.....	87
IV.3.1. Description du système du TESC par un câble à fibres optiques.....	92
IV.3.2. Description du système du TESC par une fibre optique.....	93
IV.4. Modélisation d'un four solaire alimenté par fibres optiques.....	95
IV.4.1. Dispositif proposé.....	95
IV.4.2. Bilan énergétique du récepteur	97
IV.4. Conclusion	98
Références Bibliographiques.....	99



CHAPITRE V
RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. Introduction.....	101
V.2. Données météorologiques.....	102
V.2.1. Energie incidente horaire.....	102
V.2.2. Durée d'insolation et durée du jour	103
V.2.3. Variation de la température ambiante.....	105
V.3. Course du soleil.....	106
V.3.1. Coordonnées du soleil.....	106
V.3.2. Angle d'incidence.....	108

V.3.3. Energie reçue par un capteur photothermique plan.....	109
V.3.3.1. Energie incidente	109
V.3.3.2. Choix du type de champ photothermique.....	110
V.3.3.3. Inclinaison du champ photothermique.....	113
V.4. Résultats du dispositif proposé.....	114
V.4.1. Modèle d'un système du TESC par un câble à fibres optiques.....	114
V.4.2. Modèle d'un système du TESC par une fibre optique.....	116
V.4.3. Limites thermiques du four solaire alimenté par fibres optiques.....	125
V.5. Conclusion.....	129
Références Bibliographiques.....	130



CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale.....	129
Perspectives.....	130

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Bien avant le XXe siècle, longtemps exploitées, les énergies renouvelables, sont devenues, lors du premier «choc pétrolier» en 1973 un sujet d'actualité. Bénéficiant de technologies plus performantes qu'autrefois, leur développement se heurte aussi bien à de faibles rendements qu'à des coûts d'exploitation trop élevés [SAND 05].

Les énergies renouvelables s'opposent aux énergies non renouvelables (fossiles ou nucléaires). Mais la disponibilité à l'infini de ces énergies renouvelables n'a de sens qu'à l'échelle humaine. D'autre part, si une partie de l'énergie fossile consommée a effectivement servi, le reste est le plus souvent rejeté avec pollution de notre environnement. Quant aux diverses formes d'énergie, certaines sont mieux adaptées que d'autres à un usage donné. La conversion mutuelle entre formes d'énergie apparaît ainsi inévitable, même si souvent le rendement reste insuffisant. Beaucoup de filières énergétiques ont été proposées comme solutions idéales aux problèmes de nos sociétés industrielles, parmi celles-ci nous comptons la photothermie.

Hors atmosphère, l'énergie solaire moyenne reçue par la terre est d'environ 5,5 kWh/m² 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.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée d'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, 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.

Les systèmes photosolaires sont susceptibles d'améliorer très rapidement et ce moyennant un coût minimal les conditions de vie et de productivité des habitations géographiquement dispersées [MONS 96].

L'énergie solaire peut être exploitée sous deux formes principales :

- la conversion photovoltaïque pour la production d'électricité,
- la conversion photothermique qui consiste en une transformation directe du rayonnement solaire.

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

Les systèmes photothermiques présentent donc un intérêt particulier pour les pays en développement. Ils sont susceptibles d'améliorer très rapidement et moyennant un coût minimal, les conditions de vie et de productivité des habitations géographiquement dispersées [MONS 96].

Les systèmes photothermiques représentent un élément essentiel dans la maîtrise de l'énergie et par voie de conséquence, dans la protection de l'environnement [DUFF 80].

On les rencontre dans des domaines aussi variés que les centrales thermiques, les raffineries, les unités chimiques et pétrochimiques, les procédés agroalimentaires, la papeterie, les textiles, etc... [OUZZ 00].

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

Le transport de l'énergie solaire concentrée par des conducteurs de lumière laisse présager de l'intérêt de cette méthode et des utilisations potentielles qui en résultent.

D'une manière générale, dans le but d'obtenir des performances énergétiques élevées, il est nécessaire d'exploiter cette énergie concentrée et transportée à des fins industrielles et par voie de conséquence une amélioration notable 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.

Les travaux effectués dans le cadre de cette thèse contribuent à combler le manque évident constaté dans ce domaine. Pour cela, nous avons développé la notion de l'utilisation de l'énergie solaire concentrée et transportée par des fibres optiques pour l'éclairage, dans un sens plus large dont l'exploitation de cette idée à la réalisation des fours solaires.

Les objectifs principaux de la présente thèse qui traite la concentration et le transport de l'énergie solaire dans un système de suivi du soleil, peuvent être résumés par les points suivants :

- 1) Etude en détail de tous les paramètres influençant les systèmes photosolaires
- 2) Développement d'un code de calcul permettant l'estimation des énergies incidentes et concentrées sur les champs photosolaires. Ce code peut être développé pour la conception d'un nouveau système de four solaire alimenté par fibres optiques.
- 3) Validation des résultats numériques obtenus avec des conditions de fonctionnement identiques à celles de quelques travaux expérimentaux publiés sur le sujet.

Le but principal de cette thèse est non seulement l'étude, la modélisation et l'optimisation des systèmes photothermiques, mais aussi la mise au point d'un nouveau procédé technologique directement transférable à l'industrie.

Organisation du travail

Cette étude comporte cinq chapitres :

- Dans le premier chapitre nous abordons les paramètres influençant les champs photothermiques, tels que le rayonnement solaire et sa concentration, l'orientation des capteurs, ainsi que les notions de base sur l'énergie solaire photothermique et sur le transfert de chaleur. Quelques applications de la photothermie sont discutées en fin de ce chapitre.

- Le deuxième chapitre porte sur une description détaillée des éléments essentiels des systèmes photothermiques ; elle concerne la présentation des différents types de capteurs (les capteurs plans et les capteurs à concentration) ainsi que les différents matériaux qui les constituent. Elle traite aussi la description des fibres optiques en particulier celles qui sont conçues pour transporter l'énergie lumineuse. L'objectif de ce chapitre est de faire le bon choix des éléments qui constituent notre conception.
- Le troisième chapitre concerne une étude bibliographique et un rappel sur les travaux analytiques, numériques et expérimentaux effectués dans ce domaine. L'analyse de ces travaux nous permet la validation de nos résultats par rapport à ceux de quelques travaux réalisés dans ce sujet.
- Le quatrième chapitre traite de la modélisation de différentes parties du système photothermique, telles que l'énergie solaire incidente, concentrée et transportée. Nous étudions l'exergie du système (Concentrateur – Fibre).
Associer l'exergie à l'énergie dans les analyses du fonctionnement des systèmes revient ainsi à associer quantité et qualité de l'énergie et de ses diverses formes ou types. 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. La modélisation nous permet aussi 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.
- Le cinquième chapitre est réservé exclusivement des résultats numériques et à leurs interprétations. Ces résultats de simulation ont permis d'étudier différents paramètres influençant les performances de la conception proposée. Les effets de paramètres tels que le choix des éléments adaptables et convenables, la géométrie et la conception du système, les matériaux adéquats pour la fabrication des éléments de système photothermique convenable, 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 laborieux.

Références Bibliographiques

[SAND 05] Sandén B., « *The Economic and Institutional Rational of PV Subsidies* ». Solar Energy. Vol. 78, (2005), pp. 137-146.

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

[DUFF 80] Duffie J., Beckman W.A., (1980) « *Solar Engineering of Thermal Process* », Ed. Wiley and Sons, U.S.A,

[OUZZ 00] Ouzzane M., « *Développement simultané en convection mixte laminaire dans une conduite avec un flux de chaleur non uniforme sur sa surface externe : cas avec et sans ailettes* », (2000), Thèse de doctorat (Ph.D). Université Sherbrooke (Québec), CANADA

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

[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.

CHAPITRE I

PARAMETRES INFLUENÇANT

L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOTHERMIQUE

Chapitre I

Paramètres influençant l'énergie solaire photothermique

I.1. Introduction

L'utilisation du rayonnement solaire pour 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 thermo-électricité, la magnéto-électro-dynamique, la thermomécanique ou encore la thermochimie. 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.

Toutefois, 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.

Afin de remédier à ce problème de façon rigoureuse, nous présentons de manière basique, dans ce premier chapitre les éléments essentiels dans l'évaluation des énergies captées par les systèmes PT. Ce Chapitre est divisé en deux principales parties, dont la première partie fait état les paramètres essentiels influençant les systèmes PT et la deuxième discute des éventuelles des applications de la PT solaire. Nous développons dans la première partie les paramètres géographiques et astronomiques du mouvement et de la position terre-soleil aux différentes périodes de l'année. Par la suite, nous exposons l'effet des capteurs solaires sur le rendement PT selon sa nature, son orientation et sa durée d'exposition. Aussi, nous traitons les aspects de l'énergie photothermique solaire et les différents mécanismes physiques inhérents. Enfin, nous

abordons l'aspect de l'effet de masque. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons quelques applications récentes et perspectives de la photothermie.

I.2. Paramètres influençant le rayonnement solaire

I.2.1. Mouvement Terre – Soleil

Il est bien approprié d'étudier le mouvement terre-soleil car c'est la conséquence directe de l'existence des saisons, jours et nuits qui influencent de façon non négligeable l'énergie solaire captée sur terre. Nous présentons dans la figure I.1 un schéma relatif au mouvement terre-soleil et quelques axes et orientations permettant de repérer les principales périodes de l'année.

I.2.2. Mouvement de rotation

La terre tourne autour de son axe de rotation (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme étant la durée moyenne entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu. Le jour solaire est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de: $P_r=23\text{h } 56\text{mn } 04\text{s} \approx 24\text{h}$. Sa vitesse linéaire de rotation à l'équateur est: $V_r \approx 0,465 \text{ km/s}$; elle est variable en fonction de la latitude φ telle que $V_r(\varphi) = V_r(\cos(\varphi))$.

Les saisons n'existent pas si la terre se tenait droit sur son orbite, mais le fait que son axe de rotation est penché d'un angle $23^\circ 27' \approx 23,45^\circ$ avec un mouvement de révolution de la terre, le pôle Nord et le pôle Sud vont pouvoir successivement se dorer à la lumière.

I.2.3. Mouvement de translation

Dans l'univers tout est en mouvement. La terre est en rotation sur elle-même et tourne au tour du soleil en une période $P_t = 365 \text{ jours } 5\text{h } 48 \text{ mn } 40\text{s} \approx 365,25 \text{ jours}$. Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie et correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de kilomètres. La terre tourne avec une vitesse moyenne $V_t=29,77 \text{ km/s}$ [vitesse maximale en hiver $30,27 \text{ km/s}$ et minimale en été $29,77\text{km/s}$]. Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons.

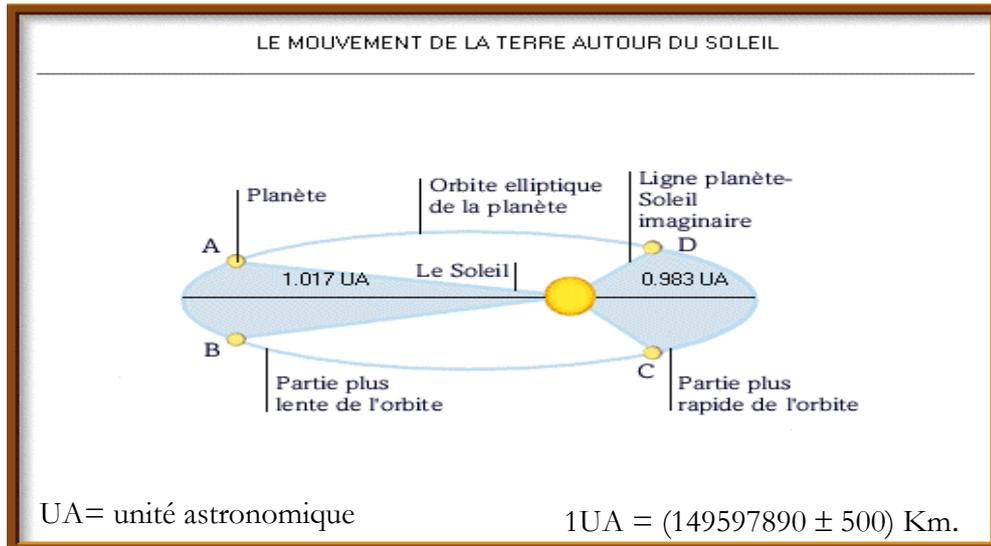


Figure I.1: *Mouvement de la terre autour du soleil*

Aux équinoxes du printemps et d'automne, les rayons solaires arrivent parallèlement à l'équateur, les journées sont alors égales aux nuits. Au solstice d'hiver l'hémisphère Nord connaît les nuits les plus longues et les jours les plus courts car les rayons du soleil arrivent obliquement et n'atteignent pas le pôle nord, c'est l'inverse dans l'hémisphère sud.

Au solstice d'été, l'hémisphère nord reçoit un éclaircissement maximum; représentant ainsi les nuits les plus courtes et les journées les plus longues.

La distance terre - soleil varie quotidiennement et ce selon la relation suivante :

$$D_{TS}(N) = 1 - 0.017 \cos [360 (N-2)/365] \text{ en UA} \quad (I.1)$$

N est le numéro du jour de l'année compté à partir du premier janvier (quantième).

- Pour une année civile $N = 365$ jours.
- Pour une année bissextile $N = 366$ jours.

Les valeurs extrêmes de la distance terre-soleil sont données par :

$$D_{TS}(\text{min}) = 0,983 \text{ UA vers le 2 janvier (Périgée)}$$

$$D_{TS}(\text{max}) = 1,017 \text{ UA vers le 5 juillet (Apogée)}$$

I.2.4. Mouvement apparent du soleil

Pour étudier le mouvement du soleil nous examinons le mouvement apparent du soleil pour un observateur sur la terre. En un point d'attitude ϕ au Nord de l'équateur le soleil décrit un arc de cercle variable chaque jour à raison de 15° par heure. La distance zénithal Z (ou angle zénithal); c'est l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale du lieu.

Z varie quotidiennement et annuellement entre $\varphi - 23,45^\circ \leq Z \leq \varphi + 23,45^\circ$;

$Z = \varphi - \delta$ avec $-23^\circ 27' \leq \delta \leq 23^\circ 27'$. δ = déclinaison du soleil

❖ Aux équinoxes (E.A et E.P) $\rightarrow \delta = 0$ et $Z = \varphi$ = latitude du lieu, et les journées ont une durée de 12 heures.

❖ Au solstice hiver (S.H) $\rightarrow \delta = -23^\circ 45' \Rightarrow Z = \varphi + 23^\circ 45'$, et les journées ont une durée inférieure à 12h.

❖ Au solstice été (S.E) $\rightarrow \delta = 23^\circ 27' \Rightarrow Z = \varphi - 23^\circ 27'$, et les journées ont une durée supérieure à 12h.

En un point de l'équateur ($\varphi = 0$), le soleil se lève toujours à l'est et se couche à l'ouest, la durée du jour est constante égale à 12h.

❖ En un point de l'attitude φ au Sud de l'équateur, le mouvement du soleil sera identique si on inverse la position du Sud et du Nord.

Application au site de Tlemcen

Nous montrons dans la figure I.2, une application numérique de nos travaux antérieurs faisant appel aux équations citées ci-dessus du mouvement du soleil au site de Tlemcen.

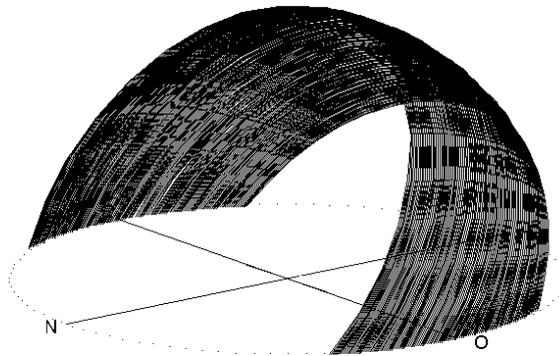


Figure I.2: Course du soleil à Tlemcen [ZIDA 03]

I.2.5. Position du soleil

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents (Voir figure I.3) [CAPD 86]:

- Par rapport au plan horizontal du lieu.
- Par rapport au plan équatorial de la terre.

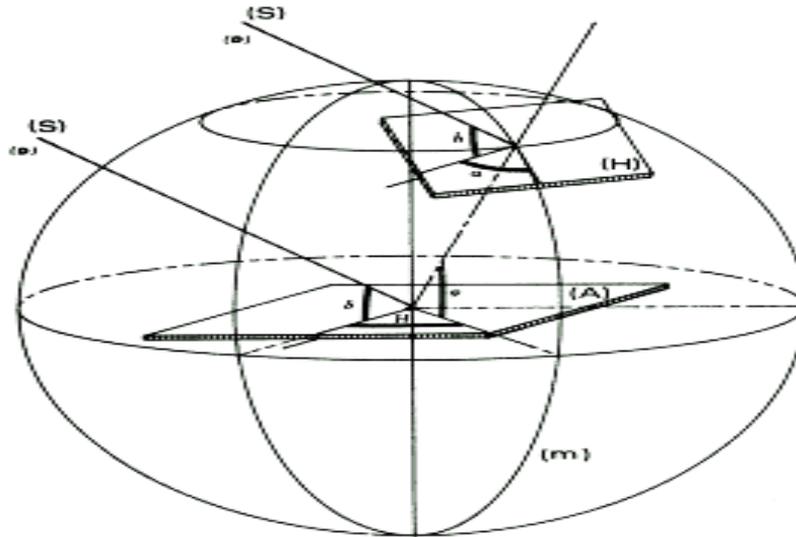


Figure I.3: Coordonnées équatoriales et horaires [CAPD 86]

I.2.6. Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (δ , H).

a- Déclinaison du soleil « δ »

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. La déclinaison du soleil varie quotidiennement selon la relation [CAPD 86]:

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (N-80) \right] \quad \text{ou avec plus de précision}$$

$$\delta = \text{Arc sin} \left[0,389 \sin \left[\frac{360}{365} (N-82) \right] + 2 \sin \frac{360}{365} (N-2) \right] \quad (\text{I.2})$$

Avec N est le numéro du jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier, quantième c.-à-d. qu'il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année: Année civile (N=365 jours) et année bissextile (N=366 jours).

δ varie entre deux valeurs extrêmes: $-\delta_0 \leq \delta \leq +\delta_0$ avec $\delta_0 = 23,45^\circ$.

$$\text{On prend : } \begin{cases} \delta=0 & \text{aux Equinoxes (E.P, E.A)} \\ \delta=23,45^\circ & \text{au Solstice été (S.E)} \\ \delta=-23,45^\circ & \text{au Solstice hiver (S.H)} \\ \delta>0 & \text{aux E.P-S.E-E.A} \\ \delta<0 & \text{aux E.P-S.E-E.A} \end{cases}$$

b- L'angle horaire du soleil « H »

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu ; l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation :

$$H = 15 (TSV - 12) \quad (I.3)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} TSV = TL - DE + \left(\frac{E_t + 4\lambda}{60}\right) \\ E_t = 9,87 \sin 2N' - 7,35 \cos N' - 1,5 \sin N' \\ N' = \frac{360}{365}(N - 81) \\ DE = +1 \text{ pour l'Algérie} \end{cases}$$

DE est le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

TSV est le temps solaire vrai = temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.

TL est le temps légal = temps donné par une montre.

E_t est la correction de l'équation du temps et λ = longitude du lieu, pour Tlemcen $\lambda = -1,19^\circ$

L'angle horaire H varie de -180° à $+180^\circ$

$$\text{On prend : } \begin{cases} H > 0 & \text{l'après midi} \\ H < 0 & \text{le matin} \\ H = 0 & \text{à midi TSV} \end{cases}$$

I.2.7. Coordonnées horizontales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan horizontal du lieu de latitude φ par deux angles **h** la hauteur du soleil et **a** l'azimut du soleil.

a- Hauteur du soleil « h »

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

$$\sin h = \cos \delta \cos \varphi \cos H + \sin \varphi \sin \delta$$

$$h : \text{ varie entre } -90^\circ \text{ et } +90^\circ. \text{ On prend : } \begin{cases} h > 0 & \text{le jour} \\ h < 0 & \text{la nuit} \\ h = 0 & \text{aux lever et coucher} \end{cases}$$

b- L'azimut du soleil « a »

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud. L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation :

$$\sin a = \cos \delta \sin H / \cos h$$

$$a : \text{ varie entre } -180^\circ \text{ et } +180^\circ \quad \text{On prend : } \begin{cases} a > 0 & \text{vers l'ouest} \\ a < 0 & \text{vers l'est} \\ a = 0 & \text{direction du sud} \end{cases}$$

I.2.8. Equation de passage d'un système de coordonnées à un autre

La connaissance de la position du soleil en coordonnées horizontales (h, a) permet d'obtenir la position du soleil en coordonnées équatoriales (δ , H) et inversement [CAPD 86].

(h, a) \rightarrow (δ , H)

$$\begin{pmatrix} \sin h \\ \cos h \cos \alpha \\ \cos h \sin \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos H \cos \varphi & \sin H & \sin \varphi \sin \varphi \\ \cos H & \sin H \sin \varphi & -\cos \varphi \\ \sin H & -\cos H & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta \\ 0 \\ \sin \delta \end{pmatrix}$$

(H, δ) \rightarrow (a, h)

$$\begin{pmatrix} \sin \delta \\ \cos \delta \cos H \\ \sin \delta \sin H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos a \cos \varphi & -\sin a & \cos \varphi \sin \varphi \\ \cos a & \sin a \sin \varphi & \cos \varphi \\ \sin a & \cos a & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos h \\ 0 \\ \sin h \end{pmatrix}$$

I.2.9. Coordonnées cartésiennes du soleil

On considère un repère cartésien (OXYZ) pour repérer le soleil en un instant t, un jour N de l'année et un lieu φ de la surface de la terre. Ce repère est défini par :

- Origine O : C'est le point de captation du rayonnement solaire.
- L'axe OX : C'est la direction du Sud (pour un observateur à Tlemcen).
- L'axe OY : C'est la direction de l'Est.
- L'axe OZ : C'est la verticale du lieu.

Le plan XOY est le plan horizontal du lieu et YOZ (ou XOZ) est le plan vertical du lieu.

Pour un observateur en O (origine des axes), le soleil décrit un arc de cercle dans le ciel durant la journée à raison de 15° par heure. Le soleil peut être repéré à chaque instant de la journée et de l'année par ces coordonnées cartésiennes [ZIDA 03]:

$$X = D_{ts} \cos h \cos a \qquad Y = D_{ts} \cos h \sin a \qquad Z = D_{ts} \sin h$$

I.3. Capteur photothermique solaire

I.3.1. 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 (α, γ)

A/ γ : 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/ α : l'azimut du capteur

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

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

L'inclinaison β 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 :

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

- 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 :

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

- 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 :

$$\alpha = a, \quad \gamma = h \quad \text{et} \quad i = 0.$$

I.3.2. Angle d'incidence sur un capteur PT solaire

L'angle d'incidence i est l'angle entre la direction du soleil et la normale au capteur. Cet angle peut être déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident (\vec{u}) et la normale (\vec{n}) en coordonnées horizontales [ZIDA 03]:

$$\vec{n} \begin{cases} \cos(\gamma) \sin(\alpha) \\ \cos(\gamma) \cos(\alpha) \\ \sin \gamma \end{cases} \quad \vec{u} \begin{cases} \cos(h) \sin(a) \\ \cos(h) \cos(a) \\ \sin(h) \end{cases}$$

Le produit scalaire de \vec{u} et \vec{n} détermine l'angle d'incidence i

$$\cos(i) = \vec{u} \cdot \vec{n} = \begin{pmatrix} \cos(h) \sin(a) \\ \cos(h) \cos(a) \\ \sin(h) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\gamma) \sin(\alpha) \\ \cos(\gamma) \cos(\alpha) \\ \sin \gamma \end{pmatrix}$$

$$\cos i = \sin \alpha \cos \gamma \sin a \cos h + \cos \alpha \cos \gamma \cos a \cos h + \sin \gamma \sin h$$

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

En coordonnées horaires l'angle d'incidence est donné par :

$$\begin{aligned} \cos i &= \sin \alpha \cos \gamma \sin H \cos \delta + \cos \alpha \cos \gamma [\cos H \cos \delta \sin \varphi - \sin \delta \cos \varphi] \\ &+ \sin \gamma [\cos H \cos \delta \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi] \end{aligned} \quad (I.4)$$

I.3.3. Durée d'ensoleillement d'un capteur PT solaire

Pour un plan (α, γ) , un lieu φ et un jour δ donnés, l'angle i est uniquement fonction de l'angle horaire H , on exprimera donc $\cos i$ en faisant bien apparaître la variable H [ZIDA 03].

$$\cos i = A \sin H + B \cos H + C \quad (I.5)$$

$$\text{Avec: } \begin{cases} A = A' \cos(\delta) & A' = \cos(\gamma) \sin(\alpha) \\ B = B' \cos(\delta) & B' = \cos(\gamma) \cos(\alpha) \sin \varphi + \sin(\gamma) \cos(\varphi) \\ C = C' \sin(\delta) & C' = -\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos \varphi + \sin(\gamma) \cos(\varphi) \end{cases}$$

Le lever H_L' et le coucher H_C' du soleil sur un capteur sont définis pour :

$$i = \pm 90^\circ \Rightarrow \cos(i) = 0 \Rightarrow A \sin(H) + B \cos(H) + C = 0$$

La résolution de cette équation donne deux solutions une pour le lever (H_L') et l'autre pour le coucher (H_C'):

$$H_L' = \rho(\alpha) \arccos\left(\frac{B'}{D'}\right) - \arccos\left(\frac{-C'}{D'} \tan(\delta)\right) \quad \text{et} \quad H_C' = \rho(\alpha) \arccos\left(\frac{B'}{D'}\right) + \arccos\left(\frac{-C'}{D'} \tan(\delta)\right)$$

$$\text{Avec: } D' = \sqrt{A'^2 + B'^2} \quad \text{et} \quad \rho(\alpha) = \text{signe de } \alpha$$

$$\text{Capteur TEL } (0, 90 - \varphi) \quad A' = 0; \quad B' = 1; \quad C' = 0$$

La durée d'ensoleillement d'un capteur est donnée par :

$$D_j' = \frac{H_2 - H_1}{15} \quad \text{avec: } \begin{cases} H_1 = H_L' & \text{si } |H_L'| \leq |H_L| \\ H_1 = H_L & \text{si } |H_L'| \geq |H_L| \\ H_2 = H_C' & \text{si } |H_C'| \leq |H_C| \\ H_2 = H_C & \text{si } |H_C'| \geq |H_C| \end{cases}$$

I.3.4. Durée du jour

Le jour est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donnent une hauteur h du soleil nulle sont appelés : le lever et le coucher du soleil.

La relation donnant la hauteur du soleil peut s'écrire [CAPD 86]:

$$\sin h = \cos \delta \cos \varphi \cos H + \sin \varphi \sin \delta = \cos \delta \cos \varphi (\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi + \cos H)$$

Si on pose $T = -\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi$ on obtient : $\sin h = \cos \delta \cos \varphi (\cos H - T)$

$\sin h = 0$ est équivalent à la résolution de $\cos H = T$

a) $|T| > 1 \Leftrightarrow |\varphi| + |\delta| > 90$

$\sin h \neq 0 \quad \forall H$: Pas d'existence du lever et du coucher du soleil.

➤ T négatifs : $T < -1 \Leftrightarrow |\varphi + \delta| > 90 \Rightarrow \sin h > 0 \Rightarrow h > 0$.

Le soleil est au-dessus de l'horizon durant toute la journée: « jour polaire ».

➤ T positifs : $T > 1 \Leftrightarrow |\varphi - \delta| < 90 \Rightarrow \sin h < 0 \Rightarrow h < 0$.

Le soleil est au-dessous de l'horizon durant toute la journée: « nuit polaire ».

b) $|T| \leq 1 \Rightarrow |\varphi| + |\delta| \leq 90$.

L'équation $\sin h = 0$ a deux racines; ce qui donne deux valeurs de H .

$$\begin{cases} H_C = \operatorname{Arccos}(-\tan \delta \tan \varphi) & \rightarrow \text{Coucher} \\ H_L = -\operatorname{Arccos}(-\tan \delta \tan \varphi) & \rightarrow \text{Lever} \end{cases}$$

Les valeurs des azimuts correspondants sont : a_C pour le coucher et a_L pour le lever :

$$\text{On obtient : } \begin{cases} a_C = \operatorname{Arccos}\left(-\frac{\sin \delta}{\cos \varphi}\right) \\ a_L = -\operatorname{Arccos}\left(-\frac{\sin \delta}{\cos \varphi}\right) \end{cases}$$

Remarque :

- Pour le jour polaire : $H_L = -180^\circ$ et $H_C = 180^\circ$ et Pour la nuit polaire : $H_L = 0^\circ$ et $H_C = 0^\circ$.

- A l'équateur ($\varphi = 0$), on a pour toute l'année: $H_C = 90^\circ$ et $a_C = 90^\circ - \delta$.

- Aux équinoxes ($\delta = 0$), on a pour toute la terre: $H_C = 90^\circ$ et $a_C = 90^\circ$.

La durée du jour, D_j , en heures, est donnée par :

$$D_j = \frac{H_C - H_L}{15} = \frac{2}{15} \operatorname{Arccos} T \quad \text{avec } T = -\tan \delta \tan \varphi$$

On retrouve donc :

- Si $T = -1$ $H_C = 180^\circ$ $D_j = 24$ heures jour polaire

- Si $T = 1$ $H_C = 0^\circ$ $D_j = 0$ heure nuit polaire

Les valeurs des durées maximales et minimales sont :

$D_j = D_{j_{\max}}$ pour $\delta = 23,45^\circ$ (S.E le 21 ou 22 juin).

$D_j = D_{j_{\min}}$ pour $\delta = -23,45^\circ$ (S.H le 21 ou 22 décembre).

Latitude (N et S)	Durée du jour		Latitude (N et S)	Durée du jour	
	Maximum	Minimum		Maximum	Minimum
00,0	12h 00mn	12h 00mn	50,0	16h 09mn	7h 51mn
10,0	12h 35mn	11h 52mn	60,0	18h 30mn	5h 30mn
20,0	13h 13mn	10h 47mn	70,0	24h 00mn	0h 00mn
30,0	13h 56mn	10h 04mn	80,0	24h 00mn	0h 00mn
40,0	14h 51mn	9h 09mn	90,0	24h 00mn	0h 00mn

Tableau I.1: *Durée du jour (maximum et minimum) sans tenir compte de la réfraction, en fonction de la latitude*

I.3.5. Rayonnement solaire

Le soleil est l'origine principale de l'énergie disponible sur terre. Ceci inclut bien évidemment l'énergie thermique directe, l'énergie hydroélectrique et même l'énergie générée par les hydrocarbures puisque ces derniers sont la conséquence de la photosynthèse.

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.4).

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 : $0.8 \mu\text{m} \rightarrow 4 \mu\text{m}$)].

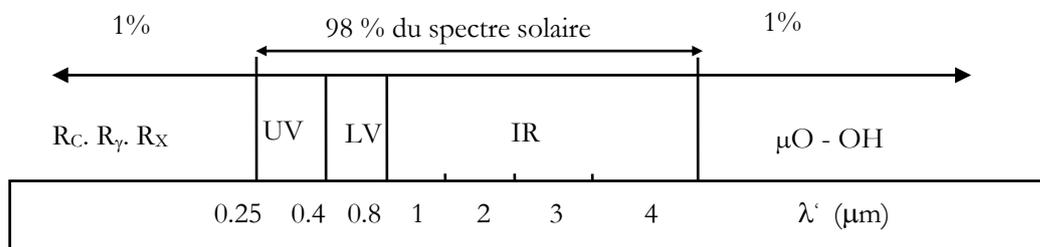


Figure I.4: *Rayonnement solaire*

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 λ'_m donnée par la loi de Wien : $\lambda'_m T_s = 2898 \mu\text{m K}$ pour $T = 5777 \text{ K}$ et $\lambda'_m = 0.5 \mu\text{m}$.

I.3.5.1. 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 :

$$W_s = \sigma T_s^4 \quad (I.6)$$

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

$$P_s = \sigma T_s^4 4 \pi R_s^2 \quad (I.7)$$

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^2 placée perpendiculairement au rayonnement solaire reçoit une puissance :

$$W_T = \frac{(\sigma T_s^4 4 \pi R_s^2)}{(4 \pi D_{TS}^2)} = \frac{(\sigma T_s^4 R_s^2)}{(D_{TS}^2)} \quad (I.8)$$

Pour une distance annuelle Terre – Soleil (D_{TS}) moyenne: $W_T = 1366.12 \text{ W/m}^2$ 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 ($1 \text{ U.A.} = 1.495 \cdot 10^8 \text{ km}$) 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 :

$$I = 1367 \left(1 + 0,034 \cos \left[\frac{360}{365} (N - 2) \right] \right) \quad (I.9)$$

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 W/m^2 , le minimum au début de juillet avec la valeur 1320 W/m^2 .

I.3.5.2. Rayonnement solaire au sol

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 :

$$m = \frac{P}{P_0} \frac{1}{\sin h} \exp\left(\frac{-Z}{7,8}\right) \quad (\text{I.10})$$

La formule simplifiée est donnée par :

$$m = \frac{1}{\sin h} (1 - 0,1 Z)$$

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]:

$$T_L = 2,5 + 16 \beta_A + 0,5 \log (w) \quad (\text{I.11})$$

β_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 :

- Le rayonnement direct : c'est l'éclairement énergétique provenant directement du disque solaire (ciel clair), il est reçu par une surface réceptrice normale aux rayons solaires.
- Le rayonnement diffus : c'est l'éclairement énergétique provenant de toute la voûte céleste et il n'a pas d'orientation privilégié.
- 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).

Le rayonnement global G 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.

I.3.6. 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 ds 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]:

$$C = \frac{D_s}{D_i} \quad (I.12)$$

I.3.6.1. Valeur limite de la concentration

La concentration se fait sans apport de travail extérieur ; d'après la thermodynamique la température T_τ 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.

I.3.6.2. 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

solaires » [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 :

$$P_p = \sigma T_r^4 S \quad (I.13)$$

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

$$P_{Sol} = \sigma T_s^4 S_{sol} \quad (I.14)$$

Tel que $S_{sol} = 4 \pi R_{\epsilon_0}^2$ est la surface du soleil. Cette puissance est émise dans l'angle solide de 4π .

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

$$\Omega = S_c/D_{ts}^2 \quad (I.15)$$

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

$$P_c = \sigma T_s^4 S_c R_{\epsilon_0}^2 / D^2 \quad (I.16)$$

En remarquant que $\frac{R_{\epsilon_0}^2}{D^2} = \epsilon_0^2$ et en écrivant les densités de puissance sur le récepteur D_s et sur le concentrateur D_c , il vient que :

$$C = \frac{T_r^4}{T_s^4} \frac{1}{\epsilon_0^2} \quad (I.17)$$

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

$$C_{max} = \frac{1}{\epsilon_0^2} \quad (I.18)$$

En remplaçant ϵ_0 par sa valeur numérique, on trouve :

$$C_{max} = 46200 \quad (I.19)$$

La densité de puissance maximale sur le récepteur, s'écrit $D_s = C_{max} \cdot D_h$, sa valeur est $63,3 \text{ MW.m}^{-2}$; elle représente aussi la densité de puissance sur la surface du soleil. 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.3.6.3. 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 $2\varepsilon_0$ 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 θ inférieur à une valeur limite θ_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]:

$$S_c \, 2\pi (1 - \cos \varepsilon_0) \approx \pi S_c \, \varepsilon_0^2 \quad (\text{I.20})$$

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.

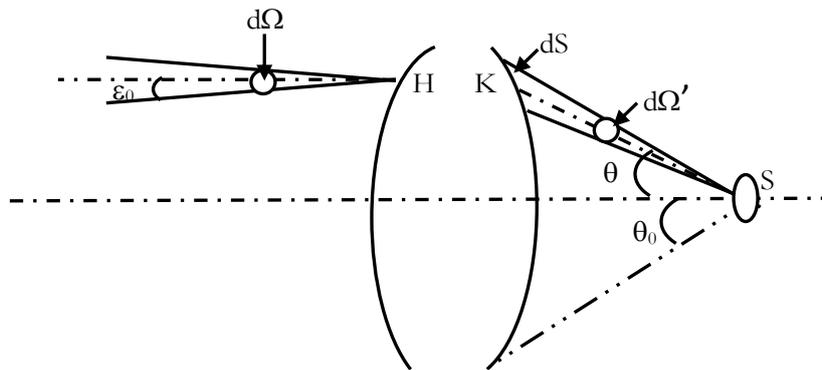


Figure I.5: Principe de concentration

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

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

$$d\xi = S \cos \theta \, 2\pi \sin \theta \, d\theta \quad (\text{I.21})$$

L'étendue optique du faisceau intercepté par S s'obtient en intégrant l'équation (I.21) entre les valeurs 0 et θ_0 . En appliquant la relation qui traduit le principe de conservation de l'étendue optique du faisceau :

$$n \, S \, d\Omega = n' \, S' \, d\Omega \quad (\text{I.22})$$

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 θ_0 :

$$C_{\text{opt}} = \frac{\sin^2 \theta_0}{\varepsilon_0^2} = C_{\text{max}} \sin^2 \theta_0 \quad (\text{I.23})$$

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 correspondante à la concentration maximale [CARI 84].

I.3.7 Energie solaire photothermique

Pour étudier l'énergie solaire photothermique, il est judicieux d'explicitier les phénomènes physiques surgissant lors de la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique et de l'énergie thermique à d'autres formes d'énergie. Dans ce contexte, le recours aux connaissances scientifiques de divers domaines de la physique tel que : la thermodynamique, l'optique, la transmission de la chaleur, la mécanique des fluides, l'automatique s'avèrent nécessaires. Nous présentons brièvement dans cette section un rappel de quelques notions fondamentales sur certains mécanismes prépondérants dans le photothermique solaire.

I.3.7.1. Transmission de la chaleur

Parmi les principaux phénomènes intervenant dans la conversion thermique de l'énergie utilisant des systèmes solaire, le mécanisme de la transmission de la chaleur s'impose de façon bien appropriée pour modéliser et évaluer la nature et la quantité de l'énergie mis en jeu. Il est convenu que le transfert de chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie.

Il s'agit généralement d'échange d'énergie entre deux systèmes lorsqu'une différence de température existe entre deux milieux adjacents différents, et ce, quel que soit la nature du milieu, même si le vide les sépare. A partir de cette définition, il apparaît clair que la maîtrise des transferts thermiques dans les systèmes photothermiques solaires s'avère déterminante non seulement du point de vue fondamental mais aussi dans le développement technologique approprié. Par exemple, le transfert de la chaleur joue un rôle prépondérant dans les techniques utilisées pour les échangeurs, moteurs thermiques, calorifugeage ainsi que l'utilisation de l'énergie solaire.

Trois modes de transfert de la chaleur particuliers sont très significatifs [SACA 00] : la conduction, la convection et le rayonnement.

Les processus physiques liés à de tels phénomènes sont à l'origine du changement de l'énergie cinétique des constituants fondamentaux des matériaux et milieux utilisés dans les

systèmes PT, comme les molécules, atomes, électrons libres, etc. Ces derniers pourront échanger tout ou une partie de leur énergie thermique, c'est-à-dire gagner ou perdre de l'énergie cinétique. Nous tenons à préciser que ces modes de transfert de chaleur peuvent se présenter en quatre régimes catégoriques :

Régime permanent : La température en tout point du milieu est indépendante du temps t .

Régime transitoire : Ces régimes correspondent à l'évolution du système d'un état permanent initial vers un autre état final permanent provoqué par un brusque changement.

Régime variable : Pour ce régime l'intensité de ces sources évolue constamment et le champ de temps dépend des valeurs instantanées des sources mais aussi de l'évolution intérieure.

Régime sinusoïdale ou périodique : La température en tout point M effectue des oscillations périodiques indépendantes de la condition initiale et dont l'amplitude et la phase ne dépendent que des coordonnées d'espace

a. Conduction

Ce mode d'échange d'énergie intervient pour rendre compte de la distribution de l'énergie cinétique moyenne homogène dans un milieu donné. Ce processus s'élabore de sorte que les particules situées dans les zones d'énergie cinétique à valeur moyenne la plus élevée, cèdent leur énergie aux particules avoisinantes par diffusion vers les zones où l'énergie cinétique moyenne des particules est plus faible.

En d'autres termes, le transfert thermique dans ce cas s'effectue par diffusion de l'énergie des particules situées dans les zones où la température est élevée, vers les zones où elle est plus faible.

Ce processus est régi par la Loi de Diffusion de Fourier qui définit la densité du courant de chaleur $\vec{\varphi}$ en un point donné, appelée encore densité du flux représentée par une fonction linéaire du gradient de température en ce point :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (\text{I.24})$$

λ est l'opérateur qui définit la conductivité thermique du milieu au point considéré. C'est un tenseur symétrique du second ordre. Pour un milieu isotrope, la conductivité thermique se caractérise simplement par un scalaire unique λ .

- Régime permanent : La température en tout point du milieu est indépendante du temps t .
- Régime transitoire : Ces régimes correspondent à l'évolution du système d'un état permanent initial vers un autre état final permanent provoqué par un brusque changement d'état.
- Régime variable : Pour ce régime l'intensité de ces sources évolue constamment et le champ de temps dépend des valeurs instantanées des sources mais aussi de l'évolution intérieure.

- Régime sinusoïdale ou périodique : La température en tout point effectue des oscillations périodiques indépendantes de la condition initiale et dont l'amplitude et la phase ne dépendent que des coordonnées d'espace.

b. Convection

Séparément de la conduction, la convection est un mode de transfert de chaleur qui se produit uniquement dans le cas des milieux fluides. Elle apparaît essentiellement lorsqu'un fluide, liquide ou gaz, est en mouvement et présente des inhomogénéités spatiales de température.

Plus précisément, la convection survient quand les échanges thermiques s'effectuent entre une paroi et un fluide en mouvement. Contrairement à la conduction qui peut être traduite comme étant un transfert d'énergie par des mouvements microscopiques, la convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques. La convection peut prendre deux formes différentes :

- La convection forcée : le mouvement du fluide est provoqué par une action extérieure : pompe, ventilateur.
- La convection libre (ou naturelle) : le mouvement provient de la différence de densité entre les parties chaudes et froides du fluide, par l'entremise des différences de masse volumique et d'un champ de force extérieure qui est généralement due à l'accélération de la pesanteur.

La convection se traduit donc par un mouvement du fluide autour de la paroi d'un solide porté à une température T . Du point vu pratique, les processus de transfert par convection sont difficiles à déterminer dans le cas des fluides. Des approximations sont nécessaires pour la représentation adéquate du transfert de chaleur par ce mode. En effet, en tenant compte du fait que la quantité de chaleur échangée recherchée est celle produite entre le fluide et la paroi solide qui le limite, on introduit, par analogie avec les transferts thermiques par conduction, un coefficient d'échange superficiel h qui dépend principalement de la nature du fluide (sa viscosité en particulier), de la vitesse de l'écoulement (laminaire ou turbulent), de l'état de surface de la paroi, des températures de surfaces et du fluide. On admet que la densité du flux de chaleur φ , à travers un élément de surface de la paroi, soit proportionnelle à la différence entre la température T_p de cet élément de surface et une température moyenne du fluide T_f :

$$\varphi = h (T_p - T_f)S \quad (I.25)$$

c. Rayonnement

Contrairement à la conduction et la convection, le rayonnement est le mode de transfert d'énergie thermique ne nécessitant aucun support matériel solide ou fluide. Un exemple très caractéristique de ce mécanisme est le rayonnement solaire qui nous provient du soleil après avoir parcouru une distance considérable dans le vide spatial. Un autre exemple très courant peut être aussi cité, la sensation de chaleur sur la peau spontanée qui nous parvient lorsqu'on ouvre un four très chaud, même à une certaine distance. Ce mécanisme pourrait s'expliquer par le transfert convectif entre le four et notre corps si nous considérons que les masses d'air ambiant échauffées au voisinage de l'ouverture du four mettent un certain temps à parcourir la distance nous séparant de celle-ci. Cependant, si nous concevons que la chaleur du four nous parvient de façon assez spontanée (très vite), alors il est plus judicieux d'associer ce phénomène physique à celui du transfert d'énergie par rayonnement électromagnétique, dont la propagation est quasi instantanée, du moins à l'échelle des distances terrestres. Ce transfert d'énergie est généralement appelé « rayonnement thermique ».

En effet, pour définir le rayonnement thermique de façon systématique, il est raisonnable de positionner les gammes de longueurs d'onde du rayonnement solaire. Le spectre du rayonnement solaire s'étend de $0,2 \mu\text{m}$ à $25 \mu\text{m}$. En dehors de l'atmosphère la plus grande partie de l'énergie se situe sur la bande $0,2 \mu\text{m}$ à $4 \mu\text{m}$, alors qu'au sol elle se place sur la bande $0,29 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m}$. Le rayonnement thermique est quant à lui défini comme étant le rayonnement émis sur l'intervalle spectral $0,1 \mu\text{m}$ à $100 \mu\text{m}$, ce qui correspond à l'émission des corps aux températures que nous aurons à considérer. Donc tout corps possédant une température supérieure au zéro absolu, émet dans l'espace environnant un rayonnement dont l'énergie se répartit sur une région spectrale correspondant à un intervalle de longueur d'onde $\Delta\lambda$ comprise dans ce dernier intervalle.

Dans le cadre du photothermique solaire, il est approprié de définir le rayonnement thermique du corps noir. C'est un corps absorbant intégralement toutes les radiations qu'il reçoit. Dans ces conditions, le flux réfléchi est pratiquement nul et le flux partant est seulement constitué du flux émis. Théoriquement, on peut le modéliser comme étant une enceinte fermée présentant seulement un orifice de très petit diamètre. En pratique, le corps noir est assez bien approximé par uniquement une surface recouverte de noir de fumée.

d. Combinaisons des différents modes de transfert

Bien que les trois modes basiques du transfert thermique ci-dessus (conduction, convection, rayonnement), considérés séparément, représentent convenablement certains systèmes photothermiques, bien d'autres cas restent à décrire. En réalité, il advient que les

échanges thermiques sont souvent considérablement liés. Par exemple, la conduction et le rayonnement sont généralement conjugués dans le cas de solides non opaques comme les verres ou les matières plastiques. Le transfert thermique par conduction, convection et rayonnement coexistent à la fois dans le cas des fluides.

Lorsque l'échange de chaleur dans les corps est accompagné d'une variation de température, souvent un changement de phase se produit soit par vaporisation, ou condensation, fusion, congélation ou autre, constituant ainsi une source ou puits de chaleur supplémentaire.

Exemple courant

Le cas le plus souvent cité est l'eau chauffée dans un récipient sur une flamme où le transfert d'une partie de l'énergie libérée par combustion à l'eau contenue dans le récipient fait intervenir :

- La convection ainsi que le rayonnement dans le transfert entre les gaz chauds de la flamme et la paroi externe du récipient.
- La conduction à travers la paroi et les couches fluides très proches de celle-ci.
- La convection et peu de conduction au sein de la masse d'eau.
- Enfin dès que l'échauffement devient suffisant, l'ébullition et ensuite la vaporisation interviennent et constituent des éléments essentiels de l'échange thermique.

I.3.7.2. Fluide caloporteur

Si nous le comparons à l'état solide qui est caractérisé par un seuil de contraintes en dessous duquel aucune déformation ne se produit, un fluide caloporteur peut se définir physiquement comme un corps qui présente une vitesse de déformation non nulle à l'application de contraintes tangentielles même très faibles. Ces fluides ont pour rôle de véhiculer la chaleur entre l'absorbeur et l'utilisation ou le stockage.

Un liquide quant à lui est un fluide occupant un volume qui ne varie que peu sous l'action de la température ou de la pression. Dans les conditions habituelles, le principe de conservation de la masse s'identifie au principe de conservation du volume.

Un gaz est un fluide qui occupe toujours le volume maximal qui lui est offert. C'est un fluide compressible ou expansible.

On utilise principalement trois sortes de fluides, l'air, l'eau et les gliothermes: [\[BERN 82\]](#)

- L'air: son abondance et sa gratuité font de l'air un fluide comportant les avantages les plus évidents. Cependant, son principal handicap est sa faible capacité calorifique. Pour disposer d'une puissance de chauffage raisonnable il faut brasser des volumes d'air très importants, ce qui implique des tuyaux et des échangeurs de grande dimension. En revanche, l'air ne cause

pas de problèmes de gel et de corrosion comparé à l'eau mais une puissante ventilation forcée peut être nettement plus bruyante qu'un petit circulateur à eau.

- L'eau: est non seulement bon marché mais possède des propriétés physiques très favorables pour être un excellent fluide caloporteur à moyenne température (chaleur massique inégale, bonne densité et faible viscosité). Néanmoins, l'eau peut poser des problèmes de fonctionnement aux températures extrêmes. Par exemple, le risque de gel peut survenir pour les capteurs exposés à un ciel dégagé pendant une nuit d'hiver. Mais le gel peut devenir inoffensif par l'emploi d'absorbeurs souples ou par l'insertion, dans un absorbeur métallique, de tuyaux en plastiques remplis d'air qui encaisseront la dilatation de l'eau au moment de sa transformation en glace.

Concernant les hautes températures, les risques d'ébullition sont fréquents. Ces phénomènes peuvent être contrés moyennant certaines précautions par mise en pression du système. L'eau calcaire a aussi l'inconvénient de déposer du tartre dans les canalisations, surtout aux températures supérieures à 60°C. Enfin la conductibilité électrique relativement importante de l'eau favorise la corrosion électrolytique des métaux, principalement de l'aluminium.

- Les gylthermes: ce sont des liquides organiques à base de poly phényles hydrogénés ou d'hydrocarbures linéaires. Il existe une dizaine de variétés de gylthermes. Trois d'entre eux semblent particulièrement adaptés au cas de l'énergie solaire.

-HVS 13 pour la gamme de température allant de -25 à 180°C

-ADX 10 pour la gamme de température allant de -50 à 260°C

-TH pour la gamme de température allant de 0 à 340°C

Ce dernier produit est utilisé dans la centrale solaire d'Odeillo. On observe les mêmes défauts que l'eau et, de ce fait, ils permettent de s'affranchir des problèmes de gel, d'ébullition, de corrosion des métaux et d'entartrage. Mais ils attaquent les matières plastiques usuelles à partir de 60°C et leur mise en œuvre est délicate car il faut débarrasser les canalisations de toute trace d'eau ou d'air pour éviter leur détérioration. Leur chaleur massique vaut environ 0.5 Kcal/Kg K seulement. Leur viscosité, faible, reste cependant supérieure à celle de l'eau.

Ce sont des liquides très «mouillants», ce qui facilite les fuites. De plus ils sont combustibles à haute températures [\[BERN 82\]](#).

I.3.8. Effet de masque

Les pertes d'ensoleillement dans un capteur photothermique peuvent être une conséquence directe de l'effet des reliefs se localisant dans un site donné tel que les bâtiments, les

arbres, les montagnes, etc. Ces derniers peuvent étendre leur ombre sur le capteur à certaines heures de la journée.

Dans les régions à relief accidenté, les calculs des pertes d'ensoleillement sont déterminés à l'aide d'une carte dotée de courbes de niveau. Le relief entourant est reporté sur un abaque d'ensoleillement où les altitudes sont transformées en hauteurs au-dessus de l'horizon (en degrés).

L'implantation d'un système photothermique en site urbain ne s'avère pas une tâche difficile. Le choix judicieux repose sur une connaissance bien détaillée des caractéristiques du site. Par exemple, il est essentiel de connaître le niveau et les variations de température, l'ensoleillement et l'heure des brumes ou brouillards, ou les masques proches (végétation, urbanisme) et lointains (montagnes).

Le principal paramètre est évidemment la durée effective d'insolation en hiver, donc l'effet des masques. Pour l'évaluer, on utilise le diagramme des trajectoires du soleil sur lequel superpose le relevé en hauteur et azimuth des masques proches et lointains [1].

$$h_M = \text{Arctg} (\Delta a / \Delta d) \quad (\text{I.26})$$

Avec: Δa : différence d'altitude entre la crête et le site étudié.

Δd : distance de la crête au site.

La figure suivante donne un exemple du report de masques sur un diagramme solaire [ZERG 98].

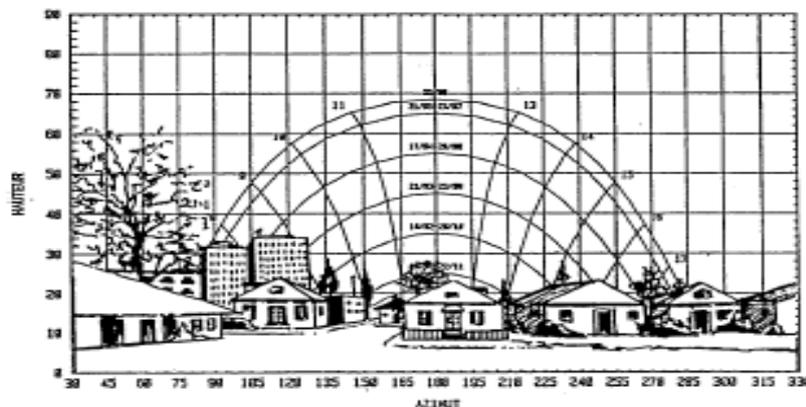


Figure I.6: Effets des Masque

Pour les systèmes photothermiques, on se place en un point du terrain réduisant au maximum l'influence des masques et on adopte, une orientation plein Sud maximisant les apports solaires. D'autres paramètres peuvent modifier ces options :

- Si le diagramme des masques peut révéler une perte d'ensoleillement les premières heures du jour par exemple. On modifiera alors l'orientation du système en le tournant de quelques degrés vers l'ouest.

- Si les brumes et les brouillards sont matinaux et fréquents en hiver, il faudra orienter le système de quelques degrés vers l'ouest pour qu'il bénéficie mieux de l'ensoleillement l'après-midi.

I.3.9. 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.

I.3.9.1. 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.

I.3.9.2. Eau chaude sanitaire par voie solaire



Figure I.7: *Chauffe-eau solaire [2]*

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 m², 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.

I.3.9.3. 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 m³, 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 exposés 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/m², 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]

I.3.9.4. 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 l/m² soit 2,5 m³/m²/an. Le coût des matériaux et installations est estimé à 1000 DA/m², ou encore à 100 DA/m³ d'eau distillée. A titre comparatif, on évalue le coût de transport de l'eau à 1000 DA/m³ 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 m³/jour).

I.3.9.5. 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 m², on peut obtenir jusqu'à 30 000 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 kg) pour une surface de captage de 1 m², un condenseur de 10 m², un évaporateur de 1 m² et une chambre froide de 100 litres produisant 5 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°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 parabolique 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]

I.3.9.6. Cuisinière solaire



Figure I.8 : Cuisinière solaire [3]

On utilise le phénomène de concentration du rayonnement solaire (de 100°C à 300°C) en utilisant des réflecteurs paraboliques fabriqués de plaques d'aluminium. Les aliments pour cuisson sont placés au foyer. La conception et la réalisation de ces cuisinières résident dans la simplification des technologies et des matériaux à faible coût, et compétitifs par rapport au four électrique standard.

Une production en série et à grand nombre réduirait les coûts (5000 DA/cuisinière).

Une autre technologie est d'actualité, avec un système de 12 miroirs en verre argenté recouverts au dos d'une feuille de cuivre et montés sur châssis de fer. [CHAK 03]

I.3.9.7. Four solaire

La technologie est assez complexe et très coûteuse (63 miroirs de 45 m² 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 m². 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]

I.3.9.8. Centrales solaires thermodynamiques



Figure I.9 : 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).

I.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce premier chapitre tous les paramètres influençant l'énergie solaire photothermique.

Nous avons décrit en premier le mouvement apparent du soleil sur les systèmes photothermiques, puis nous avons introduit les paramètres nécessaires régissant leur éclairage tel que la durée du jour, durée d'ensoleillement et l'orientation du capteur photothermique...

Nous avons ensuite présenté brièvement en un deuxième temps les atténuations du rayonnement solaire et sa concentration ainsi que les notions de transmission de chaleur afin de nous permettre une bonne maîtrise des systèmes photothermiques à concentration.

Enfin nous avons clôturé le chapitre par une présentation de quelques applications récentes et perspectives de la photothermie. Le but est de concevoir dans cette présente étude un système performant qui répond à nos exigences.

Références bibliographiques

- [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 Pour La Ville De Tlemcen (Algérie)* ». Rev. Energ. Ren, Vol.6, (2003), pp. 69-76.
- [CAPD 86] Capderou M., « *Atlas Solaire De l'Algérie* », (1986), EPAU, Tome I, II, III.
- [BERN 80] Bernard R., Menguy G., Schwartz M., « *Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique Et Applications* », (1980), Tech et Doc, 2^{ème} Edition.
- [BRIC 84] De Brichambaut P., « *Evaluation énergétique d'un gisement solaire* », (1984), Tech et Doc.
- [CHAS 84] Chasseriau J.M., « *Conversion Thermique du Rayonnement Solaire* », Edition. Dunod, (1984), France, pp. 99-113 et pp. 217-240.
- [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.
- [SACA 00] Sacadura J.F., « *Initiation aux Transferts Thermiques* », 6^o tirage, Technique et Documentation, Lavoisier, (2000), Paris (France), pp. 445.
- [BERN 82] Bernard R., Menguy G., Schwartz M., « *Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique Et Applications* », Technique et Documentation, Lavoisier, (1982), France, pp. 215.
- [ZERG 98] Zerga A., Benyarou F., Benyoucef B., « *Optimisation du Rendement d'une Cellule Solaire N⁺P au Silicium Monocristallin* ». (1998), Rev. Energ. Ren, SIPE, pp. 95-100.
- [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 Absorbteur d'un Concentrateur Solaire Cylindro –Parabolique* », Rev. Energ. Ren, (2007), ICRESD (Tlemcen), pp. 21-28.

Webographie

- [1] www.web.co.bw/sib/somes_3_2_description.pdf
- [2] www.wikipedia.org/wiki/solar_heater_dsc00632.jpg
- [3] www.wikipedia.org/wiki/cuiseur_solaire.jpg
- [4] www.wikipedia.org/wiki/Dish_stirling_at_odeillo.jpg
- [5] www.wikipedia.org/wiki/Energie_solaire_thermique
- [6] www.lemonde.fr/web/article/0,1-0.html
- [7] www.nytimes.com/2008/02/01/technology/01solar.html
- [8] www.ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/csp/ps10_final_report.pdf
- [9] www.actu-environnement.com/ae/news/espagne_solaire_concentration.php4
- [10] www.tenerrdis.fr/rep-edito/p-456.html

CHAPITRE II

ELEMENTS ESSENTIELS

DES SYSTEMES PHOTOTHERMIQUES

Chapitre II

Eléments essentiels des systèmes photothermiques

II.1. Introduction

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

Nous notons quatre champs d'applications en fonction de la température: [\[SPIT 79\]](#)

- applications aux basses températures solaires ($T < 60^{\circ}\text{C}$) : chauffage de l'eau sanitaire, chauffage des piscines...,
- applications aux moyennes températures solaires ($60^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$): chauffage des habitations, réfrigération, climatisation, dessalement de l'eau de mer, production d'énergie mécanique...,
- applications aux hautes températures solaires ($150^{\circ}\text{C} < T < 800^{\circ}\text{C}$): production d'énergie mécanique, production de vapeur, dissociation catalytique de l'eau...,
- applications aux très hautes températures solaires ($T > 800^{\circ}\text{C}$): dissociation thermique de l'eau, magnétohydrodynamique, thermoélectricité.

Les performances relatives à chacun des champs, ou encore, le rapport performance/coût du capteur détermine l'intérêt du système de conversion de l'énergie solaire par rapport aux autres sources d'énergie disponibles. Le prix du capteur constitue l'essentiel du coût total de l'installation solaire. Pour un site donné, les performances du capteur déterminent essentiellement la conception ainsi que les propriétés optiques et thermiques des matériaux qui le composent. Nous n'occultons pas l'importance des systèmes concentrateurs, des fluides de transfert et des milieux de stockage de la chaleur ainsi que les problèmes posés par la convection et la conduction.

Dans ce chapitre nous présentons les paramètres et les éléments essentiels des systèmes photothermiques pour une bonne conception de ces derniers, c'est-à-dire pour l'obtention d'un bon rendement de conversion.

II.2. Principaux matériaux utilisés en photothermique

De nouveaux problèmes relatifs aux matériaux sont apparus lors du développement des applications thermiques de l'énergie solaire. Une partie de chaque réalisation solaire doit être installée à l'extérieur et doit pouvoir résister aux divers agents atmosphériques pendant au moins une dizaine d'années. Les agressions, dont l'installation extérieure pourra être dégradée, proviennent principalement des causes suivantes:

- Le rayonnement solaire, dont la composante ultra-violette peut induire des réactions photochimiques modifiant la constitution des matériaux.
- La pluie, qui pose des problèmes d'étanchéité et aussi d'hydrolyse de certaines substances organiques.
- La rosée, fréquemment oxydante car elle peut contenir un peu d'eau oxygénée.
- La grêle qui peut casser les couvertures des capteurs.
- Le vent chargé de sable qui raye les surfaces transparentes.
- La poussière, particulièrement gênante en ville ou à proximité d'industries polluantes.
- Les variations de température (entre -10°C par nuit d'hiver rigoureux et $+130^{\circ}\text{C}$ pour un capteur laissé vide au soleil) qui entraînent des dilatations.

II.3. Capteur 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.3.1. Capteurs solaires 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].

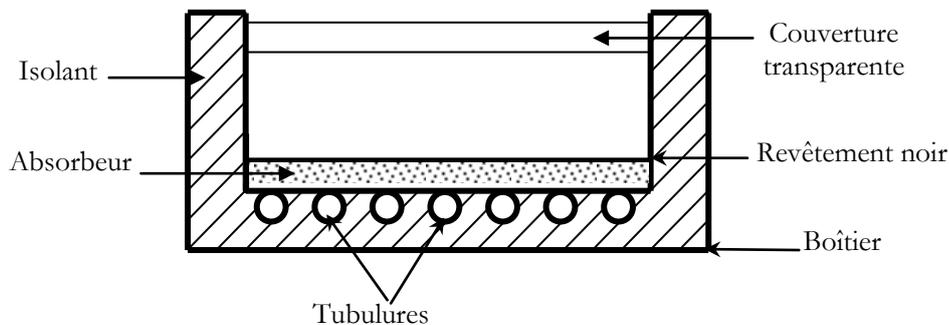


Figure II.1: Coupe longitudinale d'un capteur solaire plan

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 82].

II.3.1.1. 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 92%. 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 150°C). Outre les plaques rigides que l'on vient de mentionner, des films minces ont été également employés comme couvertures de capteurs :

- Le polytéréphtalate d'éthyle (ou terphane, ou mylar)
- Le fluorure de polyvinyle
- Le polyester renforcé de fibres de verre
- Le polyéthylène de basse densité

II.3.1.2. Absorbeurs

Ils transforment le rayonnement reçu en chaleur et échange celle-ci avec le fluide caloporteur. L'absorbeur 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'absorbeur 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 α_λ , d'émission ε_λ , de réflexion ρ_λ et de transmission τ_λ ; λ_c est la longueur d'onde critique.

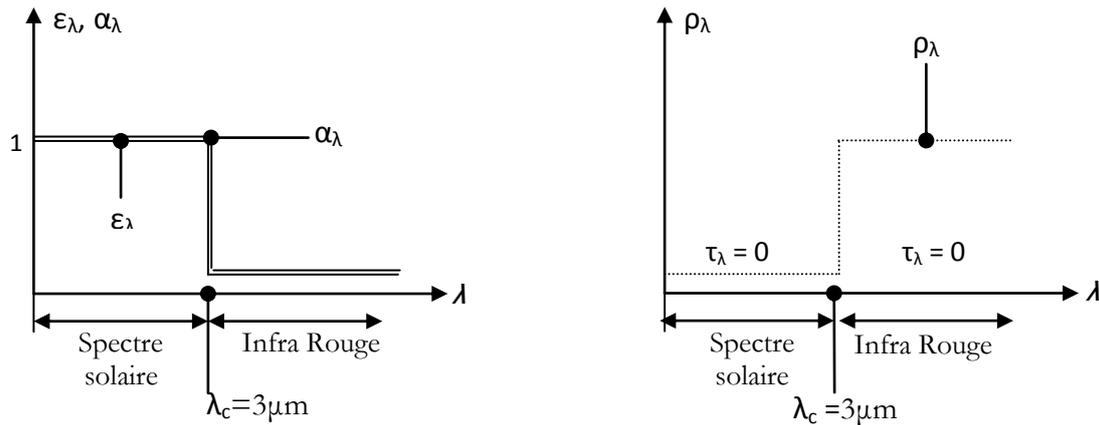


Figure II.2: Facteurs monochromatiques d'absorption α_λ , d'émission ε_λ , de réflexion ρ_λ et de transmission τ_λ pour une surface idéale

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 α et le coefficient d'émission ε . Nous remarquons que l'on est encore assez loin de la courbe idéale présentée sur la figure II.2. Dans la pratique le rapport $\frac{\alpha_s}{\varepsilon}$ (α_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	α	ε
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.3.1.3. 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°C et $0,053 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 200°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 dégradable 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.3.1.4. 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.

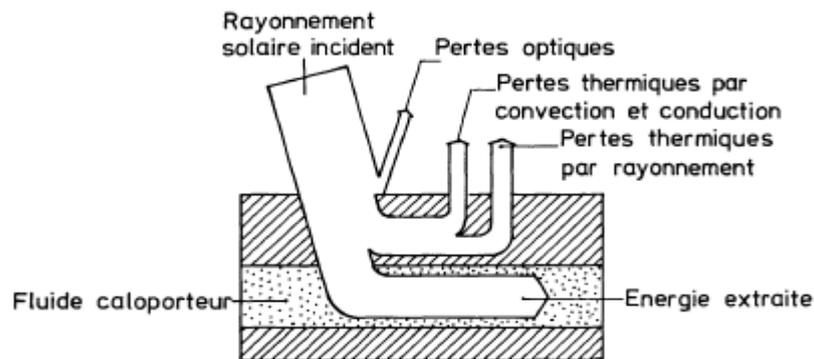


Figure II.3 : Bilan énergétique d'un capteur [SPIT 79]

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

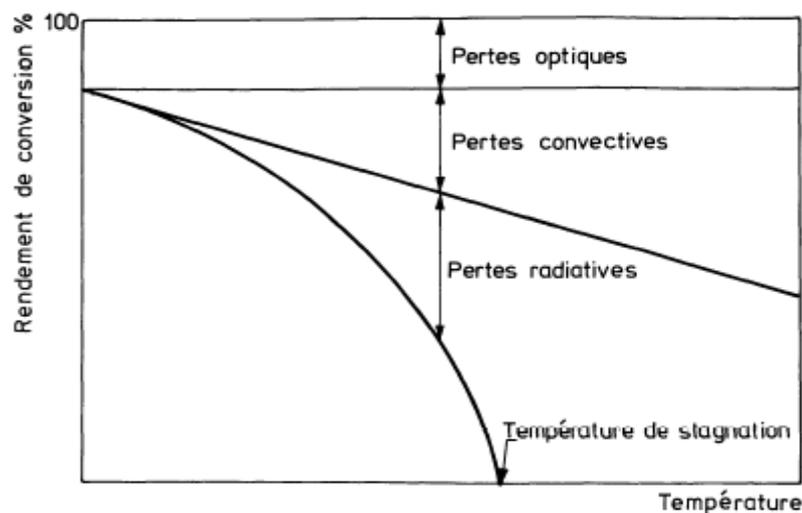


Figure II.4 : Evaluation des pertes d'un capteur en fonction de la température [SPIT 79]

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.

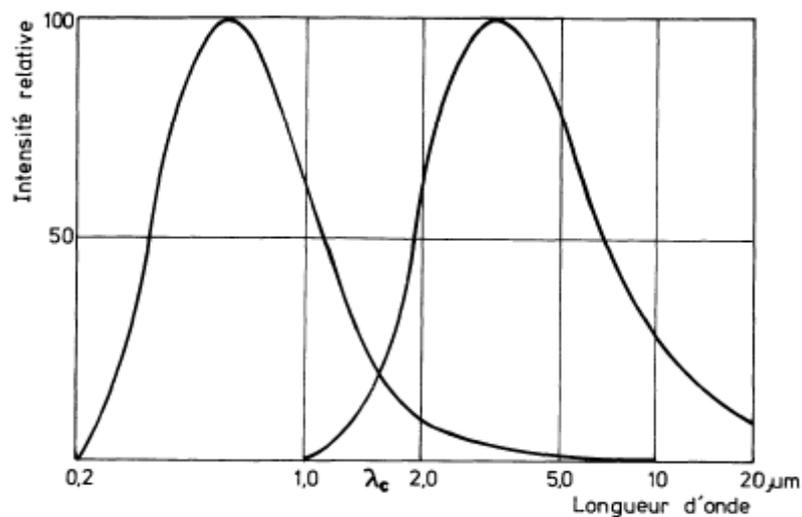


Figure II.5 : Intensité spectrale du rayonnement émis par un corps noir à 900 K [SPIT 79]

On peut définir une longueur d'onde de coupure λ_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 $\epsilon(\lambda, T)$ intégrées dans tout le demi-espace afin de tenir compte de leur anisotropie. Le capteur sélectif idéal est défini tel que :

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

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 :

$$\left. \begin{array}{l} \rho(\lambda, T) = 0 \quad \text{pour } 0 < \lambda < \lambda_C \\ \rho(\lambda, T) = 1 \quad \text{pour } \lambda_C < \lambda \end{array} \right\}$$

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 :

$$\left. \begin{array}{l} \tau(\lambda, T) = 1 \quad \text{pour } 0 < \lambda < \lambda_C \\ \rho(\lambda, T) = 1 \quad \text{pour } \lambda_C < \lambda \end{array} \right\}$$

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.3.1.5. 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 [1].

II.3.2. Systèmes solaires à concentration

Les capteurs plans classiques ne permettent pas, en général, de dépasser 130°C au niveau de la surface absorbante. Cette température peu élevée constitue une limite au rendement thermodynamique des systèmes qui les utilisent. Il faut une surface de 50 m² par KW, et ces capteurs ne sont donc pas adaptés à la production de forte puissance. Pour augmenter le rendement, il faut élever la température de la source chaude et, par conséquent, concentrer le rayonnement solaire en acceptant de perdre le bénéfice du rayonnement diffus non concentré parce qu'il n'a pas de direction privilégiée.

II.3.2.1. Avantages et inconvénients des systèmes à concentration comparés aux capteurs plans

a) Avantages

- Les surfaces réfléchissantes nécessitent moins de matière et sont structurellement plus simples que les collecteurs plans; le coût au m² de l'échangeur thermique est inférieur à celui d'un système à concentration.
- L'aire d'absorption d'un système à concentration est plus faible que celle d'un capteur plan pour la même surface collectrice du rayonnement solaire (surface spécifique plus faible).
- Vu que l'aire de l'absorbeur est plus petite que celle d'un capteur plan, la densité d'énergie, au niveau de l'absorbeur, est supérieure, donc le fluide caloporteur peut travailler à température plus élevée pour la même surface captatrice d'énergie.

- A cause de la moindre surface spécifique de l'absorbeur, on peut utiliser des surfaces à absorption sélective ou même une isolation par le vide pour réduire les pertes thermiques et augmenter le rendement de manière économique.
- Les systèmes à concentration peuvent être utilisés à la production d'énergie électrique. Le nombre d'heures annuel de fonctionnement est plus élevé que celui d'un collecteur plan. Le surcoût de l'installation peut s'amortir en un temps plus court par un gain supplémentaire en énergie.
- Etant donné que la température avec des systèmes à concentration est plus élevée, la quantité de chaleur qui peut être stockée est plus grande et, par conséquent, le coût du stockage est plus faible pour des systèmes à concentrateurs qu'à capteurs plans.
- Pour les applications de chauffage et de climatisation, la température plus élevée du fluide caloporteur atteinte avec les systèmes à concentration permet d'obtenir des rendements plus élevés pour le cycle de refroidissement que dans les systèmes à collecteurs plans; donc ces systèmes sont plus économiques.
- En cas de non-fonctionnement en hiver, il faut moins d'antigel dans les systèmes à concentration que dans les systèmes à capteurs plans. [\[BERN 80\]](#)

b) Inconvénients :

- On collecte peu ou pas du tout de rayonnement diffus.
- Dans les systèmes réfléchissants stationnaires, il faut ajuster périodiquement soit le concentrateur soit le récepteur thermique selon l'époque de l'année. Le rendement est plus faible que pour des systèmes à poursuite qui, par contre, sont plus coûteux.
- Dans les systèmes à poursuite à chaudière mobile, il faut au moins une connexion flexible pour extraire le fluide chaud de l'échangeur thermique, d'où la nécessité d'un entretien périodique et avec des pannes possibles.
- Le pouvoir réflecteur des miroirs décroît dans le temps et il faut les réargenter ou les repolir.
- Il existe encore peu de réalisations de grandes puissances à réflecteurs stationnaires à haute concentration et des recherches supplémentaires sont nécessaires pour étudier la fiabilité et la maintenance de tels systèmes.
- Un capteur à concentration linéaire recueille l'énergie solaire thermique afin de produire de la vapeur. Dans l'état antérieur de la technique, ce type de capteur concentrateur nécessite un suivi parfait de la course du soleil dans le ciel, donc une motorisation qui le rendait de fait inutilisable en zones à faible développement technologique. Dans ce capteur, la conception originale du second étage supprime la nécessité d'un suivi parfait,

remplacé par une dizaine de repointages au cours d'une journée, effectués manuellement par le conducteur du capteur. On allie ainsi les avantages de la rusticité et de la concentration énergétique.

- Pour dessiner un capteur, il convient de tenir compte de nombreux paramètres fortement imbriqués. Comme en architecture navale, tout ici est affaire de compromis, le capteur pouvant d'ailleurs être considéré comme une "voile solaire". Au sujet du taux de concentration global du système par exemple, on constate qu'il y a une limite basse et une limite haute:

Si on concentre peu, un seul repointage quotidien, suffit, mais le niveau de température est moins élevé, et l'avantage du capteur concentrateur s'estompe au profit du capteur plan qui n'a pas besoin de repointage.

Si on concentre fortement, on bénéficie alors largement d'un haut niveau de température élevée, mais le suivi du soleil devient très pointu, et l'on dérive rapidement vers la nécessité d'une automatisation ou d'une motorisation.

II.3.2.2. 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.3.2.2.1. Système à récepteur central

Un champ circulaire de miroirs concentre les rayons solaires sur un capteur localisé au sommet d'une tour et ce afin de chauffer un fluide caloporteur (air, eau, sels fondus, sodium,...) qui permet de transporter la chaleur vers le système de production d'électricité. Des températures très élevées dépassant 1000 °C peuvent être atteintes, ce qui permet la réalisation d'un cycle combiné avec une grande performance [DERB 07].

Dans l'exemple dans la filière de la solaire thermodynamique, la centrale solaire à miroirs de Fresnel pourrait néanmoins devenir plus compétitive que les systèmes à collecteurs distribués.

Cette centrale a été inventée par le physicien français Augustin Fresnel ; la lentille de Fresnel a été conçue pour équiper le système optique des phares de signalisation marine (Voir figure II.6) [2].

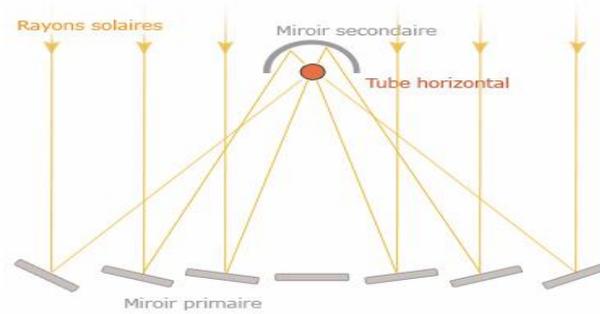


Figure II.6: Principe de fonctionnement d'un concentrateur à miroirs de Fresnel [2]

Le concentrateur de Fresnel réside dans ses miroirs plans (plats) dits "réflecteurs compacts linéaires". Chacun de ces miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube absorbeur. Un fluide caloporteur est chauffé jusqu'à 500°C en circulant dans ce tube horizontal. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité [2].

II.3.2.2.2. Systèmes à collecteurs distribués

a) Concentrateur cylindro-parabolique

Les miroirs cylindro-parabolique (en forme d'auge) concentrent les rayons solaires dans l'axe focal, sur lequel se trouve le tube absorbeur (Voir figure II.7).

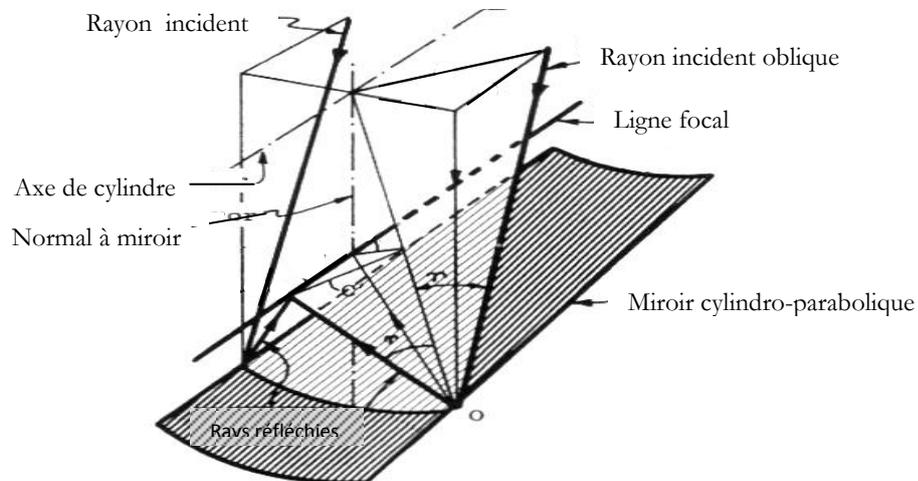


Figure II.7: Schéma d'un collecteur à concentrateur cylindro-parabolique

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.8:

[OGIL 03]

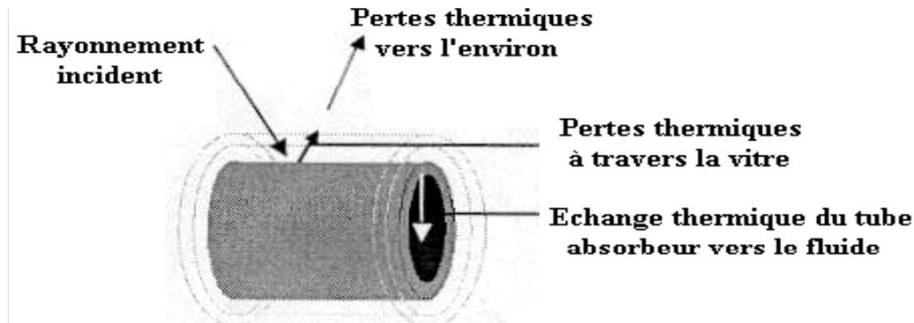


Figure II.8: Schématisation des échanges thermiques entre les différents éléments du collecteur cylindro-parabolique.

Pour être efficaces, ces concentrateurs doivent se déplacer pour suivre la course apparente du soleil avec deux orientations possibles (Voir figure II.9) [OGIL 03]:

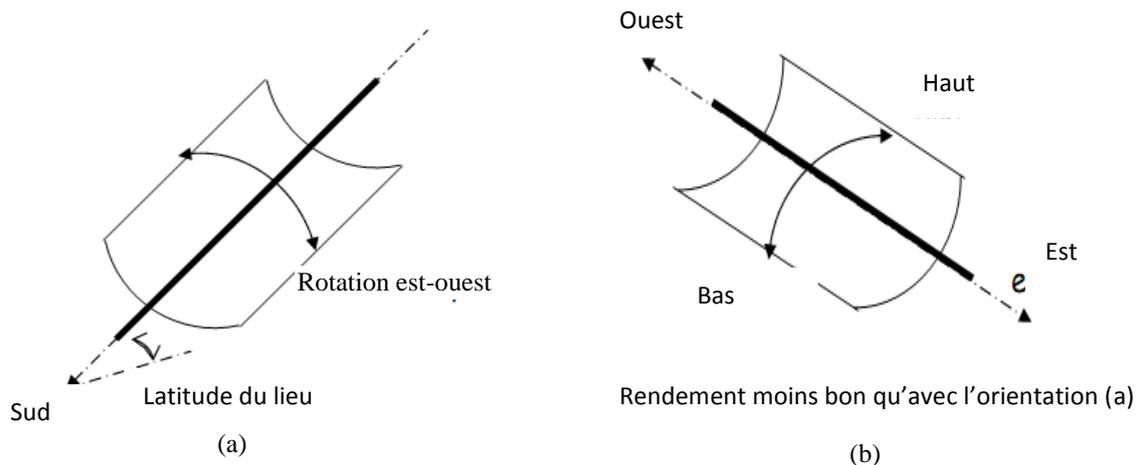


Figure II.9: L'orientation d'un concentrateur cylindro-parabolique

(a) : Orientation axe rotation terrestre
Tube récepteur // axe rotation Terre.
Suivi solaire Est-Ouest

(b) : Orientation est – Ouest
Tube récepteur // axe est - ouest.
Suivi solaire haut/bas 2-3 fois/jour.

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)

θ : 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.

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].

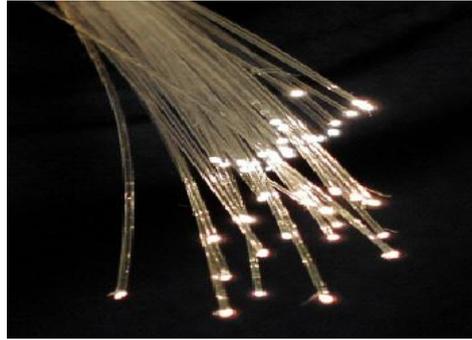


Figure II.12 : *Fibre optique* [3]

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 cœur. 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.

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 [4]:

- 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.

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 [5].

La silice se présente soit sous forme de cristaux non-moléculaires formés de motifs tétraédriques 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.

II.5. Conclusion

Le capteur plan convient mieux aux applications à basse température, si le stockage s'effectue à des températures situées entre 30° et 60°C. Une des meilleures applications du chauffage solaire concerne le chauffage des piscines; Les capteurs travaillent alors dans des conditions où le rendement est compris entre 60 et 70%. Par contre, si l'on cherche à obtenir des températures plus fortes, il y a lieu de prévoir une très grande surface du capteur ou l'utilisation des capteurs à concentration. Pour notre cas nous optons pour 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 conçus pour le transport de l'énergie solaire concentrée : les fibres optiques fabriquées en Polyméthylméthacrylat ou en Silice.

Références bibliographiques

- [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.
- [SACA 00] Sacadura J.F., « *Initiation aux Transferts Thermiques* » 6^o tirage, Tec & Doc Lavoisier, Paris (France), 445 p. (2000).
- [BERN 83] Bernard R., Menguy G., Schwartz M., « *Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique et Applications* », Technique et Documentation Lavoisier, Paris, (1983),
- [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 80] Bernard R., Menguy G., Schwartz M., « *Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique et Applications* », Technique et Documentation Lavoisier, Paris, (1980),
- [DERB 07] Derbal H., « *Conversion solaire thermique à concentration, les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques* », Bulletin des Energies Renouvelables, N. 11, CDER, (2007), pp. 24-25.
- [OGIL 03] Ogilvie K., « *L'Abc des Technologies de l'Energie Renouvelables* », Pollution Probe, Canada, (2003).
- [SENO 94] Senoussaoui N., « *Etude et Réalisation D'un Concentrateur Parabolique, Mesure et Simulation* ». Thèse de Magister, Université de Tlemcen, (1994).
- [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.

Webographie

- [1] www.energie-solaire.com/fr/pdf/produits/xxsel/xxsel_02_fr.pdf
- [2] www.ecosources.info/dossiers/Centrale_miroir_Fresnel_solaire_thermodynamique
- [3] www.Wikipedia.org/wiki/Fibre_optique
- [4] www.swicofil.com/products/278polymethylmethacrylate.html chapi2
- [5] www.Wikipedia.org/wiki/Silice

CHAPITRE III

ETUDE THEORIQUE ET ANALYSE DES SYSTEMES ALIMENTES PAR

FIBRES OPTIQUES

Chapitre III

Etude théorique et analyse des systèmes alimentés par fibres optiques

III.1. Introduction

Les capteurs solaires transforment l'énergie solaire du rayonnement captée en une énergie interne au milieu du transport. Le composant principal de n'importe quel système solaire est le dispositif « capteur solaire ». C'est un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire entrant, le convertit soit en électricité par des capteurs photovoltaïques, soit en chaleur par des capteurs photothermiques. Les caractéristiques des capteurs photothermiques pour ces différentes applications se situent dans une gamme très étendue. Aussi, les technologies et les matériaux utilisés pour leur conception sont très variés. Dans l'industrie, on distingue deux types de capteurs photothermiques employés suivant leurs applications : les capteurs plans et les capteurs à concentration.

Les systèmes solaires photothermiques à concentration interviennent dans tout processus de transformation et d'utilisation de l'énergie dans l'industrie, ils ont presque tous le même principe de fonctionnement, mais leurs différences résident dans le choix des éléments qui les constituent [BENS 07].

Le rayonnement solaire concentré peut être transporté par des fibres optiques. Les systèmes du transport de l'énergie solaire concentrée par des fibres optiques (TESCvFO) ont presque tous le même principe de fonctionnement, mais leurs différences résident dans le choix des éléments qui les constituent ainsi que dans celui du domaine d'application. Ils offrent des options flexibles pour de nombreuses implémentations. Une étude concerne les principaux travaux sur ces systèmes est présentée dans ce chapitre pour mieux connaître leurs utilités dans différents domaines.

III.2. Présentation des études antérieures

L'idée de transporter l'énergie solaire concentrée par les conducteurs de lumière a commencé en 1975 par Robieux [ROBI 75]. On lui accorda un intérêt particulier à l'époque. Cependant, cette technologie n'a pas atteint son application car elle présente des problèmes pratiques en raison de la rigidité des guides d'ondes. Plus tard, Kato et Nakurama [KATO 76] ont fait une étude théorique de l'utilisation des fibres optiques en Silice pour la transmission du rayonnement solaire, avec une atténuation de 25 dB/Km sur le spectre solaire c-à-d 6 % de pertes après un parcours de 10 m.

La fibre optique conçue pour le transport de l'énergie solaire concentrée doit avoir un large diamètre du cœur et une grande ouverture numérique [LIAN 98] [CARI 81] et [CARI 82].

On retrouve dans la littérature, une bibliographie assez consistante sur la réalisation des systèmes alimentés par fibres optique et leurs applications dans plusieurs domaines, telles que la caractérisation des systèmes, l'éclairage solaire, la chirurgie solaire, les photobioréacteurs, la génération de l'hydrogène, les réactions photochimiques et le pompage solaire de laser.

III.2.1. Caractérisation des systèmes

En 1981, J.M.Cariou [CARI 82] et ses collaborateurs ont étudié les propriétés de transmission des fibres ainsi que les conditions géométriques du couplage entre la fibre optique et le concentrateur. Ils ont proposé l'utilisation d'un miroir parabolique de 7 cm de diamètre (Voir figure III.1); cette transmission a donné 2W avec un rendement de 70 %. Bien que ces travaux ont montré beaucoup d'avantages, l'inconvénient a porté sur la forte atténuation, c'est la cause principale de la faible énergie produite.

Actuellement, les matériaux de production offrent une faible atténuation, ces fibres optiques modernes améliorent le rendement du système, c'est à dire augmentent l'énergie produite [JARA 99].

En 1984, Patel [PATE 84] a étudié théoriquement la construction et l'exploitation d'un dispositif en utilisant un câble à fibres optiques dont les extrémités sont découpés et alignés pour former un récepteur. Le dispositif est une cavité composée de murs extérieurs pour une bonne isolation et des murs intérieurs noirs pour confiner l'énergie solaire transportée par les fibres optiques. Il a analysé la diffusion de l'énergie solaire à l'intérieur des fibres optiques en utilisant les équations de Maxwell. Le rendement du dispositif est de 30 % et la température calculée est de 1000°C.

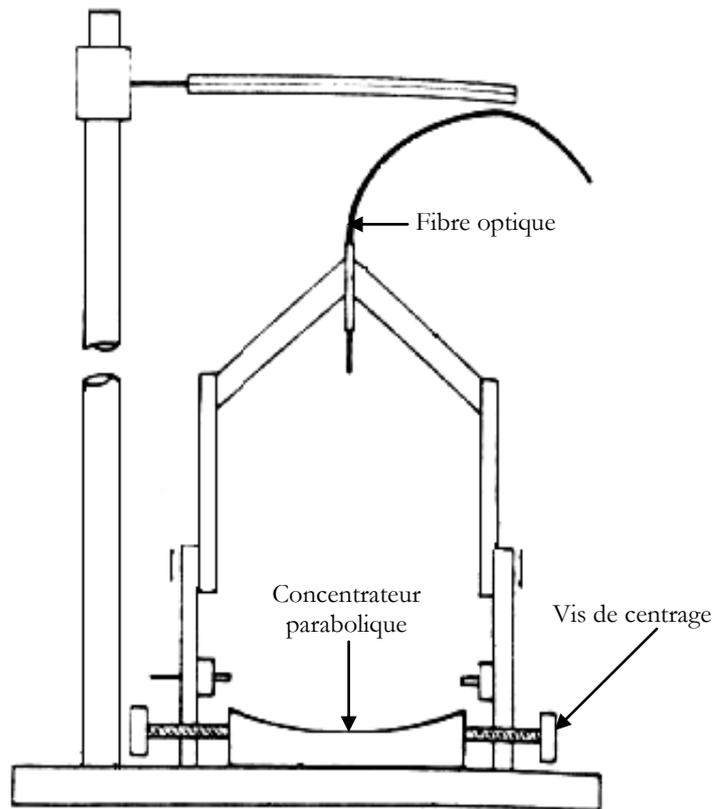


Figure III.1 : *Dispositif expérimental réalisé par J.M.Cariou [CARI 82]*

Tenant compte des possibilités offertes pour transporter l'énergie solaire concentrée, à la fin de 1984 Cariou et ses collaborateurs [CARI 85] ont étudié théoriquement et expérimentalement un four solaire alimenté par fibres optiques. Ils ont montré que dans le cas idéal le récepteur est entièrement entouré par une enceinte constituée par les extrémités des fibres. La température peut atteindre 4700°C . L'inconvénient de ce prototype est la surface de la paroi interne de l'enceinte qui n'est plus réfléchissante par le dépôt des extrémités des fibres, ainsi que les contraintes qui se posent par la nécessité de la haute précision du système de suivi du soleil.

Dans le but d'améliorer l'efficacité de la fibre optique dans le système du transport de l'énergie solaire concentrée, en 1989 Rendina et Cutolo [REND 89] ont proposé l'utilisation de fibres optiques avec des sections d'entrée coniques. Cette particularité des fibres fournit une plus grande surface de collecte qui se traduit par une capacité accrue du transport et l'énergie solaire concentrée.

L'étude théorique et l'analyse des rayonnements à l'entrée conique conçue ont montré que ces fibres optiques peuvent porter 10 fois plus d'énergie que les fibres ordinaires. Les gains d'efficacité de transmission rapportés sont plus de 70 %.

En 1993, Khatri et al [KHAT 93] ont développé mathématiquement un modèle thermique pour l'assemblage d'un CPC (concentrateur parabolique composé) et des fibres optiques (Voir figure III.2), des simulations numériques ont été utilisées pour optimiser la conception du système.

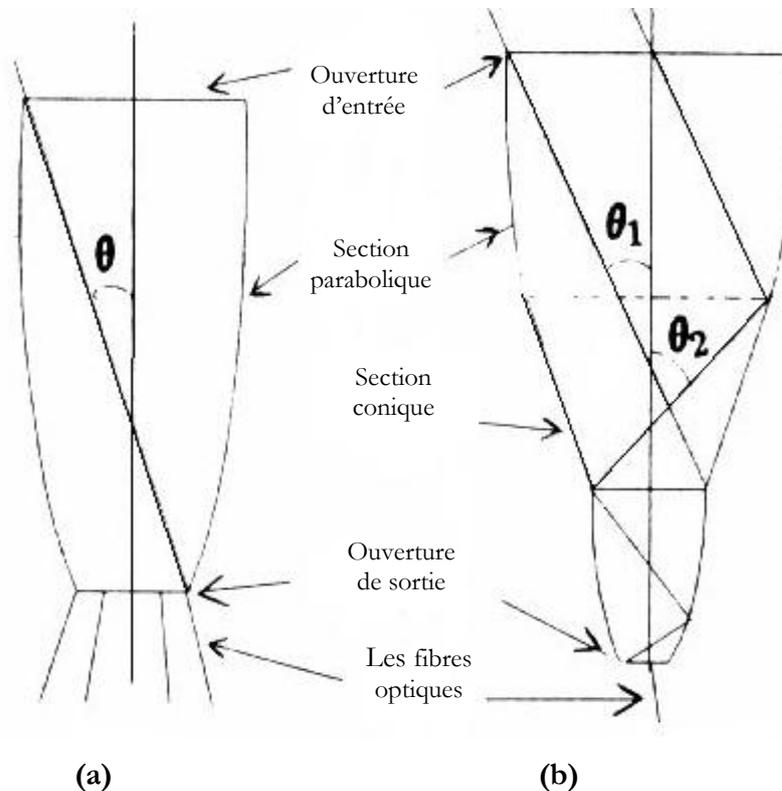


Figure III.2 : Deux types de CPC utilisés par Khatri et al couplés à des fibres optiques [KHAT 93]
 (a) Configuration simple du CPC
 (b) Configuration composé du CPC

Pour éviter les espaces vides qui se produisent dans un guide d'ondes composé de plusieurs fibres optiques en raison de leurs sections circulaires, en 1997, Liang et ses collaborateurs [LIAN 97] [LIAN 98] ont suggéré la forme hexagonale à l'entrée de chaque fibre pour former une seule colonne. Le système est composé de deux miroirs paraboliques montés sur un système de suivi du soleil à deux axes. Ils sont reliés à un guide d'onde composé de 19 fibres optique qui transmettent 60 W de puissance (voir Figure III.3) avec une efficacité de 60%.

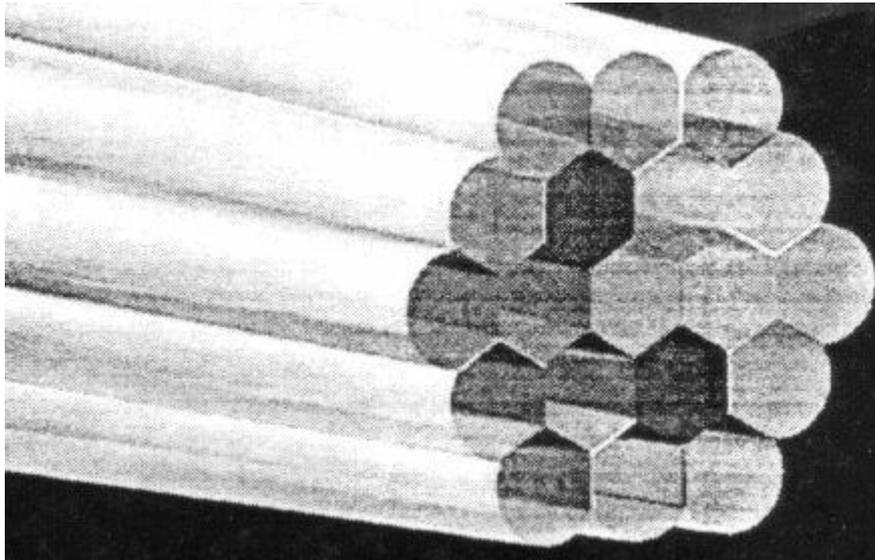


Figure III.3 : Conception proposée par Liang d'un câble composé de 19 fibres optiques de forme hexagonale [LIAN 97]

En 1999, Feueremann et ses collaborateurs ont proposé un modèle qui offre des avantages substantiels pour l'efficacité et la compacité [FEUE 99]. Ils ont proposé un nouvel arrangement pour l'absorption et la concentration de l'énergie solaire, cet arrangement améliore la capacité de transmission des fibres optiques possédant un petit diamètre. L'étude est menée par l'utilisation de miroirs paraboliques avec des diamètres plus petits que 20 cm, un miroir plan est placé au point focal. Ainsi, l'énergie solaire concentrée par le miroir parabolique subit une redirection seconde. La fibre optique utilisée possède un diamètre de 1 mm. Ils ont analysé expérimentalement trois fibres optiques de types différents fabriquées en SiO_2 (avec des ouvertures de 20° , 40° et 60°) et des miroirs paraboliques avec des distances focales différentes et des diamètres différents. Ce système a donné un rendement total de 80 %.

A l'an 2000 ils ont montré aussi que les fibres optiques conçus pour le transport de l'énergie solaire concentrée dépendent de leur ouverture numérique, de l'angle d'incidence ainsi de leurs propriétés optiques du cœur et de la gaine [FEUE 02].

La même année Jaramillo et ses collaborateurs [JARA 00] ont présenté un modèle basé sur les équations de Maxwell et la théorie de Drude-Lorentz pour déterminer l'absorption non-linéaire de la concentration maximale d'un concentrateur sphérique.

En 2003 Johnston et ses collaborateurs [JOHN 03] ont proposé de fabriquer des multifacettes collectionneurs d'où la nécessité de produire des éléments réfléchissants ayant des courbures différentes pour différentes régions de la surface du concentrateur parabolique.

Plus tard Nagai et ses collaborateurs ont analysé l'angle de divergence de la lumière émanant d'une source optique. Le système est composé d'une source de lumière et d'un réflecteur

parabolique sur la base des considérations géométriques. L'angle de divergence des distributions de rayons de la lumière réfléchié par chaque point de réflexion sur le miroir parabolique est calculé numériquement.

Ils ont constaté à partir de ces analyses que l'angle de divergence peut être réduit par prolongation de la longueur du chemin optique de réflexion. Une nouvelle approche a été proposée, afin de réduire l'angle de divergence de la lumière des rayons émanant de la source optique [NAGA 05].

En 2006 De Luca et ses collaborateurs [LUCA 06] ont étudié la trajectoire des rayons lumineux dans une fibre optique avec un trou conique à l'une de ses extrémités.

La même année Liu et ses collaborateurs [LIU 06] ont analysé les erreurs de la surface aléatoire, l'erreur de la position et l'ombre des concentrateurs paraboliques en utilisant la méthode de Monte-Carlo pour tracer les rayons. Il a été noté que ces analyses peuvent aider à optimiser l'efficacité du système et à mesurer la distribution de la densité du flux.

III.2.2. Eclairage solaire

Plusieurs travaux ont été réalisés dans le domaine de l'éclairage solaire, nous citons les suivants :

En 2003 Ciamberlini et ses collaborateurs [CIAM 03] ont décrit une architecture innovante pour l'exploitation de toute l'énergie solaire captée. Un concentrateur solaire focalise l'énergie reçue avec l'utilisation d'un système de suivi du soleil pour recueillir un maximum d'énergie. Le support est plat, d'une épaisseur de 5mm. On a constaté que l'efficacité totale du système se situe entre 68 % et 72 %.

Après, Schlegel, Burkholder et Cheadle ont étudié en profondeur un système d'éclairage hybride, dans lequel l'énergie concentrée de la lumière visible est distribuée à travers des fibres optiques et combinée à un éclairage fluorescent. Une simulation du système d'éclairage hybride a été créée en utilisant le logiciel « TRNSYS ». La simulation intègre les propriétés spectrales des composants d'éclairage hybride ainsi que la distribution spectrale du rayonnement solaire incident. Les propriétés des couleurs du système de cet éclairage ont été évaluées avec des sources de lumière artificielle et ont été estimées entre 5000 et 5500K [SCHL 03] [BURK 04] [CHEA05] [SCHL 04].

Par ailleurs Tsangrassoulis et ses collaborateurs [TSAN 05] présentent une méthode de contrôle la sortie de lumière à partir d'un prototype de système d'éclairage hybride. La stratégie de contrôle est basée sur la prévision de la nébulosité. Il est à souligner que l'évolution temporelle de

la couverture nuageuse permettrait de déterminer si une ou deux lampes doivent être activée ou désactivée.

En 2010, Kandilli et ses collaborateurs [KAND 09] ont fait une étude comparative entre deux concentrateurs placés dans un système du transport de l'énergie solaire par un câble à fibres optiques, dont l'un de ces concentrateurs est symétrique, l'autre est compressé. Les résultats obtenus par un modèle mathématique ont été validés par des valeurs expérimentales données par une station météorologique. Il a été conclu que le système utilisant une antenne parabolique compressée produit plus d'énergie qu'un système utilisant une antenne munie d'une antenne symétrique.

III.2.3. La chirurgie solaire

Les propriétés spectrales des tissus biologiques et la disponibilité des fibres optiques et des lasers du proche infrarouge sont les mieux adaptées pour la pénétration superficielle par opposition à la chirurgie. Les photons solaires sont également des candidats viables pour la chirurgie radiative, à condition qu'ils puissent être concentrés et livrés à une salle d'opération à distance en utilisant des fibres optiques.

En 1998 Feueremmann et Gordon ont élaboré une étude théorique et expérimentale en utilisant un nouveau concept dans le domaine médical. Ils ont utilisé l'énergie solaire concentrée transportée par des fibres optiques dans le domaine de la chirurgie. Ainsi on pourra concentrer l'énergie solaire en deux étapes (miroir parabolique et le miroir plan), ensuite transporter cette énergie concentrée par une fibre fabriquée en SiO₂ de faible atténuation permettant de la conduire jusqu'à la salle d'opération.

Avec un miroir parabolique de 20 cm de diamètre et une fibre optique de 1 mm de diamètre, le système prototype est capable de délivrer des densités de flux de 7 W/cm² pour la chirurgie. Le flux est appliqué directement sur le tissu de la cellule subi lors de l'intervention chirurgicale. Sur une plus grande surface de tissu le flux délivré est de 3 W/cm² [FEUE 98].

En 2001 Feuermann et Gordon [FEUE 01] ont développé et analysé des lentilles à gradient d'indice comme éléments pour l'imagerie optique. Mais leurs capacités en tant que concentrateurs de flux n'ont pas été explorées. Ils prédisent qu'elles pourraient être bien adaptées comme concentrateurs pour l'extrémité d'un laser à fibre optique chirurgical en vue d'améliorer l'efficacité et réduire le coût onéreux du laser.

En 2002 Gordon et ses collaborateurs [GORD 02] ont rapporté la réalisation expérimentale d'une fibre optique solaire et d'un concentrateur. Le prototype est de 200 mm diamètre. Ils ont transporté la lumière solaire concentrée à travers une fibre optique de 1 mm de

diamètre sur une cible à distance (jusqu'à 20 m). Le prototype assemblé est imperméable à la pénétration de la poussière et de la condensation.

Les résultats expérimentaux du dispositif ont démontré que la chirurgie solaire peut produire des lésions à plusieurs cm^3 de volume, avec une efficacité chirurgicale plus importante que celle des lasers pour les procédures correspondantes. Il a été souligné que la chirurgie solaires peut offrir un moyen peu coûteux alternativement aux lasers chirurgicaux, mais avec des limitations sur les endroits possibles et les périodes de fonctionnement [GORD 02] [GORD03].

III.2.4. Photobioréacteurs, la production d'hydrogène et réactions photochimiques

Les systèmes photobioréacteurs sont généralement limités par la capacité des systèmes optiques.

En 1982 Marinangeli et Ollis [MARI 82] ont étendu le concept d'utiliser des fibres optiques pour distribuer par la lumière des photos hétérogènes assistées à des cellules photocatalyseurs électrochimiques. La chute de potentiel dans une photoélectrode semi-conductrice a été prédite pour divers types de contact électrique ohmique, ainsi que la détermination de l'emplacement de contact optimum. Ils ont considéré la variation de la conductivité électrique avec la température pour un câble à fibre optique.

Quelques années après, en 1991 Saint-Georges et Feddes [SAIN 91] ont développé et évalué un prototype de collecte de lumière et un dispositif de transmission pour l'éclairage des plantes dans une chambre de croissance opaques. Les résultats indiquent que le dispositif transmette un flux de photons de $130 \text{ } \mu\text{mol/s/m}^2$ (4000-7000 nm) au fond de la chambre de croissance lorsque le rayonnement solaire direct est de 800 W/m^2 (300-2500 nm) à l'extérieur.

Pendant plusieurs années les fibres optiques fabriquées en Silice n'ont pas été utilisés à cause de la difficulté de leurs fabrications, le niveau élevé de leurs atténuations a donné la possibilité de transporter de faible puissance pour de courtes périodes de fonctionnement. Durant ces dernières années, nous notons une augmentation significative sur la demande de fibres optiques désignées pour le transport de l'énergie solaire concentrée grâce au développement technologique de la fabrication de la Silice.

Entre 1995 et 1997, Peill et Hoffann [PEIL 97] ont conçu et testé un réacteur prototype pour la dégradation photocatalytique des polluants organiques en milieux aqueux. Ce dispositif concentre la lumière par un miroir parabolique utilisé comme concentrateur primaire et une lentille convexe utilisée comme concentrateur secondaire. L'énergie est transportée par un câble à fibres optiques, le câble est plongé dans une solution réactionnelle de telle sorte que la composante de la lumière ultraviolette transmise par la fibre est utilisée comme photocatalyseur

pour effectuer la réaction de réduction des matériaux organiques en milieu aqueux. Les fibres optiques fabriquées en Silice ont une absorption importante du rayonnement ultraviolet, qui implique une faible efficacité du dispositif. Cependant le dépôt d'une couche de TiO_2 sur la fibre optique est essentiel. La figure III.4 montre le schéma du prototype de réacteur proposé par Peill Heffan.

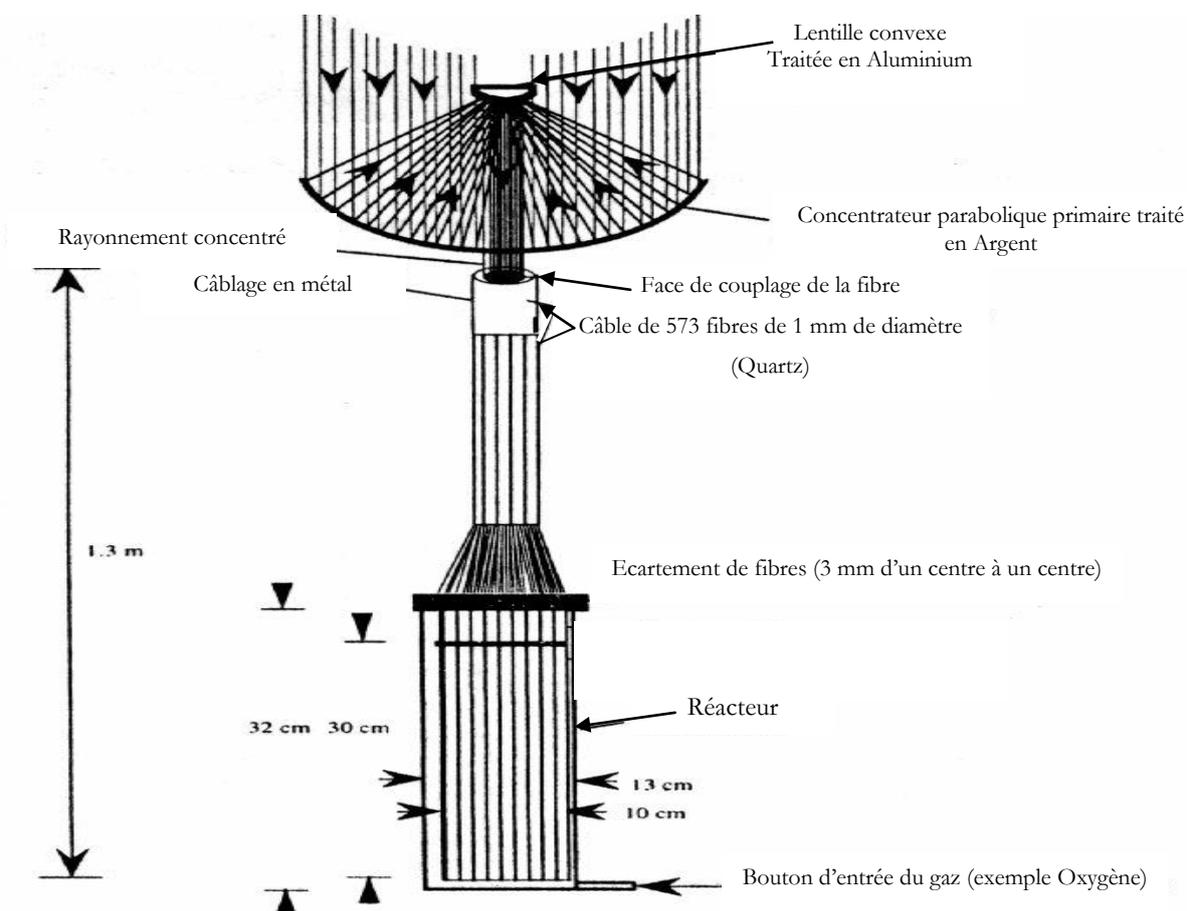


Figure III.4 : Schéma de prototype réacteur proposé par Peill et Hoffmann [PEIL 97]

En 1998 Jaramillo et ses collaborateurs [JARA 98] ont proposé l'utilisation des fibres optiques pour la production de l'hydrogène par photoélectrolyse. L'énergie solaire transmise par une fibre optique active la photoanode des électrons circulant dans un circuit externe à la cathode. La figure III.5 présente le système de réacteur pour la production d'hydrogène activé par la photocatalyse.

La différence de potentiel générée dans le transfert d'énergie radiative permet la dissociation de l'eau (utilisé comme électrolyte) en oxygène et en gaz d'hydrogène. La diffusion de ces gaz se fait à travers une membrane perméable, dont la possibilité du stockage de l'hydrogène produit.

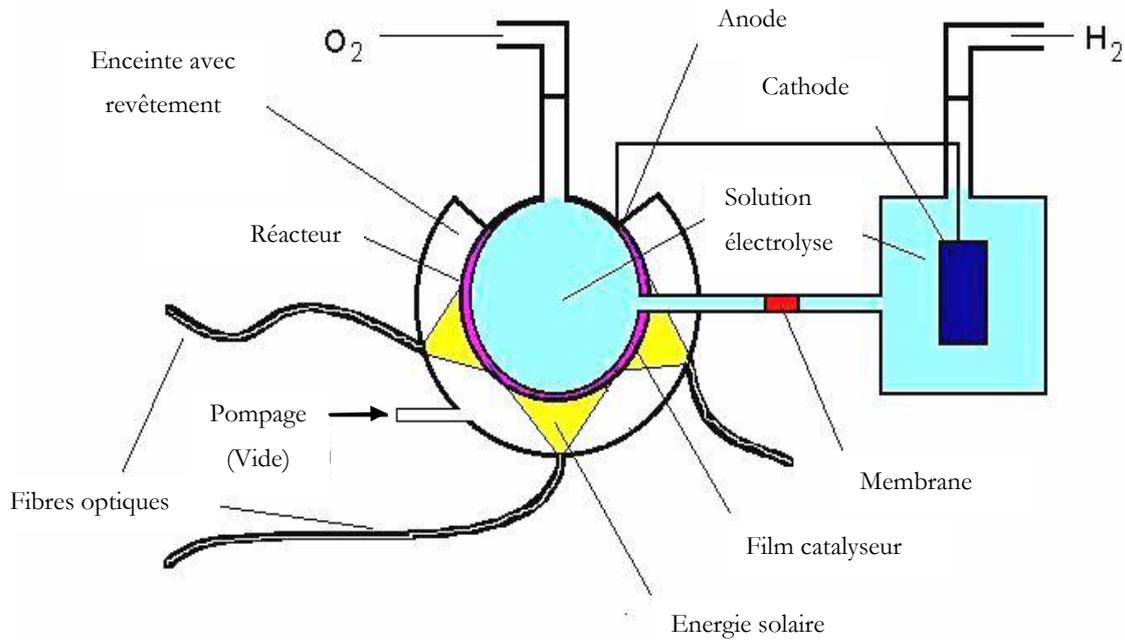


Figure III.5 : Réacteur pour la production d'hydrogène activé par un photocatalyseur [JARA 98]

L'étude est estimée théoriquement par la première loi de la thermodynamique. Le rendement de conversion de l'énergie photoélectrolyse est de 40 %. Ils ont suggéré qu'il est possible d'obtenir un rendement plus élevé dans les systèmes de conversion photoélectrochimiques avec une simple conception structurelle.

L'exploitation des cellules photosynthétiques pour la production de métabolites utiles exige des photobioréacteurs efficaces.

L'une des applications les plus innovantes du transport de l'énergie solaire concentrée par des fibres optiques est celle dans le domaine de la biotechnologie. C'est principalement à cause des petites intensités de la lumière offertes par les fibres optiques, le photobioréacteur activé par la lumière guidée par des fibres optiques offre des avantages par rapport aux méthodes physico-chimiques conventionnelles.

En 1999, Ogbonna et ses collaborateurs [OGBO 99] ont conçu et construit un photobioréacteur en utilisant des fibres optiques. Ils ont construit un réservoir photobioréacteur éclairé à l'intérieur. Le photobioréacteur est simple, la chaleur est agitée mécaniquement de la même manière qu'un bioréacteur. Le dispositif a été installé pour collecter la lumière solaire et la distribuer à l'intérieur du réacteur par des fibres optiques. Il est équipé d'un système de suivi de sorte que les lentilles tournent avec la position du soleil. Ils ont utilisé une source de lumière artificielle comme solution aux problèmes de perte de biomasse à la nuit et à la faible productivité dans les temps nuageux.

Une année après, Kim et An ont conçu un photobioréacteur à fibre optique avec un système d'éclairage interne pour augmenter la disponibilité de la lumière. Ils ont utilisé l'énergie

solaire comme source principale d'énergie pendant la journée et une lampe à halogène comme une énergie lumineuse supplémentaire la nuit. La plupart des rayons UV de la lumière ont été éliminés par l'aberration chromatique des lentilles asphériques dans le collecteur de la lumière solaire et 60% de l'intensité de la lumière infrarouge a été supprimée [KIM 00].

En 2002, Gordon [GORD 02] a adapté une conception optique à imagerie qui répond aux conditions d'un réacteur et qui maximise la productivité naturelle. Deux classes distinctes de photobioréacteurs ont été prises en compte: (1) unités extérieures stationnaires et (2) unités à l'intérieur du réacteur, exigeant ainsi la séparation totale de la collection et de la réception du rayonnement solaire.

Pour des raisons pratiques et économiques, ce réacteur est composé d'immenses collecteurs solaires pour augmenter la concentration optique. Il a mis au point aussi un concentrateur muni d'un système de suivi du soleil et des fibres optique pour concentrer et transporter l'ensoleillement à un réacteur à distance.

Joo et ses collaborateurs [JOO 03] ont utilisé des fibres optiques en plastique (FOP) pour transmettre la lumière et pour qu'elles soient comme substrats lors de l'utilisation potentielle dans un système de purification photocatalytique de l'environnement. Les performances des fibres (FOP) ont été comparées avec celles des fibres en quartz (FOQ). Il a été conclu que l'utilisation des FOP est plus performante car ces fibres ont comme avantages la facilité de manipulation, la faible atténuation de la lumière et un coût raisonnable.

Gordon et ses collaborateurs [GORD 04] ont décrit des approches qui offrent une installation de production potentiellement beaucoup moins chère. Cette installation est prête à être renforcée, contrairement aux technologies coûteuses comme les fours à laser et les chambres de décharge plasma. Ils emploient de nouvelles stratégies lors de l'utilisation efficace de l'énergie solaire concentrée afin de synthétiser les nanomatériaux de carbone.

La stratégie d'exploitation de la culture des photosynthétiques micro-algues sert pour l'élimination de dioxyde de carbone (CO_2) des gaz de combustion en fixant le potentiel et en diminuant efficacement la libération de CO_2 dans l'atmosphère, contribuant ainsi à atténuer la tendance vers le réchauffement climatique. Dans ce contexte Ono et Cuello [ONO 04] ont utilisé des fibres optiques solaires et des systèmes photobioréacteurs de micro-algues. Il a été souligné que la fibre optique solaire peut être la plus prometteuse pour la distribution uniforme de la lumière dans des photobioréacteurs.

III.2.5 Production d'énergie solaire

En 1999 Jaramillo et ses collaborateurs [JARA 99] ont développé une étude théorique thermique sur la transmission de l'énergie solaire concentrée par une fibre optique fabriquée en Silice. Ils ont obtenu une équation d'énergie pour le transfert de chaleur par conduction et par rayonnement. Le système est composé d'une fibre placée dans le foyer d'un miroir parabolique. L'énergie solaire est estimée à 26 W à la sortie de la fibre de 10 m de long avec une efficacité de 88% (Voir figure III.6). L'évolution temporelle de la distribution de la température est obtenue par une méthode de différentielles finies. Il a prédit que la fibre peut être utilisée pendant 6 h.

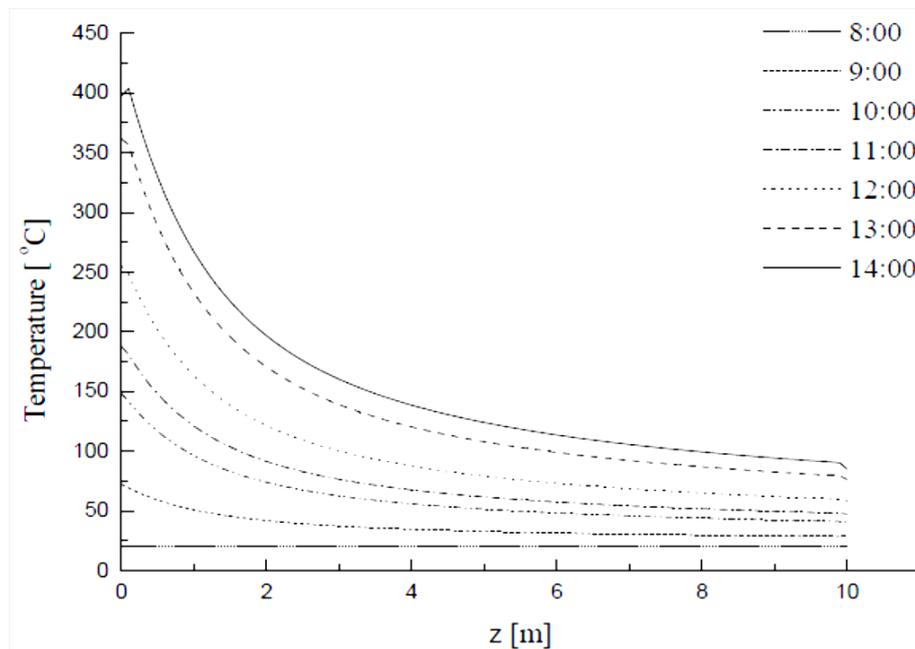


Figure III.6 : *Distribution de la température boraire en fonction de la longueur d'une fibre optique fabriquée en SiO₂* [JARA 99]

Au milieu de 1999, Zik et ses collaborateurs [ZIK 99] proposent une approche qui minimise la longueur des fibres tout en utilisant l'avantage de la flexibilité. Ils ont souligné que l'utilisation de fibres dans les systèmes à concentrations thermiques offre des avantages potentiels dans la conception du récepteur.

Ils ont mené une analyse comparative de trois systèmes alimentés par fibres optiques désignés pour la production d'électricité.

- La première conception appelée SCOT (Solar Concentration of Tower) couplage avec deux fibres optiques pour le transport de l'énergie solaire.
- La deuxième conception appelé TTFOS (Tower Top Fiber Optic System).
- La troisième appelée TROF (Tower Reflector with Optical Fiber).

Les trois systèmes ont un champ d'héliostats qui collectent l'énergie solaire sur un point vers le haut de la tour centrale.

Les systèmes TROF et SCOT ont un réflecteur hyperbolique situé sur la partie supérieure de la tour.

Le récepteur du système SCOT est classique tandis que le système TROF présente un récepteur à fibres optiques.

Le premier système proposé est un champ de capteurs solaires, dont une seule fibre optique est associée à un miroir parabolique. (Voir figure II.7) [FEUE 99].

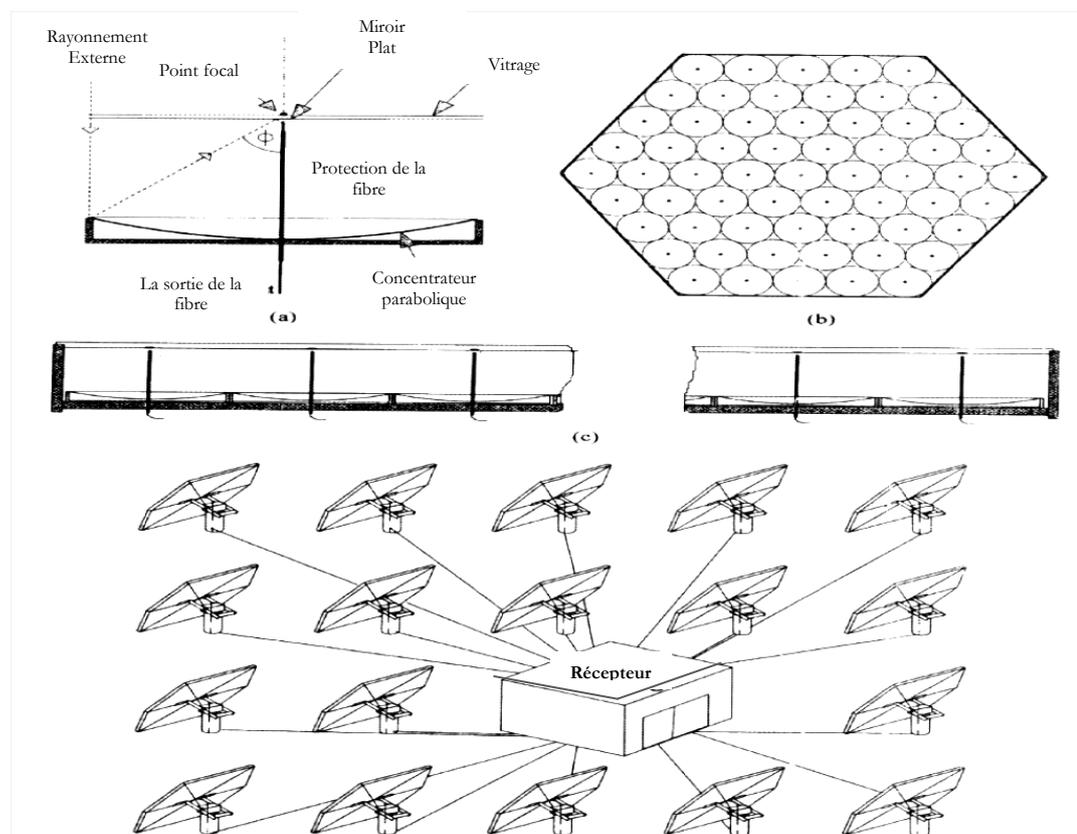


Figure III.7 : Système proposé par Feueremmann et Gordon
 (a) Section transversale d'un module unique, (b) vue en dessus,
 (c) Section transversale d'un module solaire et (d) Champ de modules solaires [FEUE 99]

Les systèmes TTFOF et TROF présentent un rendement de 23 % et 18 % respectivement tandis que le rendement du système SCOT ne présente que 16 %.

L'analyse des coûts des trois systèmes montre que le coût du système TTFOF augmente de 22 % et celui du système TROF est de 11 % par rapport au système SCOT.

La figure III.8 présente les trois systèmes TTFOS, SCOT et TROF.

Au début de l'an 2000, Kribus et ses collaborateurs [KRIB 00] ont introduit sept nouveaux systèmes en faisant une analyse sur leurs coûts dans le but de produire l'électricité [ZIK 99].

La lumière captée par le miroir est guidée par la fibre optique à plusieurs dizaines de mètres jusqu'à un cycle de Brayton pour la production d'électricité.

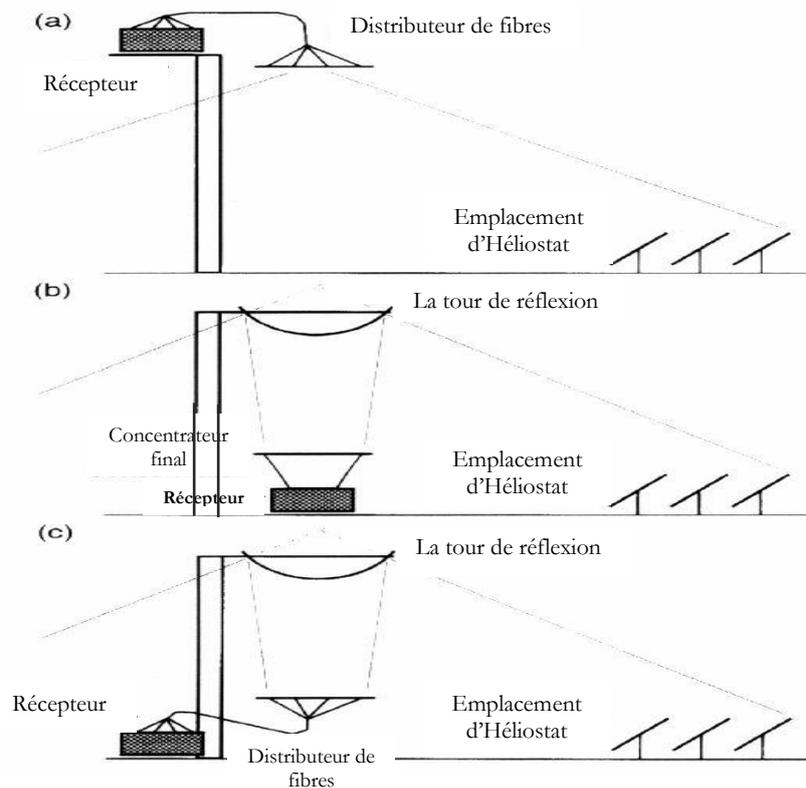


Figure III.8 : Les trois systèmes analysés par Zik, Karni et Kribus
(a) TTFOS (b) SCOT (c) TROF [ZIK 99]

Dans les deux autres systèmes le capteur solaire est associé à un moteur Stirling pour la production d'électricité. Un système consiste à placer la fibre optique au point focal d'un concentrateur parabolique, le deuxième utilise un concentrateur parabolique dont un miroir hyperbolique est placé dans son plan focal. Ces deux cas sont proposés avec trois modèles de fibres de manière à avoir six systèmes différents.

Kribus a montré que le système muni d'un moteur Stirling et avec une double concentration est plus rentable que le système équipé de plusieurs miroirs paraboliques dont l'utilisation de plusieurs fibres optiques. La figure III.9 présente le schéma du système de double concentration couplé à un système de Stirling [KRIB 00].

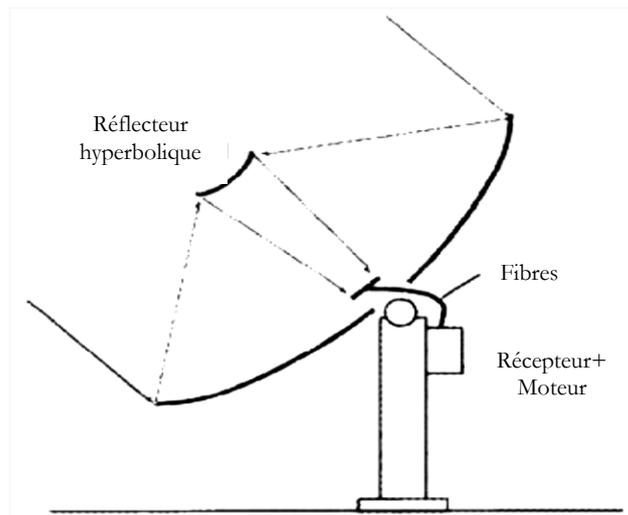


Figure III.9 : *Système utilisant une double concentration par miroir parabolique et hyperbolique [KRIB 00]*

En 1999 toujours, en se basant sur le principe du transport de l'énergie solaire concentrée par des fibres optiques, Hernandez et ses collaborateurs [HERN 99] ont élaboré théoriquement et expérimentalement un réflectomètre. Ils ont utilisé un concentrateur parabolique et deux fibres optiques pour la détermination de la réflectivité et de l'absorptivité solaire des matériaux opaques à hautes températures. L'échantillon est un matériau de 3 mm d'épaisseur et de 25 mm de diamètre. La deuxième fibre est connectée à une cellule photovoltaïque. Les valeurs de lectures sont enregistrées par un système d'acquisition de données, elles sont stockées sur un ordinateur. Le système est refroidi par l'eau, il peut fonctionner à 1400 W/cm^2 et la température d'échantillon peut atteindre 2500°C .

A l'an 2000, Kaushika et Reddy [KAUS 00] ont présenté une conception et un développement de caractéristiques de performance de l'énergie solaire pour la production de vapeur, ils ont intégré des matériaux récents pour la technologie des concentrateurs. L'efficacité de conversion solaire pour la vapeur est de 70 % à 80 % à 450°C . Le coût de système est entre 200 \$ et $225 \text{ \$/m}^2$.

D'autre part, Gordon et Choon [GORD 00] ont mis au point des systèmes de climatisation solaire, en utilisant l'énergie solaire concentrée et transportée par des fibres optiques. Cette énergie peut être stockée sous forme de glace compacte produite par un évaporateur modernisé du refroidisseur mécanique. Ils ont étudié théoriquement l'augmentation du coefficient de performance dans le système de réfrigération solaire. L'énergie solaire est doublement concentrée ensuite transportée par des fibres optiques. Le schéma classique de refroidissement est suggéré par un diagramme thermodynamique en cascade.

Ce système augmente de manière significative l'apport de chaleur ; la figure III.7 montre l'arrangement déterminé par Feuerermann et Gordon.

En 2001, Feuerermann et Gordon [FEUE 01] ont proposé une nouvelle approche pour les installations photovoltaïques. Ils ont utilisé un concentrateur parabolique qui concentre la lumière en une tige de verre courte. La distribution du flux de la lumière transportée a été homogénéisée par un kaléidoscope de verre qui est optiquement couplé à des cellules solaires.

Une année plus tard, Jaramillo et Rio ont présenté une optimisation thermodynamique d'un système de concentration solaire muni d'un moteur Stirling (Voir figure III.10). Ils ont déduit que les pertes de chaleur par convection et rayonnement sont réduites en utilisant des fibres optiques pour transporter l'énergie solaire concentrée [JARA 02].

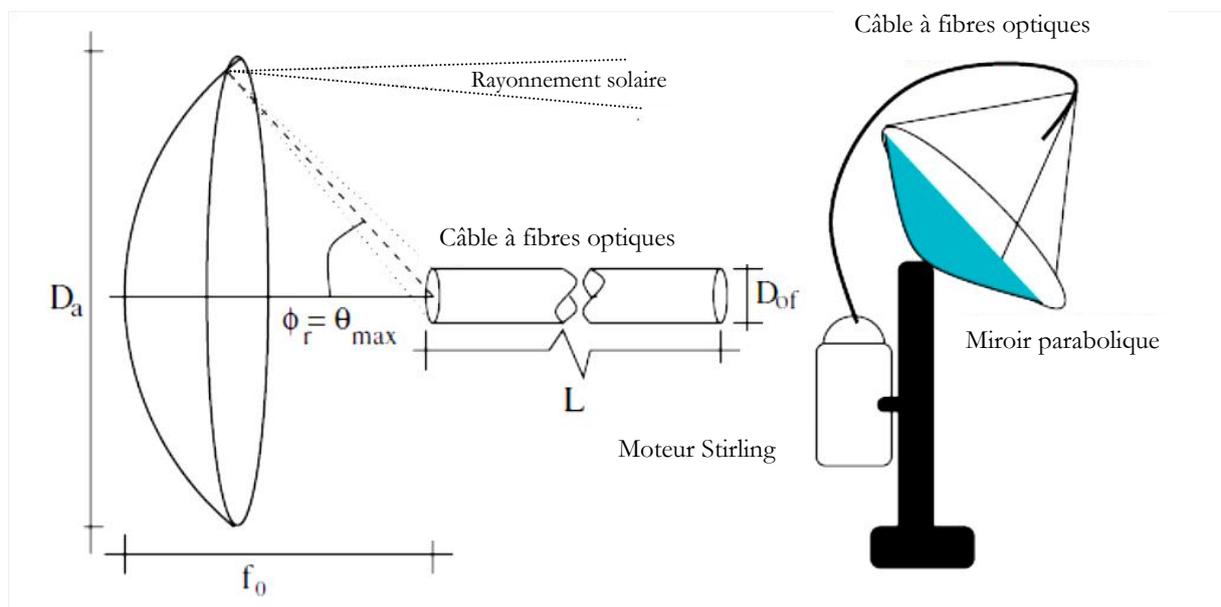


Figure III.10 : Principe de couplage entre un miroir parabolique, un câble à fibre optique et un moteur Stirling [JARA 02]

III.2.6. Laser de pompage solaire

Le laser de pompage solaire peut être utilisé dans les applications terrestres et dans celles de l'espace. Cette technologie peut être utilisée à l'état solide pour la photochimie laser sur la terre [HALL 92] et pour la transmission de puissance sans fil dans l'espace [BRAU 91], ainsi qu'elle peut être utilisée pour la communication optique d'un satellite vers un autre [PEER 97]. L'énergie solaire peut être la principale source d'énergie dans l'espace.

En 1999, Lando et ses collaborateurs [LAND 99] ont affirmé que l'utilisation directe à l'état solide du laser de pompage avec la lumière solaire est intrinsèquement plus efficace, plus simple et plus fiable. Les câbles à fibres optiques flexibles peuvent être utilisés pour transporter

l'énergie solaire concentrée à un endroit où il souhaitable de l'utiliser comme pompage à un laser à semi-conducteurs.

La même année, Liang et ses collaborateurs [LIANG 99] ont utilisé un câble à fibres optiques pour transporter l'énergie solaire concentrée pour pomper un laser à semi-conducteurs. La section de sortie de chaque fibre optique a été polie pour former un tronc hexagonal.

L'union de sept fibres optiques de troncs polis, sont réunis à un concentrateur d'énergie solaire. La puissance concentrée est de 67 W, correspondant à un flux solaire de 23W/mm².

Dans le même contexte, Pires et ses collaborateurs [PIRE 99] ont conçu un paquet flexible composé de sept fibres optiques polies pour l'obtention d'une forme hexagonale. Le système se compose d'un miroir parabolique primaire pour capter l'énergie solaire, ensuite d'un concentrateur parabolique composé (CPC) et des fibres optiques. Le flux mesuré est de 13 W/mm².

III.3. Conclusion

Les travaux qui ont été effectués ont donné une amélioration sensible des performances des systèmes alimentés par fibres optiques. Nous avons présenté une étude bibliographique analytique répartie sur quelques domaines d'applications de ces systèmes, elle nous a permis de localiser les vrais problèmes rencontrés dans chacun de ces domaines. Citons la compatibilité de la fibre optique et du concentrateur, la nécessité d'utilisation d'un moteur Stirling pour le suivi instantané du rayonnement solaire et surtout le problème du coût onéreux du système comparé avec son rendement énergétique. Malgré les problèmes rencontrés les résultats obtenus ont été très prometteurs pour le développement des énergies renouvelables et surtout dans le domaine de la photothermie solaire.

Pour cela, il a été jugé très utile d'utiliser les systèmes alimentés par des fibres optiques pour utiliser l'énergie solaire à l'endroit désiré; les résultats obtenus auparavant le confirment.

On peut conclure que l'énergie solaire peut être exploitée en utilisant les systèmes alimentés par fibres optiques solaires et par des concentrateurs en vue d'une bonne progression dans le domaine de la thermique.

Références Bibliographiques

- [BENS 07] Benslama R., « *The Air Solar Collectors: Comparative Study, Introduction Of Baffles To Favor The Heat Transfer* », Solar Energy, (2007), Vol. 81, pp. 139–149.
- [ROBI 75] Robieux J., « *Patent 75-14582 (INPI)* », International Classification, (1975), F03g 7/02 ; 02 KX/G02b5/10.
- [KATO 76] Kato D., Nakamura T., J. Appl. Phys. Vol. 40, (1976), pp. 4528.
- [LIAN 98] Liang D., Monteiro L.F., Teixeira M.R., Monteiro M.L.F., Collares-Pereira M., « *Fibre-Optic Solar Energy Transmission And Concentration* », Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 54 (1998), pp. 323–331.
- [CARI 81] Cariou J.M., Martin L., Dugas J. « *Concentrated Solar Energy Transport By Optical Fibers* », physics of fiber optics. Adv Ceramics, (1981), pp. 1-2.
- [CARI 82] Cariou J.M., Martin L., Dugas J. « *Transport Of Solar Energy With Optical Fibres* », Solar Energy, Vol. 29, (1981), pp. 397-406.
- [JARA 99] Jaramillo O.A., Huelsz G., del Rio J.A., « *A Thermal Study Of Optical Fibres Transmitting Concentrated Solar Energy* », Journal Physics D, Vol. 32, (1999), PP. 1000-1005.
- [PATE 84] Patel A P., « *A High Temperature Solar Energy Conversion Device Using Optical Waveguides* », (1984),
- [CARI 85] Cariou J.M., Dugas J., Martin L., « *Theoretical Limits Of Optical Fibre Solar Furnaces* », Solar Energy, Vol. 34, (1985), PP. 329-339.
- [REND 89] Cutolo A., Rendina I., « *Coupling Efficiency Of Non-Uniform Optical Fibers For Solar Energy Application* », Solar Energy Materials, (1989), PP. 18-19.
- [KHAT 93] Khatri N, Brown M, Gerner F., « *Using Fibre Optics To Tap The Sun's Power* », Int Commun Heat Mass Transfer, (1993), pp. 771-781.
- [LIAN 97] Liang D., Nunes Y., Fraser Monteiro L., Fraser Monteiro L. M. and Collares-Pereira M., 200 W « *Solar Energy Delivery With Optical Fiber Bundles* », J. SPIE, Vol. 217, (1997), pp. 31-39.
- [LIAN 98] Liang D., Fraser Monteiro L., Ribau Teixeira M., Fraser Monteiro L. M. and Collares-Pereira M., (1998), « *Fiber-Optic Solar Energy Transmission And Concentration* », Solar Energy Mater Solar Cells, Vol. 54, (1998), pp. 323.
- [FEUE 99] Feuermann D., Gordon J.M., « *Solar Fibre-Optic Mini-Dishes: A New Approach to The Efficient Collection Of Sunlight* », Solar Energy, Vol. 65, (1999), PP. 159-170.
- [FEUE 02] Feuermann D., Gordon J.M., « *Light Leakage In Optical Fibres: Experimental Results, Modeling And The Consequences For Solar Concentrators* », Solar Energy, Vol. 72, (2002), PP. 159-204.

- [JARA 00] Jaramillo O.A., Huelsz G., del Rio J.A., « *Non-Linear Model For Absorption In SiO₂ Optical Fibres: Transport Of Concentrated Solar Energy* », Solar Energy, Vol. 64, (2000), PP. 209-224.
- [JOHN 03] Johnston G., Lovegrove K., Luzzi A., « *Optical Performance Of Spherical Reflecting Elements For Use With Paraboloidal Dish Concentrators* », Solar Energy, Vol. 74, (2003), PP. 133-140.
- [NAGA 05] Nagai H., « *Geometrical Considerations On The Directivity Of Reflected Light From A Paraboloidal Mirror* », Displays, Vol. 26, (2005), PP. 55-64.
- [LUCA 06] De Luca R., « *An Optical Fibre With A Conic Aperture* ». European Journal Physics, Vol. 27, (2006), pp. 1233–40.
- [LIU 06] Liu Y., Dai J.M., Sun X.G., Yu T.H., « *Factors Influencing On Flux Distribution On Focal Region Of Parabolic Concentrators* », Journal Physics Conference, Vol. 48, (2006), PP. 59-63.
- [CIAM 03] Ciamberlini C., Francini F., Longobardi G., Piattelli M., Sansoni P., « *Solar System For Exploitation Of The Whole Collected Energy* ». Optic Lasers Engineering, Vol. 39, (2003), pp. 233–246.
- [SCHL 03] Schlegel G.O. « *TRNSYS Modelling Of A Hybrid Lighting System: Energy Savings And Colorimetry Analysis* ». Thesis: Master of Science, (2003), University of Wisconsin, USA.
- [BURK 04] Burkholder F.W., « *A TRNSYS Model Of A Hybrid Lighting System* ». Thesis: Master of Science, University of Wisconsin, USA, (2004).
- [CHEA 05] Cheadle M., « *A Predictive Thermal Model Of Heat Transfer In A Fibre Optic Bundle For A Hybrid Solar Lighting System* ». MSc thesis, University of Wisconsin-Madison, (2005).
- [SCHL 04] Schlegel G.O., Burkholder F.W., Klein S.A., Beckman W.A., Wood B.D., Muhs J.D., « *Analysis Of A Full Spectrum Hybrid Lighting System* ». Solar Energy, University of Wisconsin-Madison, (2004), pp 359-368.
- [TSAN 05] Tsangrassoulis A., Doulos L., Santamouris M., Fontoynt M., Maamari F., Wilson M, et al. « *On The Energy Efficiency Of A Prototype Hybrid Daylighting System* ». Solar Energy, University of Wisconsin-Madison, (2005), Vol. 79, pp 56-64.
- [KAND 09] Kandilli C., Ulgen K., « *Review and modelling the systems of transmission concentrated solar energy via optical fibres* », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, (2009), pp. 67–84.
- [FEUE 98] Feuermann D., Gordon J.M. « *Solar Surgery: Remote Fiber Optic Irradiation With Highly Concentrated Sunlight In Lieu Of Lasers* », Optical Engineering, Vol. 37, (1998), pp. 2760.
- [FEUE 01] Feuermann D., Gordon J.M. « *Gradient-Index Rods As Flux Concentrators With Applications To Laser Fibre Optic Surgery* », Optical Engineering, Vol. 40, (2001), PP. 418-425.

- [GORD 02] Gordon J.M., Feuermann D., Huleihil M., « *Solar Fibre-Optic Mini-Dish Concentrators: First Experimental Results And Field Experience* », Solar Energy, Vol. 72, (2002), PP. 459-472.
- [GORD 02] Gordon J.M., Feuermann D., Huleihil M., « *Laser Surgical Effects With Concentrated Solar Radiation* », Applied Physics Letter, Vol. 81, (2002), PP. 2653-2655.
- [GORD 03] Gordon J.M., Feuermann D., Huleihil M., « *Laser Surgical Effects With Concentrated Solar Radiation* », Journal Applied Physics, Vol. 93, (2003), PP. 4843-4851.
- [MARI 82] Marinangeli RE., Ollis DF., « *Photo-Assisted Heterogeneous Catalysis With Optical Fibres, Part III: Photoelectrodes* », AIChE Journal, Vol. 28, (1982), PP. 945-955.
- [SAIN 91] St. George D.R., Feddes J.J.R., « *Fibre optic lighting system for plant production* », Proceeding SPIE Optical Agricola, Vol. 1379, (1991), PP. 69-80.
- [PEIL 97] Peill N. J. and Hoffmann M. R., « *Solar-Powered Photocatalytic Fiber-Optic Cable Reactor for Waste Stream Remediation* », J. of Solar Energy Engineering, (1997), pp. 119- 229
- [JARA 98] Jaramillo O.A., Arriaga L.G., Sebastian P.J., Fernandez A.M., Del Rio J.A. « *Application Of Fibre Optics In The Hydrogen Production By Photoelectrolysis* », International Journal Hydrogen Energy, Vol. 23, (1998), PP. 985-993.
- [OGBO 99] Ogbonna J.C, Soejima T., Tanaka H., « *An Integrated Solar and Artificial Light System for Internal Illumination of Photobioreactors* », International Journal Hydrogen Energy, Vol. 70, (1999), PP. 289-297.
- [KIM 00] An JY., Kim B.W., « *Biological Desulphurisation In An Optical-Fibre Photobioreactor Using An Automatic Sunlight Collection System* », Biotechnol Journal, Vol. 80, (2000), pp 35–44.
- [GORD 02] Gordon J.M., « *Tailoring Optical Systems To Optimized Photobioreactors* », International Journal Hydrogen Energy, Vol. 27, (2002), PP.1175-1184.
- [JOO 03] Joo H., Jeong H., Jeon M., Moon I., « *The Use Of Plastic Optical Fibres In Photocatalysis Of Trichloroethylene* », Solar Energy Mater and Solar cells, Vol. 79, (2003), pp 93–101.
- [GORD 04] Gordon J.M., Feuermann D., Huleihil M., Katz E.A., « *New Optical Systems For The Solar Generation Of Nanomaterials* », Proceeding SPIE, Nonimaging Optical Maximum Efficiency Light Transfer VII, Vol. 5185, (2004), PP. 99-108.
- [ONO 04] Ono E., Cuello J.L., « *Design Parameters Of Solar Concentrating Systems For CO₂-Mitigating Algal Photobioreactors* », Solar Energy, Vol. 29, (2004), PP.1651-1657.
- [JARA 99] Jaramillo O.A., Huelsz G., del Rio J., « *A Thermal Study Of Optical Fibres Transmitting Concentrated Solar Energy* », Journal Physics D, Vol. 32, (1999), PP. 1000-1005.
- [ZIK 99] Zik O., Karni J., Kribus A., « *The Trof(Tower Reflector With Optical Fibres): A New Degree Of Freedom For Solar Energy Systems* », Solar Energy, Vol. 67, (1999), PP. 13-22.

- [KRIB 00] Kribus A., Zik O., Karni J., « Optical Fibres and solar power generation », Solar Energy, Vol. 68, (2000), PP. 405-416.
- [HERN 99] Hernández D., Antoine D., Olalde G., Gineste J.M., « *Optical Fiber Reflectometer Couple With a Solar Concentrator to Determine Solar Reflectivity and Absorbity at High Temperature* », Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 121, (1999), pp. 31.
- [KAUS 00] Kaushika N.D., Reddy K.S., « *Performance Of A Low Cost Solar Paraboloidal Dish Steam Generating System* », Energy Conversion Manage, Vol. 41, (2000), PP. 713-726.
- [GORD 00] Gordon J.M., Choon K. « *High-Efficiency Solar Cooling* », Solar Energy, Vol. 68, (2000), PP. 23-31.
- [FEUE 01] Feuermann D., Gordon J.M. « *High-Concentration Photovoltaic Designs Based On Miniature Parabolic Dishes* », Solar Energy, Vol. 70, (2001), PP. 423-430.
- [JARA 00] Jaramillo O.A., Huelsz G., del Rio J.A., « *Non-Linear Model For Absorption In Sio₂ Optical Fibres: Transport Of Concentrated Solar Energy* ». Sol Energy Mater Sol Cells, Vol. 64, (2000), pp. 209–24.
- [HALL 92] Hall R.B., « *Lasers in industrial chemical synthesis* ». Laser Focus, (1992), pp. 57–62.
- [BRAU 91] Brauch U, Muckenschnabel J, Opower H, Wittner W. « *Solar Pumped Solid State Lasers For Space Power Transmission* ». Space Power, (1991), pp. 10-285.
- [PER 97] Pe'er I., Naftali N., Yogev A., « *High Power, Solar Pumped, Laser Amplifier For Free Space Laser Communication, Non-Imaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer IV* ». Proc SPIE, Vol. 3139, (1997), pp.194–204.
- [LAND 99] Lando M., Shimony Y., Benmair R.M.J., Abramovich D., Krupkin V., Yogev A., « *Visible Solar-Pumped Lasers* ». Opt Mater, Vol. 13, (1999), pp. 111–115.
- [LIAN99] Liang D., Pires N., Semedo-Garcao J.E., Monteiro L.F., MonteiroMLF., Collares-Pereira M., « *Solar Energy Transmission And Concentration By An Optical Fibre Bundle With A Frustum-Type Output End* ». Proc SPIE, Nonimaging Opt Maximum Efficiency Light Transfer V, Vol. 3781, (1999), pp. 156–64.
- [PIRE 99] Pires N., Liang D., Chaves J., Semedo-Garcao J.E., Monteiro L.F., Collares-Pereira M., « *Transmission And Concentration Of Solar Radiation Using A Fibre Bundle And A DCPC* ». Proc SPIE, Nonimaging Opt Maximum Efficiency Light Transfer V, Vol. 3781, (1999), pp. 165–73.
- [LAND 03] Lando M., Kagan J., Linyekin B., Dobrusin V., « *A Solar-Pumped Nd: YAG Laser In The High Collection Efficiency Regime* ». Opt Commun, Vol. 222, (2003), pp. 371-381.

CHAPITRE IV

MODELISATION DES SYSTEMES

PHOTOTHERMIQUES

Chapitre IV

Modélisation des systèmes photothermiques

IV.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. 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 proposé.

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.

IV.2. Modélisation d'énergie incidente

Le rayonnement global reçu par un capteur (α, γ) est composé en générale de deux rayonnements (si on néglige le rayonnement rétro-diffusé 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].

IV.2.1. Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair)

Pour un ciel clair, les puissances des rayonnements direct (E_S), diffus (E_D) et global (E_G) reçues par un capteur (α, γ) incliné de β par rapport au plan horizontal sont données par les relations suivantes [CAPD 86]:

- **Modèle simplifié**

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

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

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

G_H : Eclaircissement global reçu par une surface horizontale (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	A_1	A_2	B_1	B_2	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 IV.1 : Constantes caractérisant l'état du ciel

- Modèle précis

A partir des résultats de mesures météorologiques disponibles pour un site [couleur du ciel (β_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]:

β_A facteur de trouble Angstrom :

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

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

avec : Z : Altitude du site (km)

$$\left\{ \begin{array}{l} E_S = I_0 \cos(i) e^{-\frac{m T_L}{0,9 m + 9,4}} \\ E_D = I_0 \sqrt{\sinh h} (T_L - 0,5 - \sqrt{\sinh h}) / 25 \\ E_G = E_S + E_D \text{ avec } I_0 = 1367 \text{ W/m}^2 \end{array} \right. \quad (\text{IV.2})$$

Pour le site de Tlemcen nous prenons : $m \approx 1/\sin h$

Tlemcen	Ciel bleu foncé	Ciel bleu clair	Ciel bleu laiteux
T_L	2 – 3	3 – 4	4 - 5

Tableau IV.2 : Variation du facteur de trouble pour différents états du ciel au site de Tlemcen

Pour Tlemcen $a^* = 0,2$ et le rayonnement rétro diffusé par le sol de l'ordre 15 W/m^2 .

IV.2.2. Estimation d'énergie instantanée (ciel couvert)

Le ciel couvert est un ciel gris totalement rempli de couches nuageuses continues, plus ou moins denses optiquement, et au travers desquelles il n'est pas possible de distinguer le disque solaire. Dans ces conditions le rayonnement direct est inexistant et le rayonnement global ne se compose que du rayonnement diffus.

Si la couverture nuageuse est homogène on peut considérer que le rayonnement diffus du ciel est isotrope de même que le rayonnement diffus du sol. Le rayonnement global par un ciel couvert est alors défini par [BRIC 84]:

$$E'_G = E'_D = K E_D (1 + 0.3 \sin h) \quad (IV.3)$$

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.

Pour le site de Tlemcen on prend le cas de ciel bleu clair (K = 0,3).

IV.2.3. 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 (α, γ) est :

$$E_{jS} = \int_{H_{L'}}^{H_{C'}} E_S dH E_{jD} = \int_{H_{L'}}^{H_{C'}} E_D dH E_{jG} = \int_{H_{L'}}^{H_{C'}} E_G dH \quad (IV.4)$$

L'intégration tout au long de la journée ne fournit pas une bonne valeur car il est difficile d'apprécier correctement les intempéries.

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]:

$$E_{jS} = \frac{1}{n} D_j \sum_n E_S E_{jD} = \frac{1}{n} D_j \sum_n E_D E_{jG} = \frac{1}{n} D_j \sum_n E_G \quad (IV.5)$$

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).

IV.2.4. 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.

$$E_{aS} = \sum_1^N E_{jS} E_{aD} = \sum_1^N E_{jD} E_{aG} = \sum_1^N E_{jG} \quad \text{Avec } N = 365 \text{ (ou } 366) \quad (IV.6)$$

IV.2.5. 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 :

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

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 ($\approx 250 \text{ W/m}^2$). Pour Tlemcen nous l'avons modélisé par [KLEI 76]:

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

Avec M : numéro du mois et D_0 , A, B et C des constantes définies par :

Constantes	D_0	A	B	C
D_{IS}	5,99	45,48	6,67	6,27

Tableau IV.3 : Constantes du modèle de la durée d'insolation du site de Tlemcen

IV.3. Modélisation du transport d'énergie solaire concentrée par des 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 [1].

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 lequel 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 θ_{\max} défini par la relation suivante :

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

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 grande distance dans le second milieu, elle est atténuée vu que celui-ci est 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 ϕ_r du concentrateur parabolique (Voir Figure IV.1) 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 ϕ_r du concentrateur doit être égale à θ_{\max} .

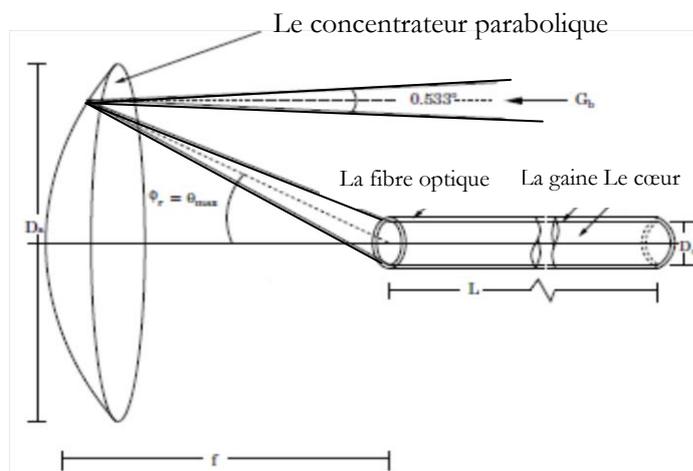


Figure IV.1 : Couplage entre le concentrateur parabolique et la fibre optique

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

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

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

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

[DUFF 91]:

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

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 obtenue par l'interception du rayonnement spéculaire réfléchi dans le cône avec un angle de $0.533^\circ + \delta$ [DUFF 91]:

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

Où δ 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 à la section d'entrée de câbles à fibres optiques. Tenant compte des équations (IV.11) et (IV.13), on peut déduire la distance focale optimale f_0 :

$$f_0 = \frac{D_c}{4 \tan(\theta_{\max}/2)} (C_{\max})^{1/2} \quad (IV.14)$$

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 [JARA 99]:

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

Avec : f : Distance focale;

ρ_m : Reflectance de la surface réceptrice du concentrateur;

ϕ_r : Angle du bord du concentrateur;

ϕ_{\min} : Angle d'ombre;

G_b : Irradiance du rayonnement solaire.

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

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

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

où ρ_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 [MODE 93].

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 [SIEG 81]:

$$Q_f = Q_{in} + U_r A_{of} (T_r - T_0) \quad (IV.17)$$

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

T_0 : Température ambiante (K)

T_r : Température du récepteur (K)

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

$$Q_{out} = 10^{-(L dB_{loss} / 10)} Q_{in} \quad (IV.18)$$

Avec L : Longueur de la fibre (m),

dB : Pertes dans la fibre (dB/m).

Le système du transport de l'énergie solaire concentrée peut être partagé en deux sous-systèmes. Le premier est le système de concentration de l'énergie solaire, le deuxième est le système du transport de cette énergie. Le système du TESCVFO (Transport de l'Energie Solaire Concentrée par des Fibres Optiques) ne stocke pas l'énergie, alors qu'il considère que le flux est constant.

La valeur maximale de l'efficacité ψ est donnée par Petela [PETE 05]:

$$\psi = 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T} \right)^4 - \left(\frac{4}{3} \right) \frac{T_0}{T} \quad (IV.19)$$

Avec : T_0 : Température ambiante (K)

T : Température de la source d'exergie (K).

Elle peut être définie comme exergie du rayonnement solaire en remplaçant T par T_s , la température apparente du corps noir exposé au soleil, est estimée à 6000 K.

SYSTEME I :

L'exergie qui provient du rayonnement solaire direct et qui tombe sur la surface du concentrateur est [KAND 08]:

$$Ex_{in} = G_b A_a \psi \quad (IV.20)$$

Ex_r , est le flux d'exergie de l'énergie utile qui entre à la fibre optique est donnée par :

$$Ex_r = Q_f \left(1 - \frac{T_0}{T_r}\right) \quad (IV.21)$$

SYSTEME II :

Si l'énergie solaire concentrée sur le récepteur est supposé comme étant une source d'exergie de l'énergie utile à l'extrémité de la fibre optique, le flux d'exergie transporté est :

$$Ex_{out} = Q_{out} \left(1 - \frac{T_0}{T_r}\right) \quad (IV.22)$$

L'exergie de destruction des deux systèmes I et II sont données respectivement comme suit :

$$Ex_{dest.I} = Ex_{in} - Ex_r \quad (IV.23)$$

$$Ex_{dest.II} = Ex_r - Ex_{out} \quad (IV.24)$$

L'exergie de destruction de tout le système est [KAND 08]:

$$Ex_{dest.} = Ex_{in} - Ex_{out} \quad (IV.25)$$

Les rendements de l'énergie et de l'exergie du système I sont obtenus respectivement par :

$$\eta_I = \frac{Q_f}{G_b A_a} \quad (IV.26)$$

$$\varepsilon_I = \frac{Ex_r}{Ex_{in}} \quad (IV.27)$$

De la même façon, Les rendements de l'énergie et de l'exergie du système II sont donnés par :

$$\eta_{II} = \frac{Q_{out}}{Q_f} \quad (IV.28)$$

$$\varepsilon_{II} = \frac{Ex_{out}}{Ex_r}$$

(IV.29)

Pour tout le système, les rendements de l'énergie et de l'exergie sont donnés comme suit :

$$\eta = \frac{Q_{out}}{G_b A_a} \quad (IV.30)$$

$$\varepsilon = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}} \quad (IV.31)$$

VI.3.1. Description du système du transport de l'énergie solaire concentrée par un câble à fibres optiques

Notre 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. Ce dispositif est installé à l'Institut de l'Energie Solaire à l'Université de Ege en Turquie (Voir figure IV.2).

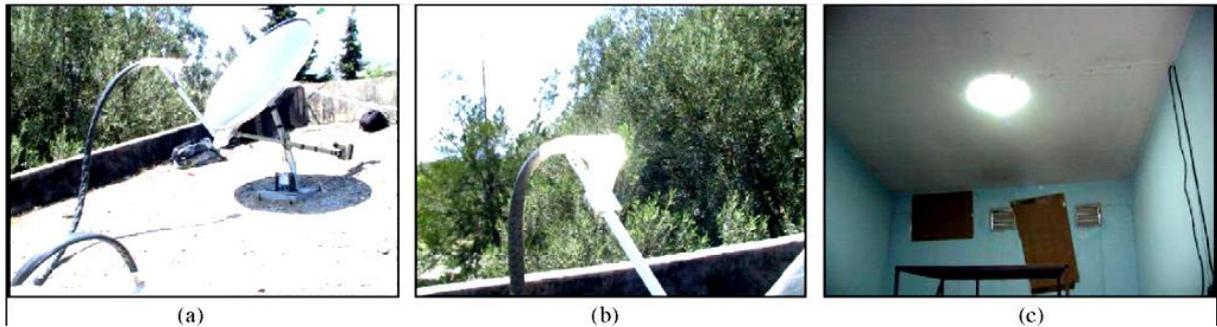


Figure IV.2 : *Système du transport de l'énergie solaire concentrée par un câble à fibres optiques*
 (a): *Apparence générale du système,*
 (b): *Concentration de l'énergie solaire dans le plan focal,*
 (c): *Energie solaire issue du système* [KAND 08]

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(IV.4) indique les paramètres essentiels du système. Le câble à fibres optiques utilisé est composé de fibres optiques possédant un large diamètre du cœur fabriqué en Polyméthylmethacrylat (PMMA). La longueur du câble est de 3 m. L'angle d'acceptance est déterminé par l'équation (IV.9). L'angle solide du concentrateur est donné par l'équation (IV.11). L'atténuation du câble est de 300 dB/km, la réflectivité du concentrateur est de 0,60 [KAND 09].

Paramètres	Valeur	Paramètres	Valeur
D_a (m)	1,04	θ_{\max} (°)	30,7
D_r (m)	0,03	ϕ_{\min} (°)	0
A_{of} (m ²)	0,00049	ϕ_r (°)	36,87
A_a (m ²)	0,85	C_{\max}	1731
f (m)	0,78	ρ_m	0,60
f_0 (m)	0,87	$\delta/2$ (°)	0,39
L (m)	4	dB_{loss} (dB/m)	0,30

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

La concentration maximale est donnée par l'équation (V.13), elle est estimée à 1731.

IV.3.2. Description du système du transport de l'énergie solaire concentrée par une fibre optique

Notre système est composé d'un concentrateur 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 donnée par la figure (IV.3), La concentration maximale est donnée par l'équation IV.13, elle est estimée à 1900,

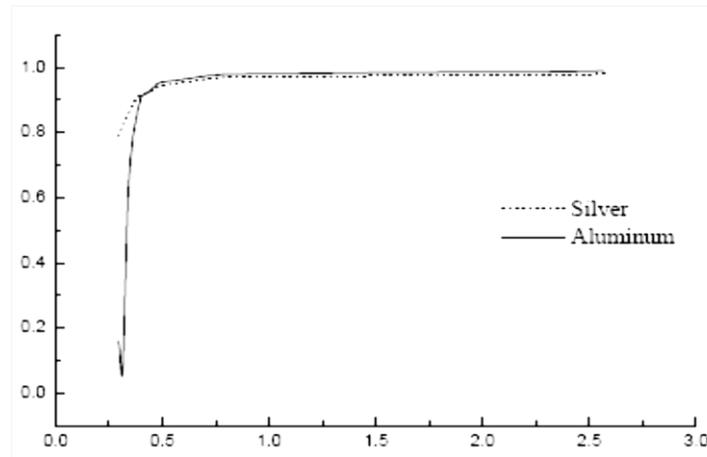


Figure IV.3 : Courbes de réflectance spectrale d'une surface réfléchissante fabriquée en Aluminium et en Argent [HEGG 88]

La fibre optique utilisée pour le transport de l'énergie solaire est fabriquée en Silice SiO_2 , son diamètre est de 5 mm, L'ouverture est estimée à 12° et son atténuation est de 250 dB/km (Voir figure IV.4).

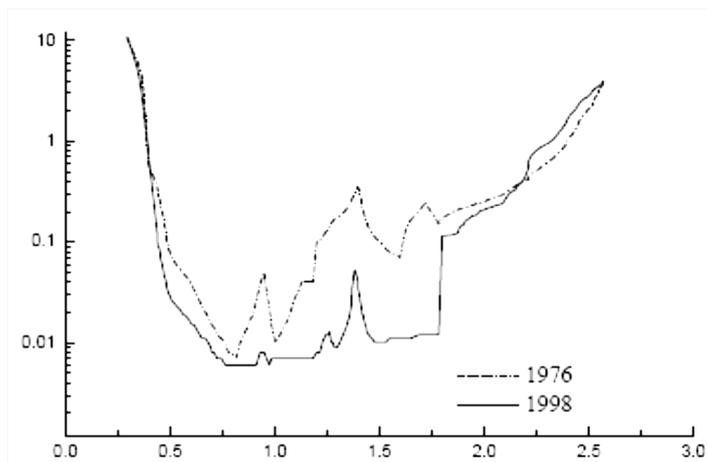


Figure IV.4 : Comparaison des fibres optiques fabriquées en SiO_2 en 1976 [KATO 76] et en 1998 [2]

Paramètres	Valeur	Paramètres	Valeur
D_a (m)	0,218	ϕ_{\min} ($^\circ$)	0
D_c (m)	0,005	ϕ_r ($^\circ$)	12
A_{of} (m^2)	$1,96 \cdot 10^{-5}$	C_{\max}	1900
L (m)	3	f_0 (m)	0,519
dB_{loss} (dB/m)	0,30	ρ_m	0,95
θ_{\max} ($^\circ$)	12	$\delta/2$ ($^\circ$)	0

Tableau IV.5 : Paramètres du système du transport de l'énergie solaire concentrée par une fibre optique fabriquée en SiO_2

IV.4. Modélisation d'un four solaire alimenté par fibres optiques

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 alimenté par fibres optiques nous permet d'avoir une approche des systèmes thermiques destinés à l'obtention de très hautes températures.

IV.4.1. Dispositif proposé

La figure IV.5 décrit le système du four solaire alimenté par fibre optique proposé dans cette étude.

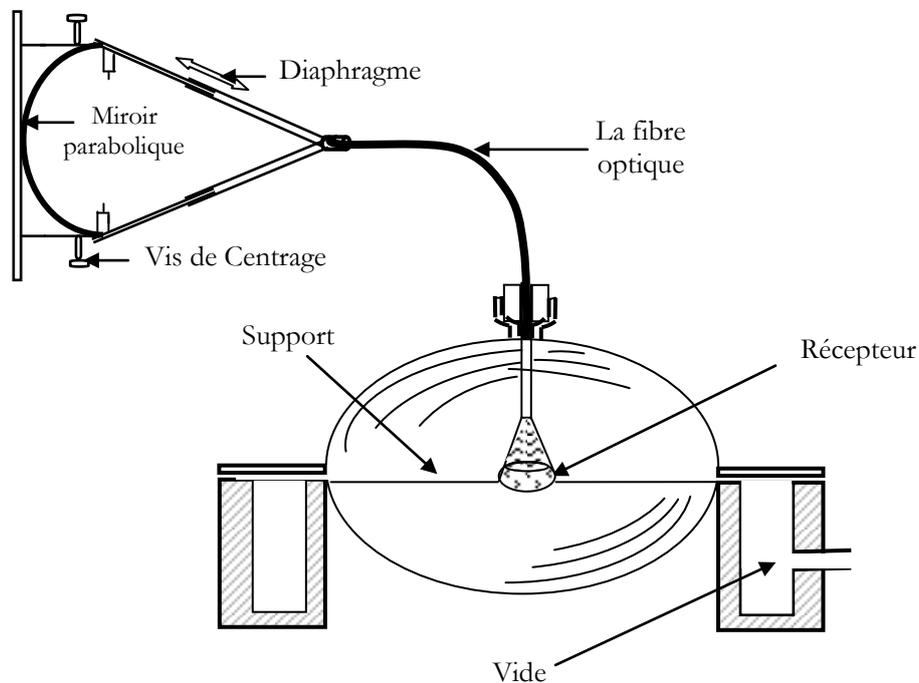


Figure IV.5 : *Dispositif proposé d'un four solaire alimenté par fibre optique*

Notre nouvelle conception se compose d'un système du transport de l'énergie solaire concentrée, le deuxième système porte sur un four solaire 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 μm 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 (m^2),

T_r : Température absolue (K),

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

α_s : Coefficient d'absorption moyen de sa surface pour un rayonnement solaire,

α_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 : $R_s = R_T = R$,

Paramètres	Valeur
$S_r(m)$	$3,14 \cdot 10^{-4}$
$T_0 (K)$	298
α_s	0,5
α_T	0,6
R	0,7

Tableau IV.6 : Paramètres essentielles du four solaire proposé

IV.4.2. 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 α_s , Il réfléchit le complément, $(1 - \alpha_s)P$, qui est à son tour renvoyé par l'enveloppe vers le récepteur qui absorbe à nouveau la fraction α_s et ainsi de suite...

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

$$P_{as} = \alpha P_s [1 + R(1 - \alpha_s) + R^2(1 - \alpha_s)^2 + \dots] = \frac{\alpha_s P_s}{1 - R + \alpha_s R} \quad (IV.32)$$

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

$$P_T = m c \frac{dT}{dt} \quad (IV.33)$$

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

$$P_{eT} = \alpha_T \sigma S_r T_r^4 \quad (IV.34)$$

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

$$P_{aT} = \frac{\alpha_T R P_{eT}}{1 - R + \alpha_T R} \quad (IV.35)$$

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 :

$$P_{as} + P_{aT} + P_{ap} = P_{eT} + P_T \quad (IV.36)$$

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 :

$$P_{ap} = \alpha_T \sigma S_r T_a^4 \left[\frac{1-R}{1-R+\alpha_T R} \right] \quad (IV.37)$$

On remplaçant dans l'équation IV.36 les différents termes par leur expression on trouve l'équation différentielle à laquelle obéit la température $T = T_r$:

$$m c \frac{dT}{dt} + \frac{\alpha_T \sigma S_r}{1-R+\alpha_T R} (1-R)(T^4 - T_a^4) = \frac{\alpha_s}{1-R+\alpha_s R} P_s \quad (V.38)$$

L'équation différentielle IV.38 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 :

$$T_e^4 - T_a^4 = \frac{1}{\sigma S_r} \frac{\alpha_s}{\alpha_T(1-R)} \frac{1-R+\alpha_T R}{1-R+\alpha_s R} P_s \quad (IV.39)$$

IV.4. CONCLUSION

La modélisation des différents éléments d'un système photothermique est une étape indispensable qui doit précéder toute phase de dimensionnement, d'identification ou de simulation. Cependant, ces systèmes ont des paramètres variables avec une grande influence sur le rendement et la fiabilité attendue. Dans le cadre de l'étude de notre conception, nous avons élaboré des modèles de paramètres différents pour le transport de l'énergie solaire concentrée afin de déduire le modèle le mieux adopté pour notre système.

Références bibliographiques

- [MENN 12] Menni Y., « *Etude Numérique Comparative Entre Deux Types de Chicanes Et Ailettes (Trapézoïdale et Triangulaire) Utilisées Pour Améliorer les Performances des Capteurs Solaires Plans à Air* ». Thèse de Magister, Juin 2012.
- [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.
- [CAPD 86] Capderou M., « *Atlas Solaire De l'Algérie* », EPAU, Tome I, II, III, (1986).
- [BRIC 84] De Brichambaut P., « *Evaluation Energétique D'un Gisement Solaire* », Tec et Doc, (1984).
- [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).
- [DUFF 91] Duffie A., Beckman W. A., « *Solar Engineering of Thermal Process* », Ed.Wiley and Sons, U.S.A, (1991).
- [JARA 99] Jaramillo O.A., Huelsz G., del Rio J.A., « *A Thermal Study Of Optical Fibres Transmitting Concentrated Solar Energy* », Journal Physics D, Vol. 32, (1999), PP. 1000-1005.
- [MODE 93] Modest M. F., « *Radiative Heat Transfer* », New York: McGraw-Hill, (1993).
- [SIEG 81] Siegel R. and Howell J.R., « *Thermal Radiation Heat Transfer* », McGraw-Hill, (1981).
- [PETE 05] Petela R., « *Exergy Analysis Of The Solar Cylindrical-Parabolic Cooker* », Solar Energy, Vol. 79, (2005), pp. 221-233.
- [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.
- [KAND 09] Kandilli C., Ulgen K., « *Review And Modelling The Systems Of Transmission Concentrated Solar Energy Via Optical Fibres* », Renewable and Sustainable Energy, Vol. 13, (2009), pp. 67-84.
- [HEGG 88] Heggen P.M., « *Solar Concentrating Mirrors* », USA: Energy General Press, (1988).
- [KATO 76] Kato D., Nakamura T., « *Application of optical fibers to the transmission of solar radiation* » J. Appl. Phis., Vol. 40, (1976), pp. 4528.
- [CARI 85] Cariou JM., Dugas J., Martin L., « *Theoretical Limits Of Optical Fibre Solar Furnaces* », Solar Energy, Vol. 34, (1985), PP. 329-339.

Webographie

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

CHAPITRE V

RESULTATS ET

DISCUSSIONS

Chapitre V

Résultats et discussions

V.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de la simulation numérique obtenue par un code de calcul développé. Comme cité au paravent, le problème consiste à analyser et étudier un nouveau système photothermique alimenté par fibres optiques en vue d'une nouvelle conception d'un four solaire. La modélisation de l'énergie reçue, concentrée et transportée par les fibres optiques est présentée en détail dans le chapitre précédent.

Ce travail consiste à développer l'étude comparative entre deux modèles du système de transport de l'énergie solaire concentrée dans le but de choisir le modèle adéquat à notre étude de conception.

Après l'obtention du modèle convenable, le choix des différents paramètres du système permet l'amélioration de la qualité de transfert entre le système de transport de l'énergie solaire et le récepteur du four solaire proposé dans ce travail.

La partie essentielle de ce travail consiste à obtenir une haute température dans le récepteur du four solaire, pour cela nous devons optimiser les paramètres des deux systèmes :

- Le premier système concentre l'énergie solaire captée par un concentrateur parabolique, ensuite cette énergie est transportée par fibres optiques.
- Le deuxième système reconcentre l'énergie solaire recueillie des fibres optiques dans un récepteur renfermé dans une enceinte. Le rôle de l'enceinte est de piéger le rayonnement reçu dans le récepteur du four solaire.

L'énergie et l'exergie du premier système ont été calculés par le code numérique développé, ainsi que la température du récepteur, et cela à n'importe quelle heure de la journée et de l'année. Nos résultats sont conçus pour notre site de Tlemcen, ils peuvent être simulés dans n'importe quel lieu de la terre.

V.2. Données météorologiques

Les données météorologiques disponibles sur un site sont généralement insuffisantes pour une conception fine d'un système photothermique. Certaines d'entre elles (température ambiante, durée d'insolation, tension de vapeur d'eau, visibilité au sol...) sont indispensables et nécessaires pour une bonne conception assistée par ordinateur [BENY 99].

V.2.1. 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 V.1 et la figure V.1.

Mois	Ray	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	S _{journée}
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 V.1 : Energie (en Wh/m^2) incidente sur le capteur TEL à Tlemcen

Pour un champ photothermique d'orientation $\beta=\varphi$ (Inclinaison = Latitude du lieu) c'est-à-dire une orientation Tel du capteur, nous constatons que:

- Les rayonnements direct et global passent par un maximum au mois d'Août (voir Tableau V.1) [BENY 04].

- Le site de Tlemcen reçoit une énergie journalière (moyenne mensuelle) directe et globale tel que mentionnée sur la (figure V.1):

$$E_{S_{\text{moy}}} = 3881,25 \text{ Wh/m}^2, \quad E_{G_{\text{moy}}} = 5719,5 \text{ Wh/m}^2$$

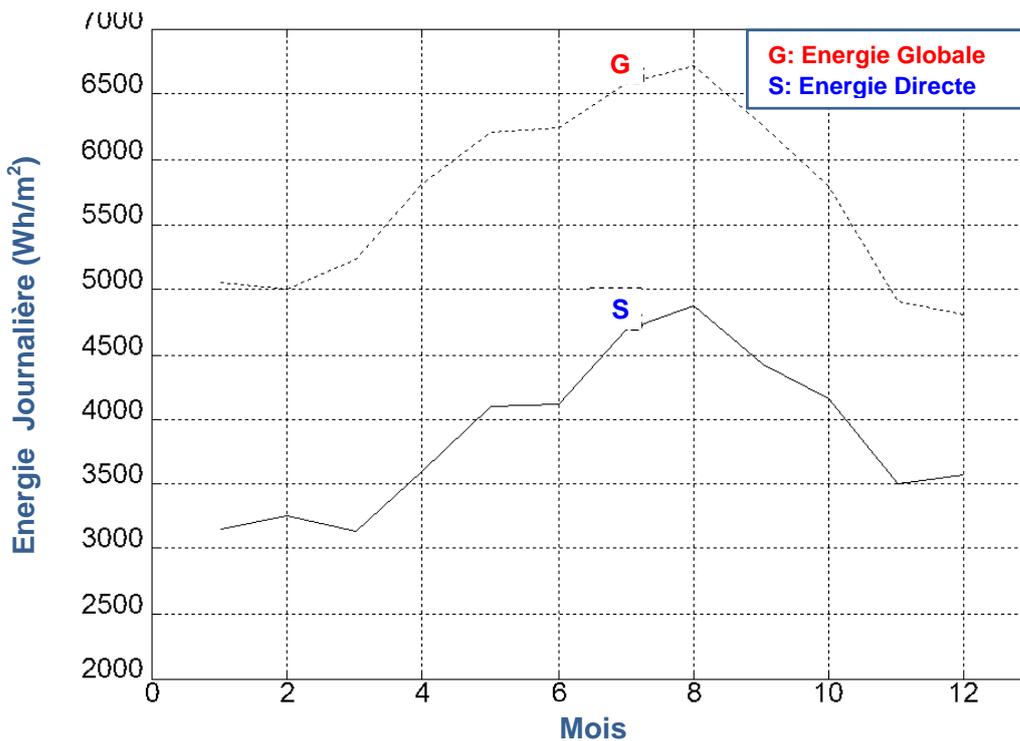


Figure V.1 : Energie journalière moyenne directe et globale du site de Tlemcen

V.2.2. Durée d'insolation et durée du jour

La durée d'insolation (D_{IS}) est la durée effective d'ensoleillement d'un capteur horizontal mesurée par un héliographe et définie à partir d'un seuil minimum ($\approx 250 \text{ W/m}^2$) [BRIC 84].

La durée du jour (D_j) par contre est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil sur un capteur horizontal. La connaissance de ces deux grandeurs est nécessaire pour estimer l'offre énergétique du système photothermique. Le traitement des données météorologiques de l'Office National de Météorologie (station Zenata Tlemcen 1999-2000-2001) a donné les valeurs moyennes mensuelles (sur 3 ans) représentées sur la figure V.2 et sur le tableau V.2.

Pour Tlemcen les valeurs de la durée du jour et de la durée d'insolation journalière (moyenne sur les 3 ans) maximale et minimale sont :

$$D_j \text{ max} = 14 \text{ h } 18 \text{ mn} \text{ et } D_j \text{ min} = 9 \text{ h } 40 \text{ mn} ; D_{IS} \text{ max} = 10 \text{ h } 30 \text{ mn} \text{ et } D_{IS} \text{ min} = 7 \text{ h } 09 \text{ mn}$$

L'écart d'ensoleillement dû à la saison et à la climatologie affecte les performances optimales d'un système photothermique. Il remet en cause les dimensionnements basés sur les mois les plus défavorables de l'année. La durée d'insolation est un paramètre primordial pour la conception des systèmes photothermiques. Il est difficilement modélisable, le traitement des données météorologiques nous a permis une modélisation pour le site de Tlemcen (Voir figure V.2). Le comportement d'un système photothermique peut être décrit aussi par la fraction d'insolation K définie par : $K_{IS} = D_{IS}/D_j$.

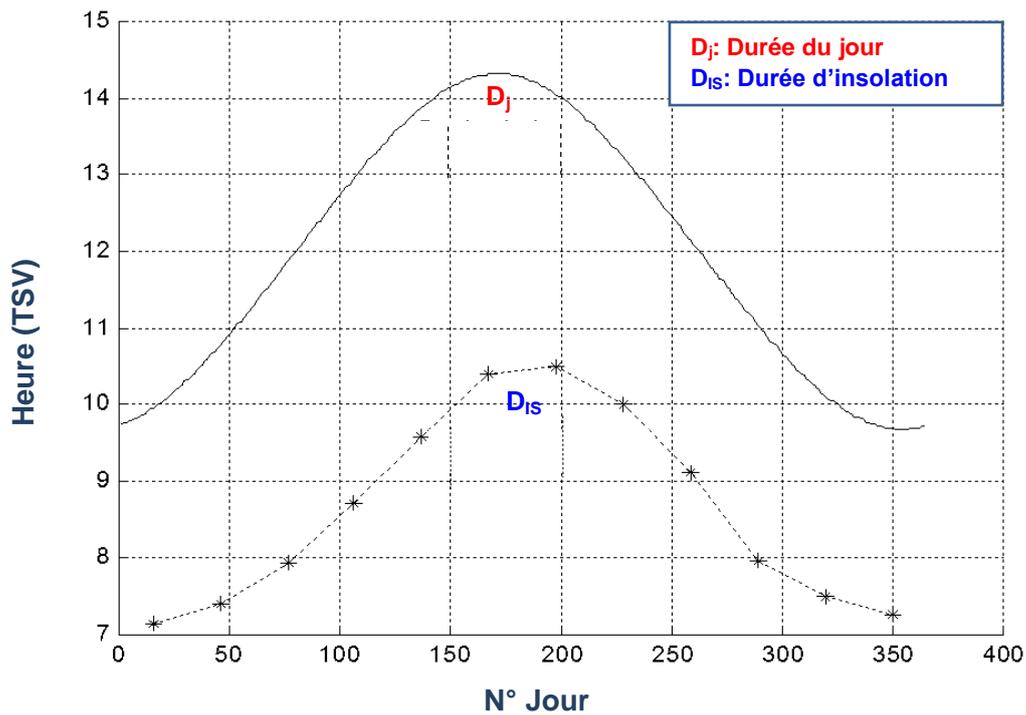


Figure V.2 : Durée d'insolation et durée du jour à Tlemcen

Moyenne Mensuelle	D_{IS} (h)	D_j (h)
1	7,15	10,01
2	7,40	10,08
3	7,95	11,83
4	8,72	12,91
5	9,58	13,72
6	10,4	14,25
7	10,5	14,04
8	10	13,28
9	9,10	12,25
10	7,96	11,17
11	7,50	10,24
12	7,25	09,77

Tableau V.2 : Durée d'insolation et durée du jour à Tlemcen

V.2.3. 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 une plage de variations de cette grandeur et une modélisation journalière (Voir figure V.3).

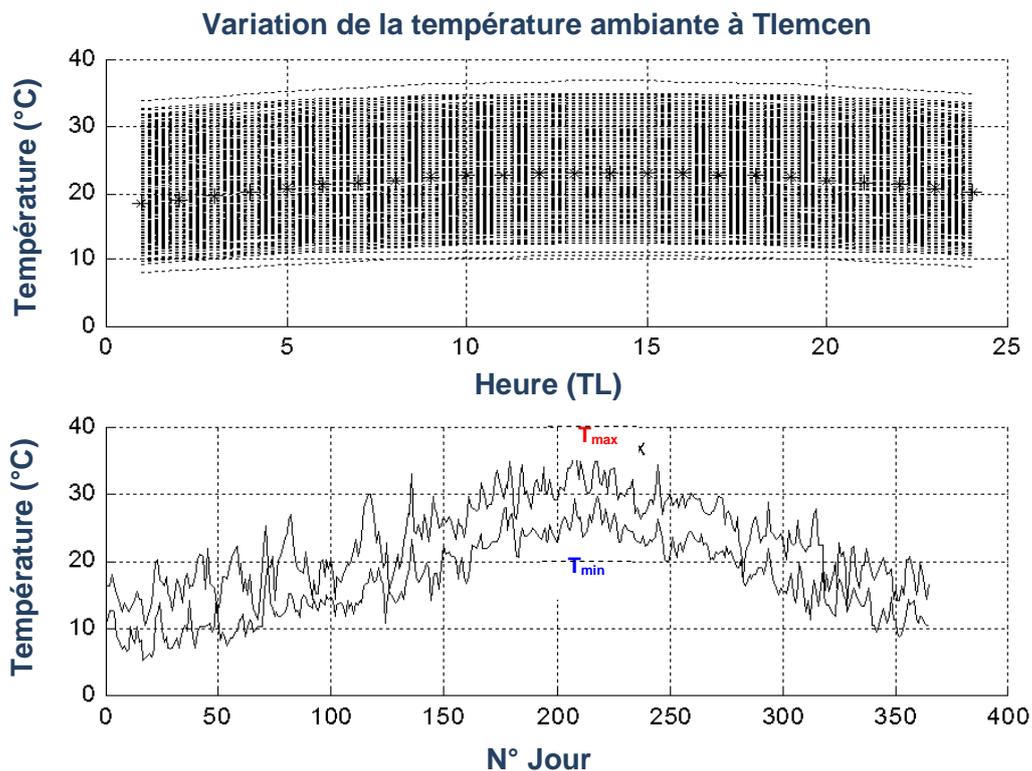


Figure V.3 : *Variation de température ambiante à Tlemcen* [AMAR 04]

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 V.3) 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

Mois	Températures ambiantes Moyenne (°C)	
	maximales	minimales
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 V.3 : Moyennes mensuelles des températures journalières du mois

V.3. Course du soleil

Afin de simuler le mouvement apparent du soleil sur un champ photothermique, nous avons transformé les coordonnées horizontales et équatoriales du soleil en coordonnées cartésiennes [ZIDA 03].

V.3.1. Coordonnées du soleil

La connaissance de la position du soleil permet d'estimer l'énergie captée par le champ photothermique. L'énergie est ainsi cernée par une plage de variations en fonction du temps (instantanée, horaire, journalière, mensuelle et annuelle) facilitant l'optimisation et le dimensionnement adéquat du système de captation. Nous avons aussi réalisé un programme de simulation des rayons solaires sur un capteur (champ photothermique) situé en n'importe quel lieu de la terre et à n'importe quel instant de la journée et de l'année. Les résultats de simulation pour le site de Tlemcen sont donnés sur les figures suivantes:

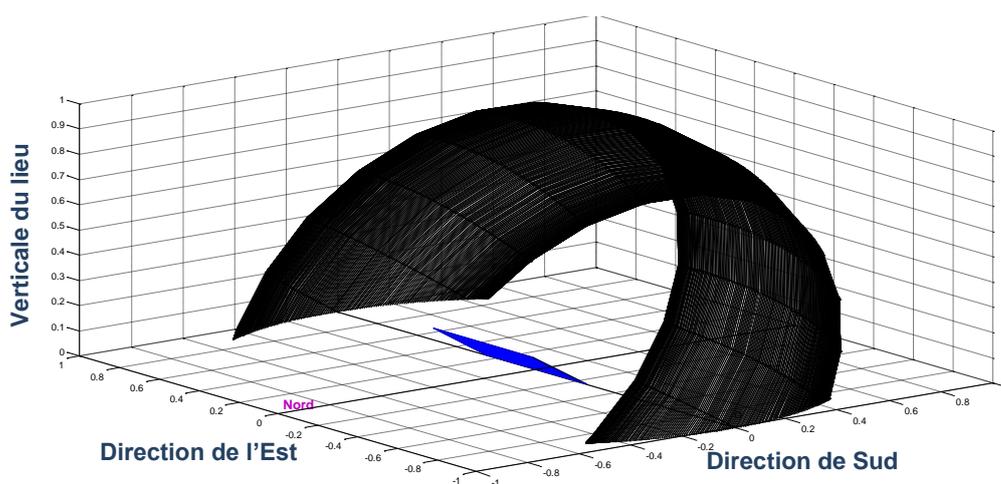


Figure V.4 : Calotte balayée par le soleil au site de Tlemcen

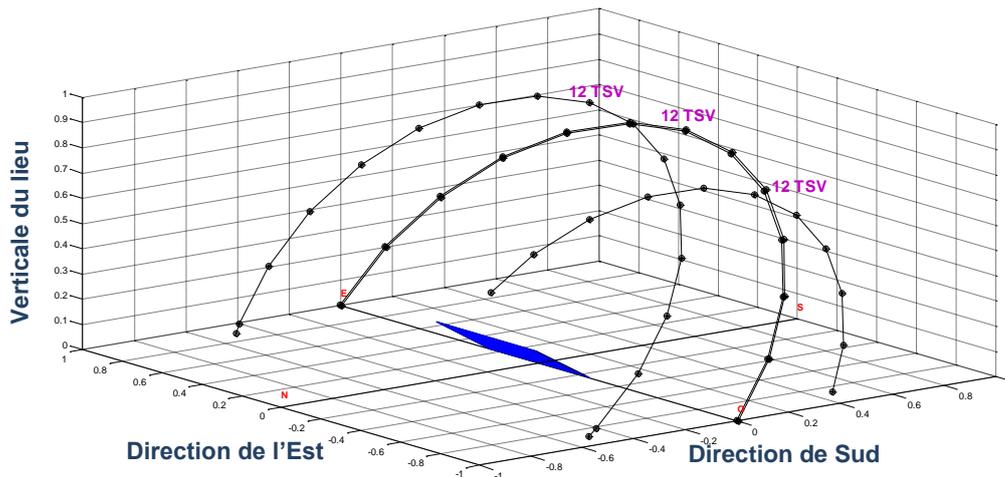


Figure V.5 : Course du soleil aux solstices et équinoxes à Tlemcen

Les coordonnées du soleil sont alors déterminées à n'importe quel instant de la journée et de l'année. Pour les solstices et les équinoxes à Tlemcen les résultats sont donnés sur le tableau suivant:

S.H				E.P - E.A				S.E			
TSV(h)	X(UA)	Y(UA)	Z(UA)	TSV(h)	X(UA)	Y(UA)	Z(UA)	TSV(h)	X(UA)	Y(UA)	Z(UA)
7,159	0,475	0,861	0	6,000	0	0,996	0	4,841	-0,491	0,890	0
8,000	0,578	0,781	0,149	7,000	0,146	0,962	0,212	5,000	-0,470	0,900	0,030
9,000	0,684	0,638	0,303	8,000	0,282	0,862	0,410	6,000	-0,333	0,932	0,229
10,000	0,765	0,451	0,421	9,000	0,399	0,704	0,580	7,000	-0,196	0,900	0,428
11,000	0,816	0,233	0,495	10,000	0,489	0,498	0,710	8,000	-0,068	0,807	0,613
12,000	0,834	0	0,521	11,000	0,545	0,257	0,792	9,000	0,040	0,659	0,772
13,000	0,816	-0,233	0,495	12,000	0,565	0	0,820	10,000	0,125	0,466	0,894
14,000	0,765	-0,451	0,421	13,000	0,545	-0,257	0,792	11,000	0,177	0,241	0,971
15,000	0,684	-0,638	0,303	14,000	0,489	-0,498	0,710	12,000	0,195	0	0,997
16,000	0,578	-0,781	0,149	15,000	0,399	-0,704	0,580	13,000	0,177	-0,241	0,971
16,841	0,475	-0,861	0	16,000	0,282	-0,862	0,410	14,000	0,125	-0,466	0,894
				17,000	0,146	-0,962	0,212	15,000	0,040	-0,659	0,772
				18,000	0	-0,996	0	16,000	-0,068	-0,807	0,613
								17,000	-0,196	-0,900	0,428
								18,000	-0,333	-0,932	0,229
								19,000	-0,700	-0,900	0,030
Avec 1 U.A = 149597890 km = 1 Unité Astronomique								19,159	-0,491	-0,890	0

Tableau V.4 : Coordonnées du soleil aux équinoxes et solstices pour le site de Tlemcen

V.3.2. Angle d'incidence

L'angle d'incidence est une donnée nécessaire à l'estimation d'énergie incidente sur un champ photothermique. Ce paramètre dépend du temps, de la position du soleil et de l'orientation du champ. Avec la simulation, nous avons introduit, la détermination de cet angle qui dépend des coordonnées du soleil, des coordonnées du capteur et des coordonnées du lieu d'implantation du champ photothermique. La simulation de la course du soleil permet de déterminer l'angle d'incidence sur un capteur (α, γ) à chaque instant de la journée et de l'année. Les angles d'incidences sur un champ d'orientation ($\alpha = 0, \gamma = 90 - \varphi$) à Tlemcen avec $\varphi = 34,56^\circ$ pour les débuts de saisons sont représentés sur le tableau V.5 :

Heure (TSV)	EP-EA	SE	SH
6	90,0000	90,0000	-
7	75,0000	76,2644	-
8	60,0000	62,6965	62,9665
9	45,0000	49,5559	49,5559
10	30,0000	37,3921	37,3921
11	15,0000	27,6069	27,6069
12	0,0000	23,3921	23,4500
13	15,0000	27,6069	27,6069
14	30,0000	37,3921	37,3921
15	45,0000	49,5559	49,5559
16	60,0000	62,6965	62,6965
17	75,0000	76,2644	-
18	90,0000	90,0000	-

Tableau V.5 : Angles d'incidences sur un champ photothermique d'orientation TEL

V.3.3. 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, ...).

V.3.3.1. 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 V.6:

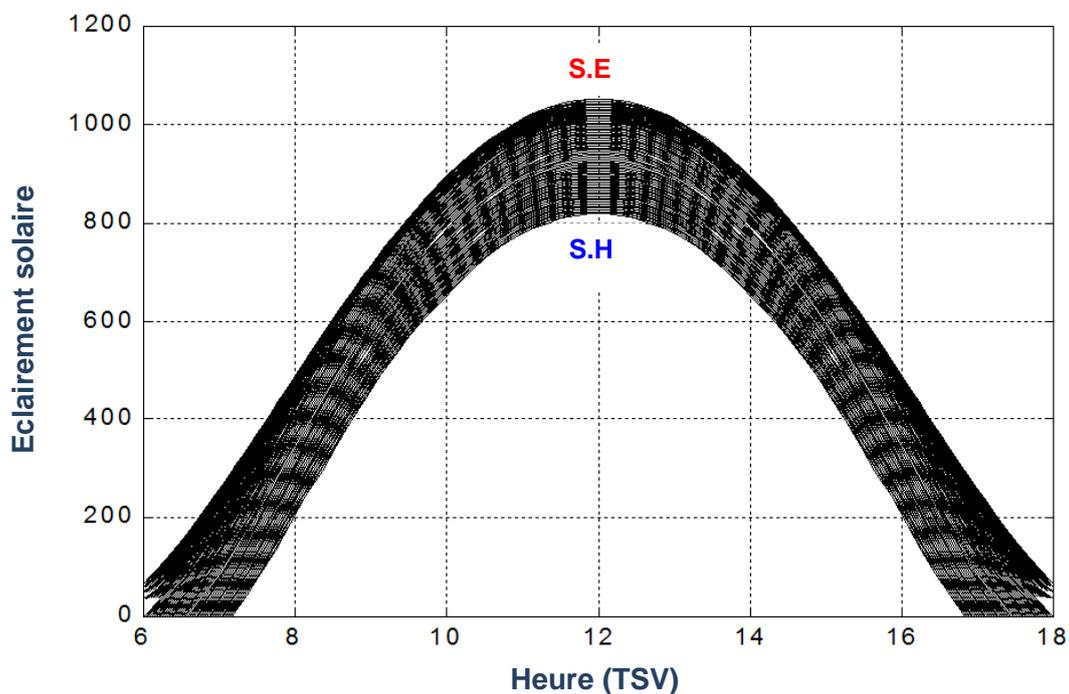


Figure V.6 : *Plage de variation de l'éclairement solaire sur un capteur TEL à Tlemcen*

La plage de variations de l'énergie instantanée sur une journée à Tlemcen varie de 0 à 800 W/m² au solstice hivers et de 0 à 1100 W/m² au solstice été. Cette plage varie à 12h TSV de 800 W/m² à 1100 W/m² 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.

V.3.3.2. 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 V.7.

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

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

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

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

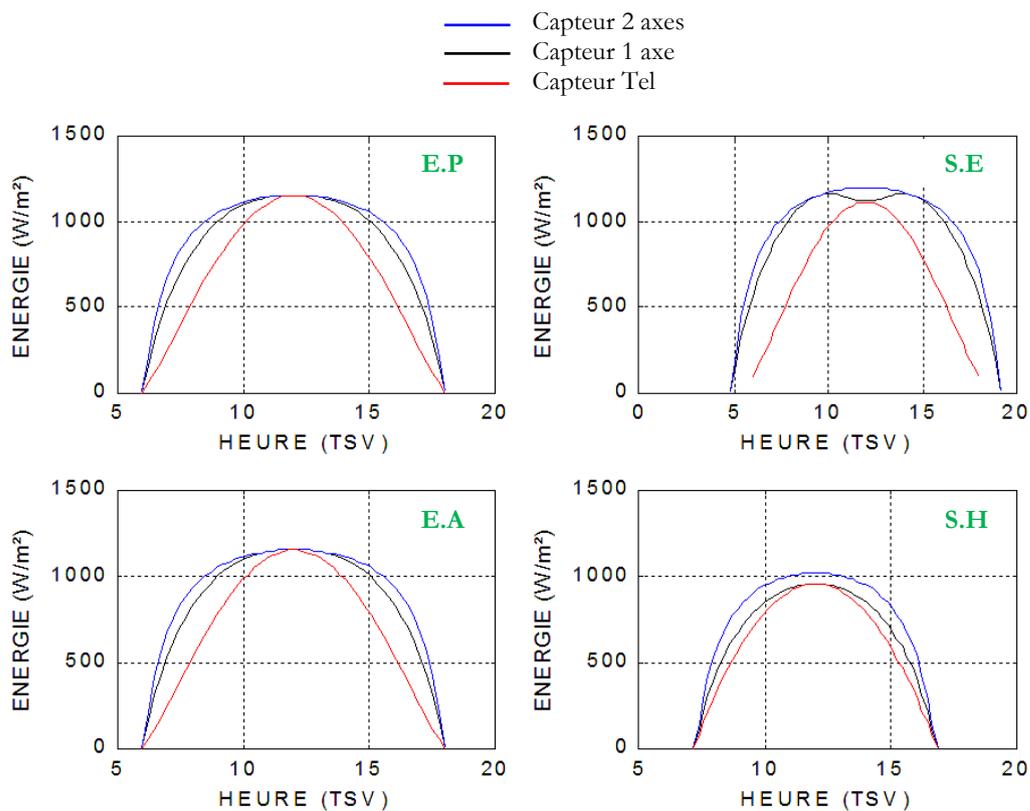


Figure V.7 : Estimation d'énergie globale instantanée incidente aux équinoxes et solstices sur les capteurs (1 axe, 2 axes et TEL) pour un ciel bleu clair

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.

Les résultats de simulation de l'énergie journalière sur les trois capteurs à Tlemcen aux solstices et aux équinoxes et pour un ciel bleu clair sont représentés sur le tableau suivant :

E_G (Wh/m ²)	Un axe	Deux axes	TEL
S.H	5346,5	6125,4	4911,7
E.A - E.P	8788,5	9334,7	7229
S.E	11059	11743	7469,3

Tableau V.6 : Variations de l'énergie journalières pour les trois capteurs

Ej 1axe = 87% Ej 2axes au SH Ej Tel = 77% Ej 2axes aux EA-EP
 Ej Tel = 80% Ej 2axes au SH Ej 1axe = 94% Ej 2axes au SE
 Ej 1axe = 94% Ej 2axes aux EA-EP Ej Tel = 64% Ej 2axes au SE

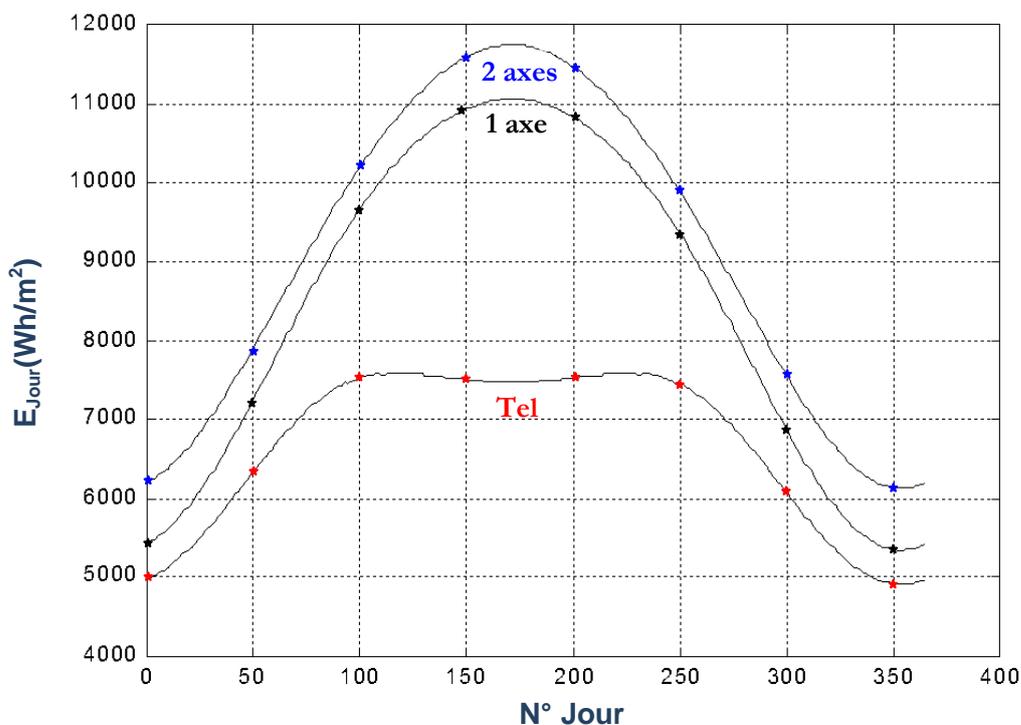


Figure V.8 : Energie globale journalière par ciel bleu clair à Tlemcen sur les capteurs (suivi 1 axe, suivi 2 axes et TEL)

Le maximum d'énergie journalière est donné par le capteur à deux axes. Le capteur deux axes donne le maximum d'énergie annuelle ($3,3344 \cdot 10^6 \text{Wh/m}^2$) avec un grand écart (5531Wh/m^2) entre l'Hiver et l'Eté. Pour la même période cet écart est moins important ($2539,9 \text{Wh/m}^2$) pour le capteur Tel.

En conclusion, le choix du type de capteur dépendra du maximum d'énergie captée. Ces trois types de capteurs donnent une énergie journalière trop fluctuante durant l'année, ce qui influencera le bon dimensionnement des fours solaires.

La conception d'un système photothermique avantage le suivi du soleil deux axes surtout pour les systèmes à concentrations.

V.3.3.3. Inclinaison du champ photothermique

L'étude de l'orientation et de l'inclinaison d'un capteur est très importante pour l'estimation d'énergie captée. La simulation a prouvé que l'orientation face au sud (capteur fixe) favorise un captage maximum d'énergies journalières et annuelles.

L'inclinaison proche de $\beta = \varphi$ favorise le captage maximum d'énergie annuelle d'un site. Pour Tlemcen les résultats de simulation de l'énergie journalière sur un champ photothermique d'inclinaison variable et par ciel clair sont représentés sur la figure V.9.

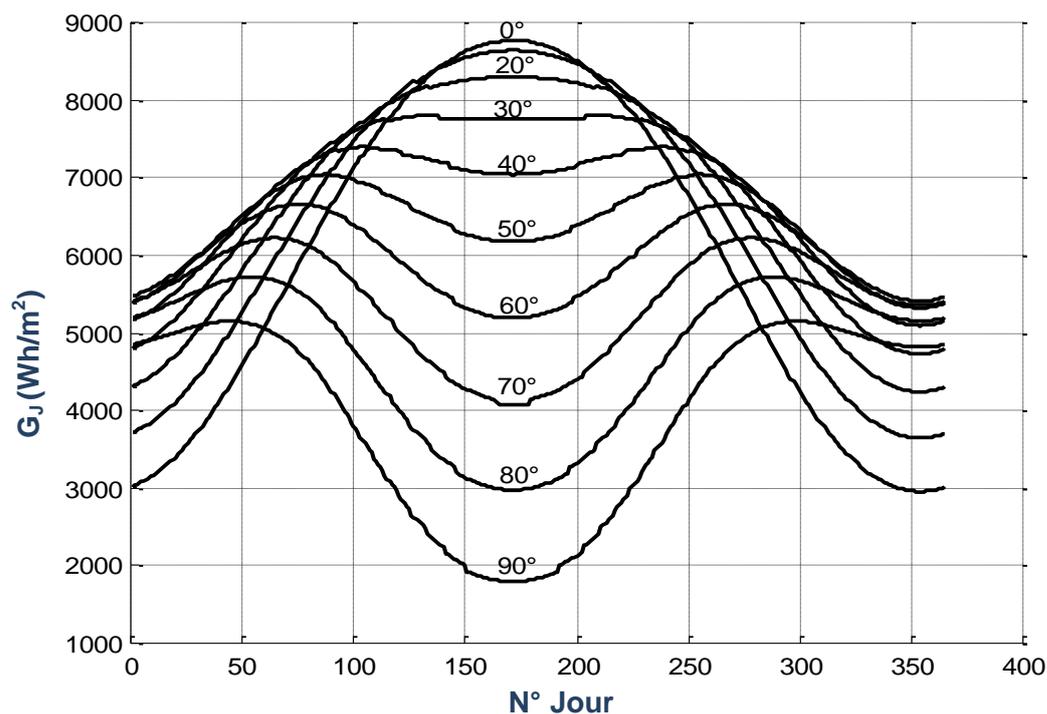


Figure V.9 : Influence de l'inclinaison sur l'énergie journalière captée [ZIDA 03]

Pour un ciel bleu clair, au site de Tlemcen, les résultats de simulation et d'optimisation de l'orientation du capteur solaire pour les énergies directs (E_{iD}), diffuses (E_{iG}) et globales (E_{iG}) sont représentés sur la figure V.10. [ZIDA 03]

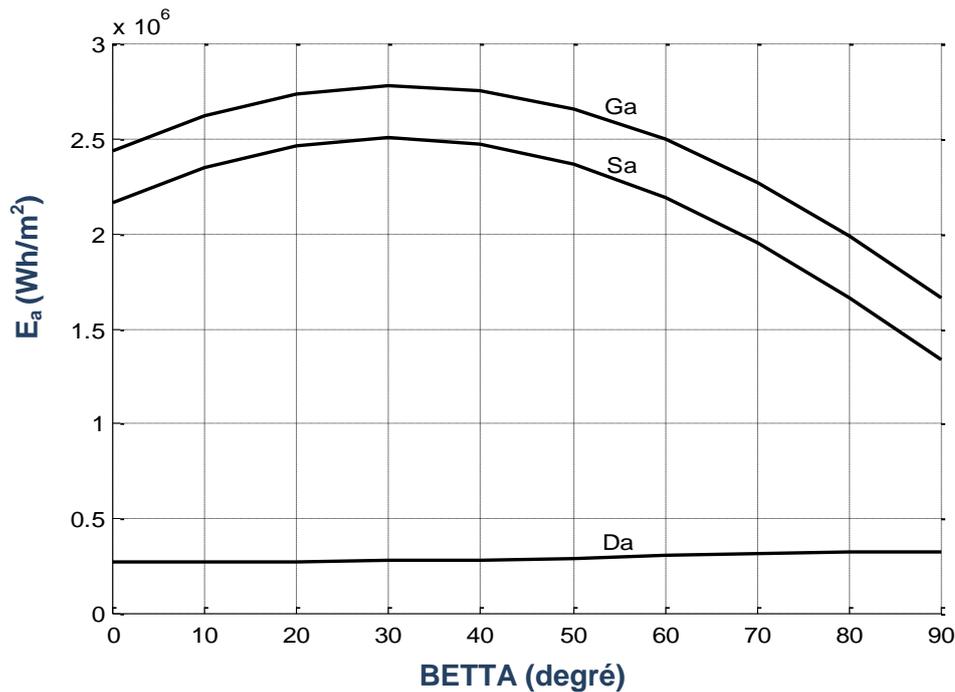


Figure V.10 : Optimisation de l'angle d'inclinaison du capteur photosolaire

	E_{jS}	E_{jD}	E_{jG}
S.H	4188,6	723,09	4911,7
E.A- E.P	6138,4	1090,6	7229,0
S.E	6159,7	1309,6	7469,3

Tableau V.7 : Estimation des énergies journalières aux solstices et équinoxes

Les résultats d'optimisation de l'énergie annuelle globale d'un capteur Sud ($\alpha=0$, $\beta=90^\circ - \gamma$) obtenus au site de Tlemcen sont :

- ❖ Le maximum annuel de l'énergie directe captée:

$$E_{aS} = E_{aSmax} = 2,06 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2 \quad \text{pour} \quad \begin{cases} \alpha = 0 \\ \gamma = (90 - 30)^\circ \end{cases}$$
- ❖ Le maximum annuel de l'énergie diffuse captée:

$$E_{aD} = E_{aDmax} = 3,89 \cdot 10^5 \text{ Wh/m}^2 \quad \text{pour} \quad \begin{cases} \alpha = 0 \\ \gamma = (90 - 7)^\circ \end{cases}$$
- ❖ Le maximum annuel de l'énergie globale captée:

$$E_{aG} = E_{aGmax} = 2,45 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2 \quad \text{pour} \quad \begin{cases} \alpha = 0 \\ \gamma = (90 - 30)^\circ \end{cases}$$

La simulation des énergies annuelles maximales pour le site de Tlemcen a donné l'inclinaison optimale du capteur obtenue pour une orientation face au Sud $\alpha=0$, incliné d'environ $\beta \approx \varphi - 5^\circ$, au lieu de $\beta \approx \varphi$ trouvé dans la littérature solaire.

Pour un capteur TEL ($\alpha = 0$, $\gamma = 90 - 34,56$), les valeurs de E_{aS} , E_{aD} et E_{aG} sont données respectivement par :

- ❖ Energie annuelle directe: $E_{aS} = 1.3885 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$
- ❖ Energie annuelle diffuse: $E_{aD} = 0.3447 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$
- ❖ Energie annuelle globale: $E_{aG} = 1.73332 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$

Dès qu'on s'écarte de l'inclinaison $\beta=\varphi$, la simulation sur le site de Tlemcen montre que l'écart d'énergie journalière devient important entre l'Hiver et l'Eté. L'énergie journalière globale est maximale pour le capteur (0,90) et minimale pour le capteur (0,0) au solstice Eté, tel que :

$$G_j(\text{max}) \cong 9000 \text{ Wh/m}^2 \quad \text{et} \quad G_j(\text{min}) \cong 2000 \text{ Wh/m}^2.$$

La simulation a montré que pour avoir une énergie presque constante durant toute l'année (critère de bon dimensionnement) à Tlemcen, il faut incliner le capteur d'un angle de $\beta=58^\circ$ par rapport à l'horizontal. Dans ce cas on aura alors la plage annuelle d'énergie captée comprise entre: $G_j(\text{max}) = 6835,2 \text{ Wh/m}^2$ et $G_j(\text{min}) = 5480,6 \text{ Wh/m}^2$.

L'écart entre le maximum et le minimum d'énergies journalières incidentes à Tlemcen est présenté sur la figure V.11, sur un capteur incliné de $\beta = 58^\circ$ il est estimé à $1354,6 \text{ Wh/m}^2$. Cet écart est très important pour la conception des systèmes, surtout pour les grandes surfaces de captation.

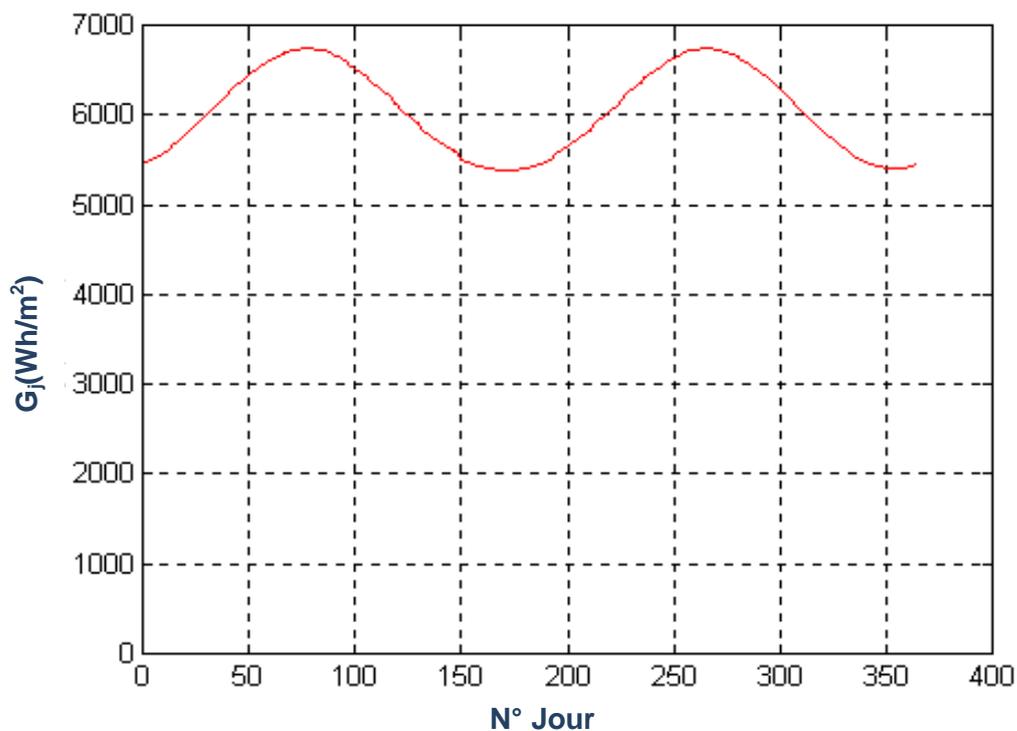


Figure V.11 : *Energie journalière incidente sur un capteur incliné de 58° sur site de Tlemcen et par ciel bleu clair*

V.4. Résultats du dispositif conçu et proposé

Le dispositif proposé est un four solaire relié à un système du transport de l'énergie solaire concentrée par des fibres optiques, ce système est composé :

- d'un concentrateur parabolique muni d'un suiveur du soleil à deux axes qui est entraîné par deux moteurs, assurant l'un la poursuite en site, l'autre en azimut.
- des fibres optiques solaires.

Dans le but d'atteindre de hautes températures dans le récepteur du four solaire proposé, nous proposons une étude pour deux modèles du transport de l'énergie solaire concentrée avec des paramètres différents.

V.4.1. Modèle d'un système du transport d'énergie solaire concentrée par un câble à fibres optiques

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 Polyméthylméthacrylate (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 estimée 1731.

De même, la figure V.12 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.

La figure V.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 83,21 W à midi TSV au solstice hiver, 96,74 W aux équinoxes printemps et automne. Les valeurs dépassent 101,03 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.

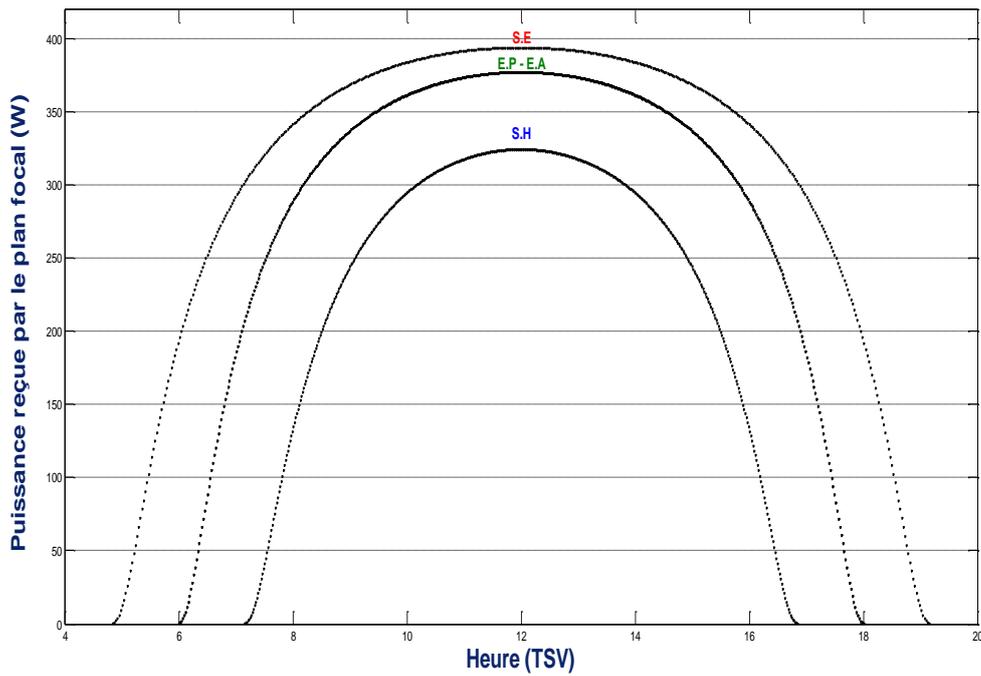


Figure V.12 : Puissance reçue par le concentrateur parabolique pour les solstices et équinoxes

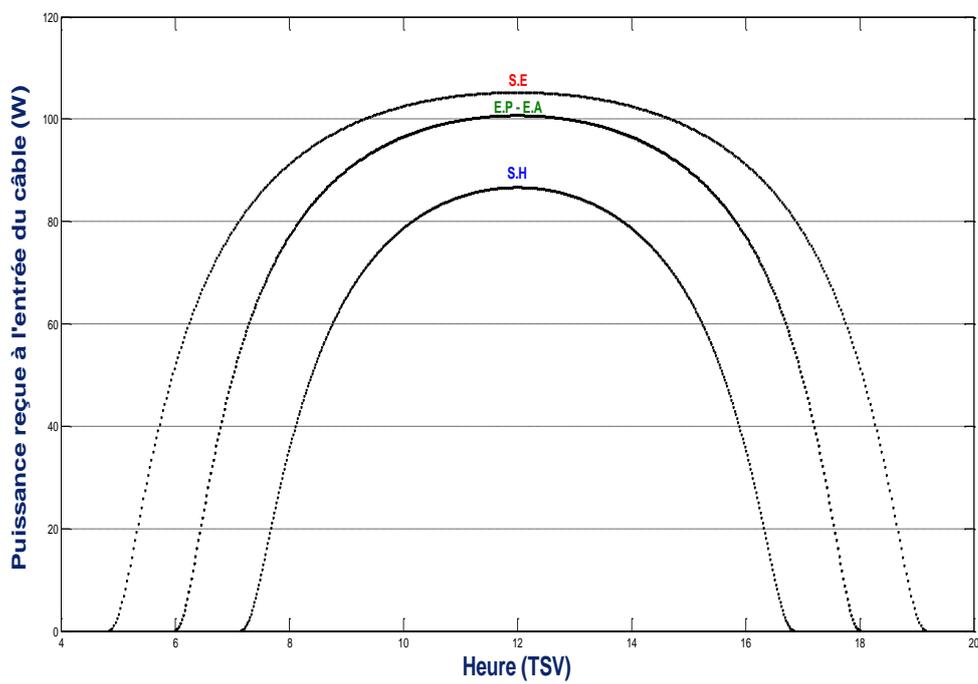


Figure V.13 : Puissance maximale reçue à l'entrée du câble à fibres optiques (W) pour les solstices et les équinoxes

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

D'après ces figures, nous constatons que la puissance à l'entrée du câble à fibres optiques est de 100,77 W diminue jusqu'à 92,09 W pour une longueur de 3 m.

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

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

Nous effectuons maintenant une analyse exergetique du système basée sur l'idée du TESCVFO, car cette étude est très limitée dans la littérature solaire.

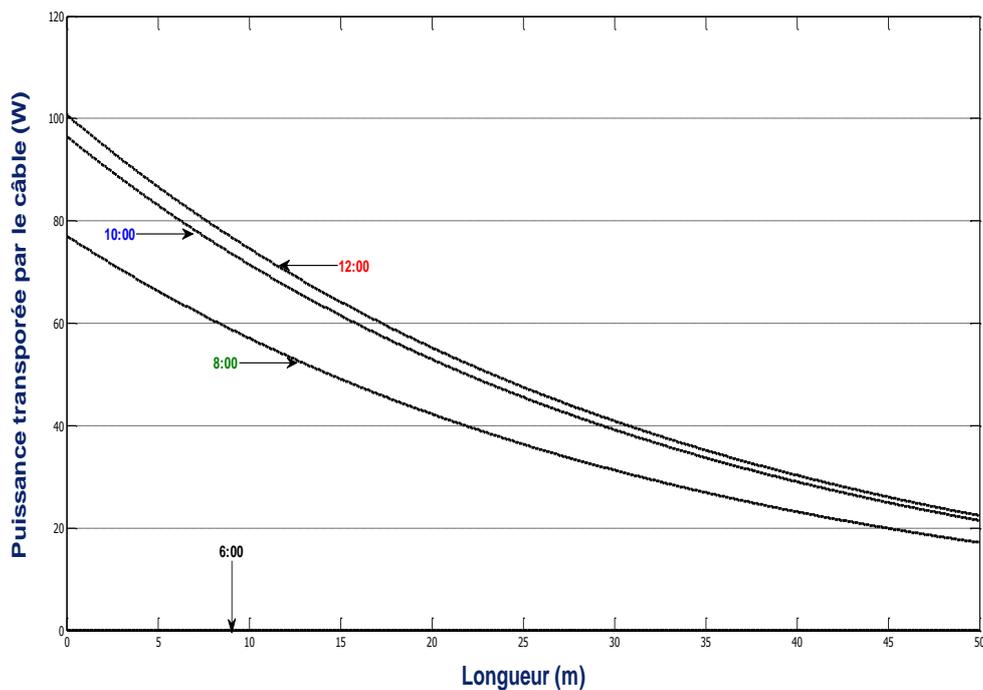


Figure V.14 : Variation de la puissance aux équinoxes, en fonction des différentes longueurs du câble à fibres optiques

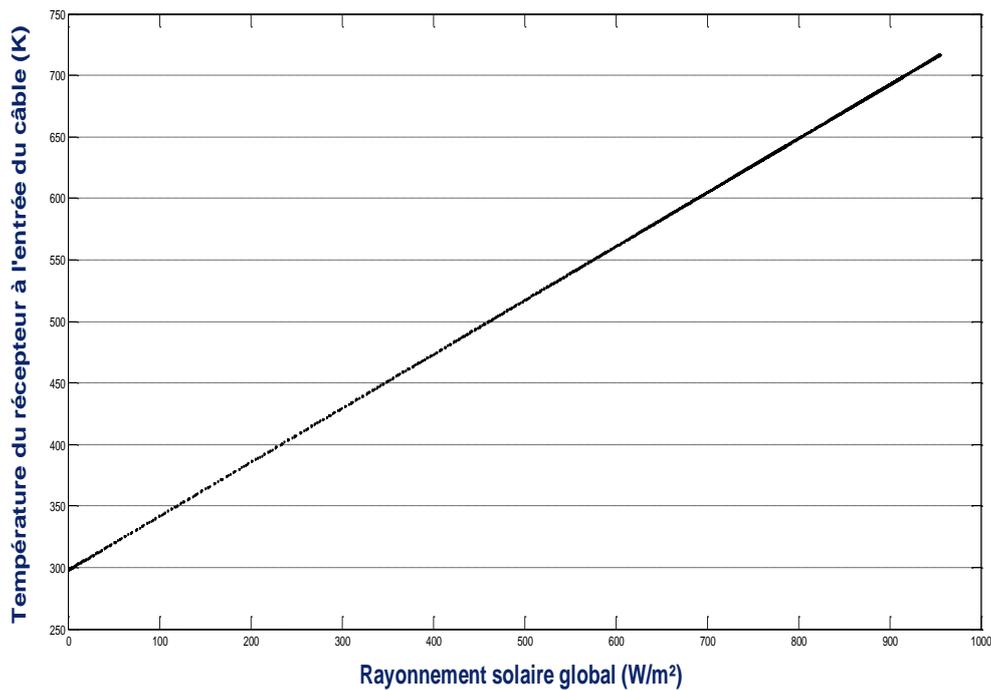


Figure V.15: Variation entre le rayonnement solaire global et la température du récepteur

La figure V.16 illustre la relation entre le rayonnement solaire global et le rendement exergetique du système. Nous remarquons une tendance parabolique entre eux.

Sur la figure V.17, nous présentons la variation instantanée du rendement exergetique du système du TES_{CvFO} pour les solstices et équinoxes. Ce rendement varie dans la journée du solstice hiver entre 2% et 26%, 4,7% et 27% pour les équinoxes printemps et automne. De même, le rendement exergetique est compris entre 5% et 28,5% pour le solstice été. .

Le 21 Mars (équinoxe printemps), à 12 TSV, le rayonnement global reçu est de 1034 W/m², le rayonnement direct est estimé à 914 W/m², 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). Le rendement énergétique et exergetique de tout le système sont limités à 0,32 et 0,27, respectivement.

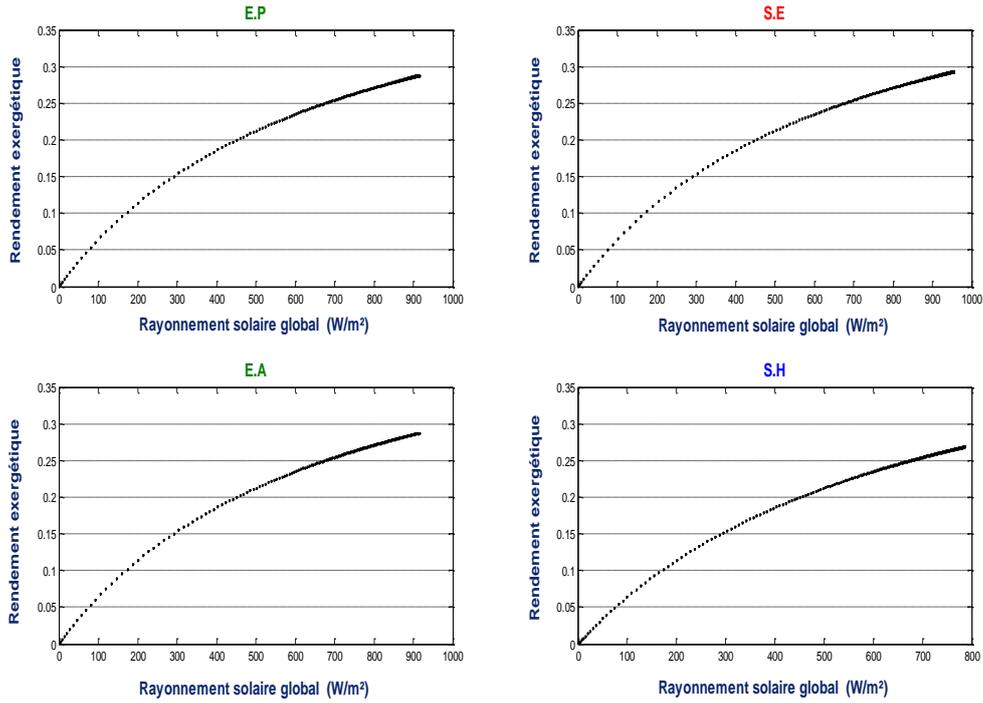


Figure V.16 : Variation entre le rayonnement solaire global et le rendement exergetique du système pour les solstices et équinoxes

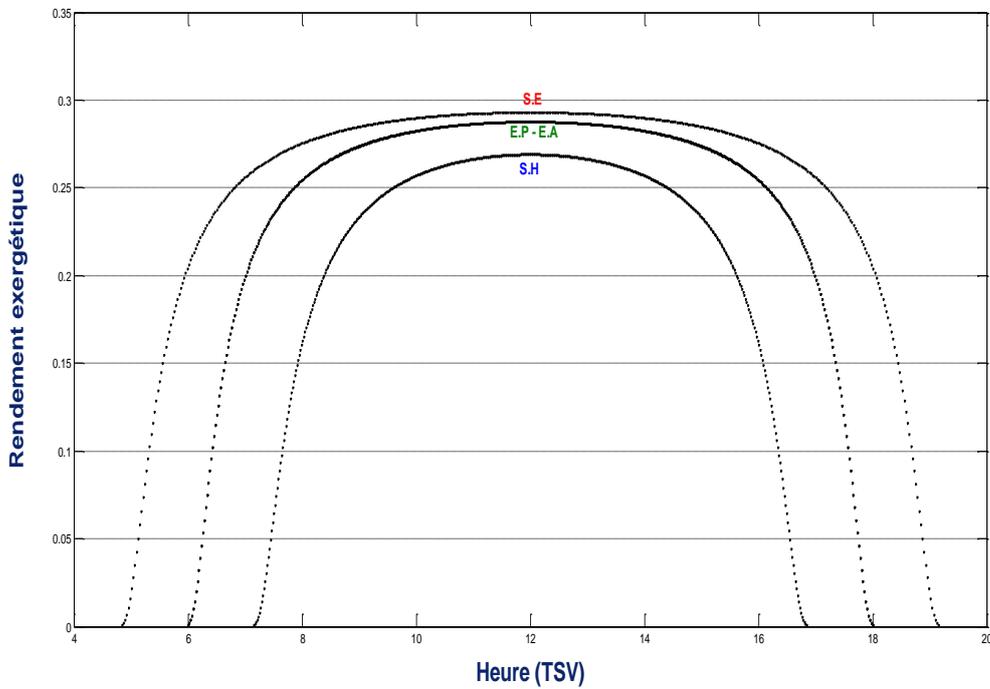


Figure V.17 : Variation du rendement exergetique quotidien du système TESCVFO pour les solstices and équinoxes

L'utilisation du filtre optique pour la protection des 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 thermique avec une bonne stabilité en haute température, elle peut aller jusqu'à 450°C pendant des longues périodes (jusqu'à 10 h). La 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.

V.4.2. Modèle d'un système du transport d'énergie solaire concentrée par une fibre optique

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 SiO_2 , son diamètre est de 5 mm et sa longueur est de 3 m. L'ouverture est estimée à 12° et son atténuation est de 250 dB/km.

De même, la figure V.18 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.

La figure V.19 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.

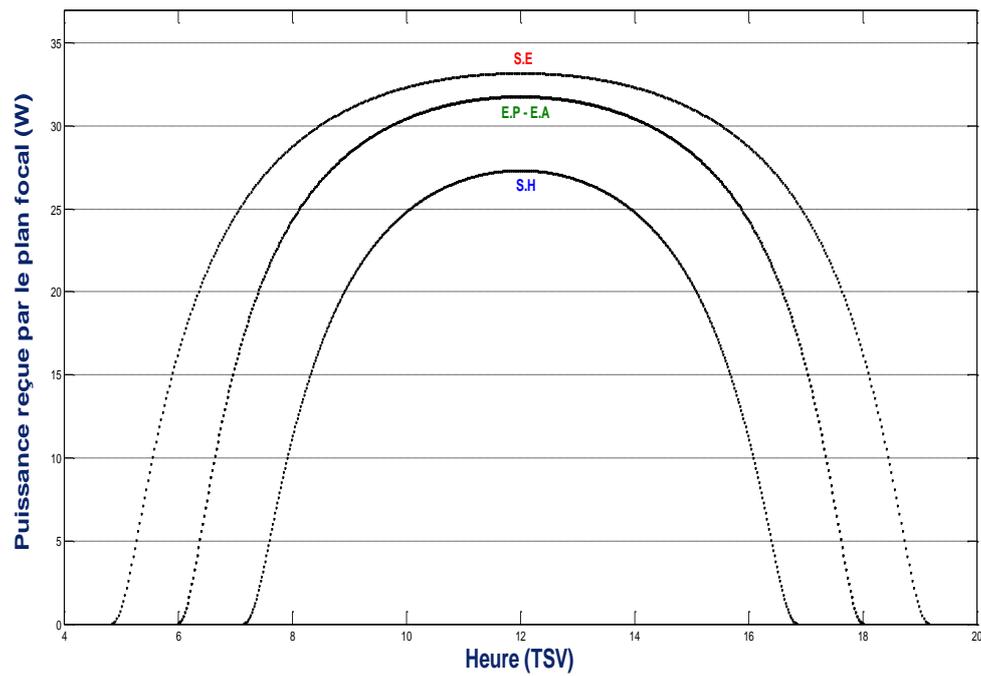


Figure V.18 : Puissance reçue par le plan focal du miroir parabolique pour les solstices et équinoxes

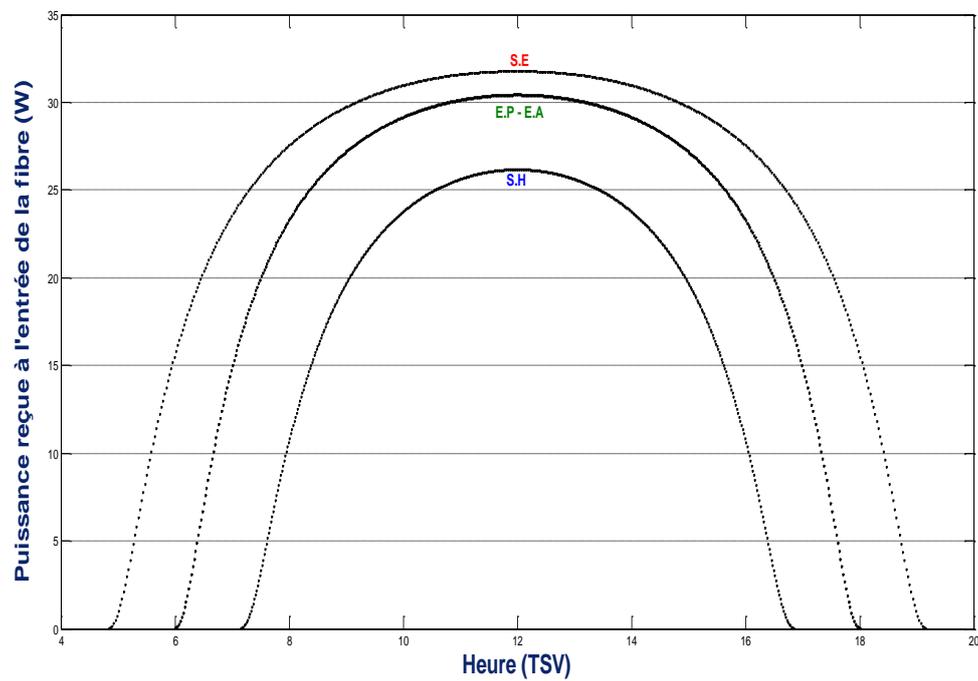


Figure V.19 : Puissance maximale reçue à l'entrée de la fibre optique (W) pour les solstices et les équinoxes

L'énergie solaire concentrée est exposée à un certain nombre de pertes avant de pénétrer dans 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 V.20. 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 V.20, 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.

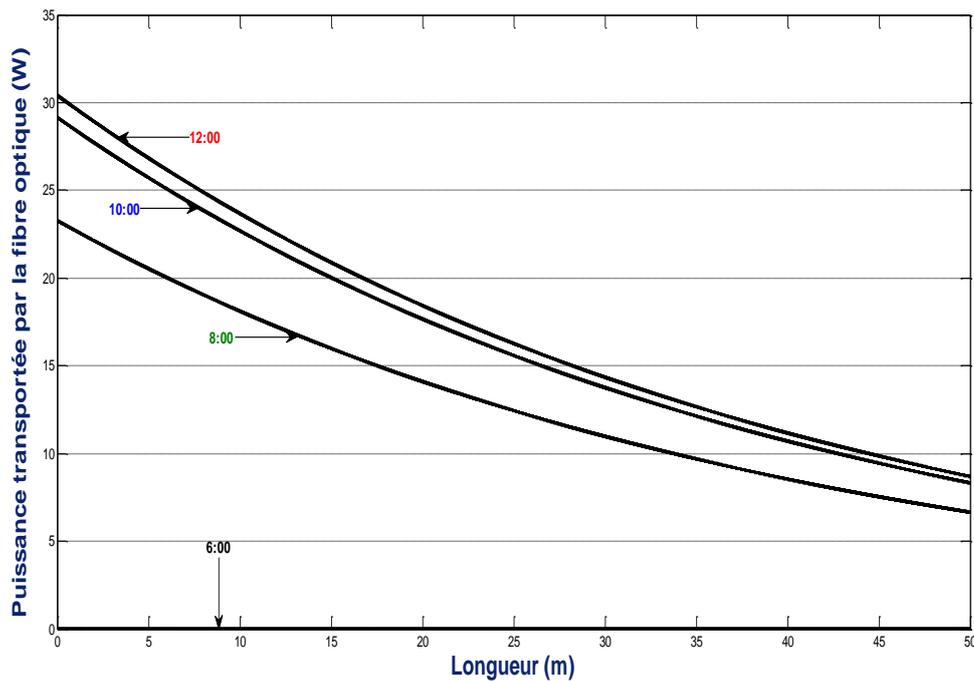


Figure V.20 : Variation de la puissance aux équinoxes, en fonction des différentes longueurs de la fibre

	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 V.8 : Variation horaire de la puissance de sortie de la fibre optique pour $L = 0\text{ m}$ et $L = 3\text{ m}$

Concernant la courbe représentative de la variation du rayonnement solaire global et la température du récepteur donnée sur la figure V.21, nous remarquons que cette température augmente avec l'augmentation de la valeur du rayonnement solaire global.

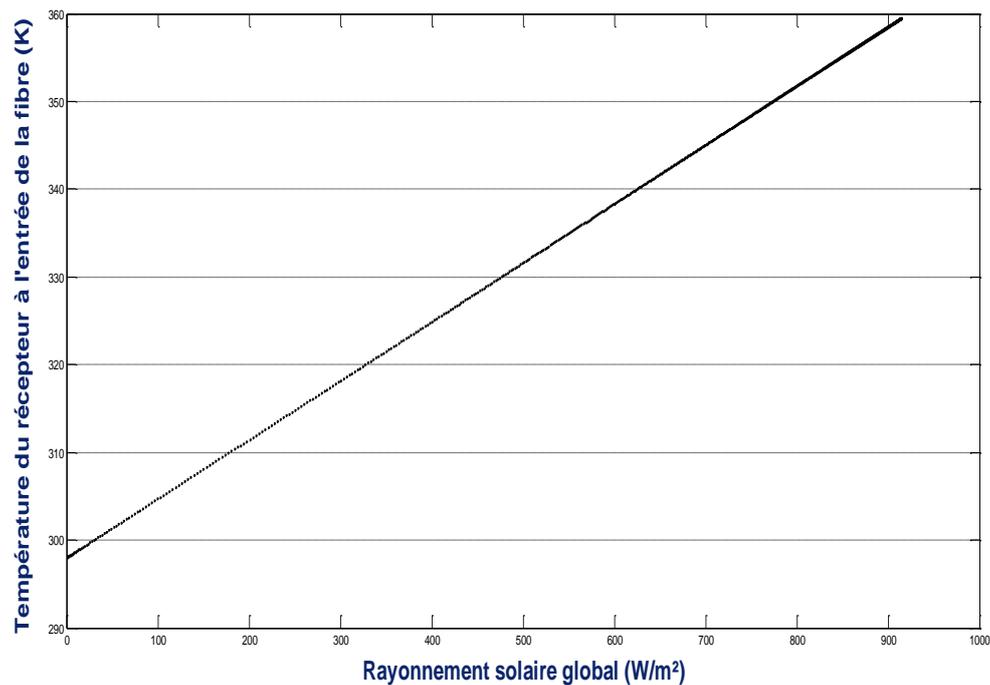


Figure V.21 : *Variation entre le rayonnement solaire global et la température du récepteur*

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^2 , le rayonnement direct est estimé à 914 W/m^2 , 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 $359,5 \text{ K}$ ($86,35^\circ\text{C}$).

La figure V.22 montre la variation du rendement exergetique du système TESCVFO.

Nous remarquons une tendance linéaire entre eux.

Comme sur la figure V.23, nous présentons la variation instantanée du rendement exergetique du système pour les solstices et équinoxes. Ce rendement varie dans la journée du solstice hiver entre 2% et 26% , 4% et 30% pour les équinoxes printemps et automne. De même, le rendement exergetique est compris entre $4,5\%$ et 31% pour le solstice été.

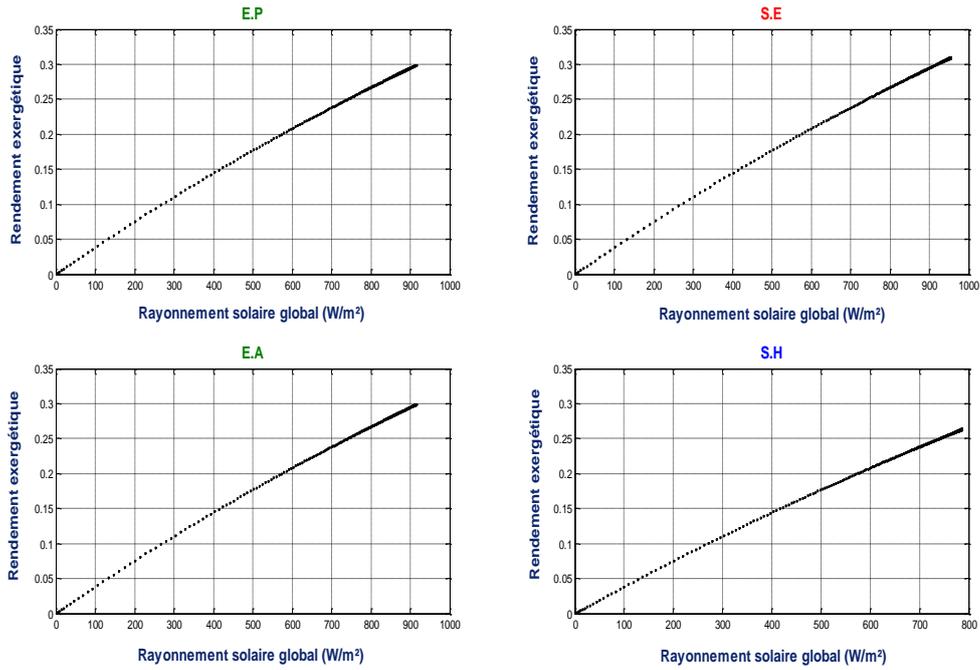


Figure V.22 : Variation entre le rayonnement solaire global et le rendement exergetique du système pour les solstices et équinoxes

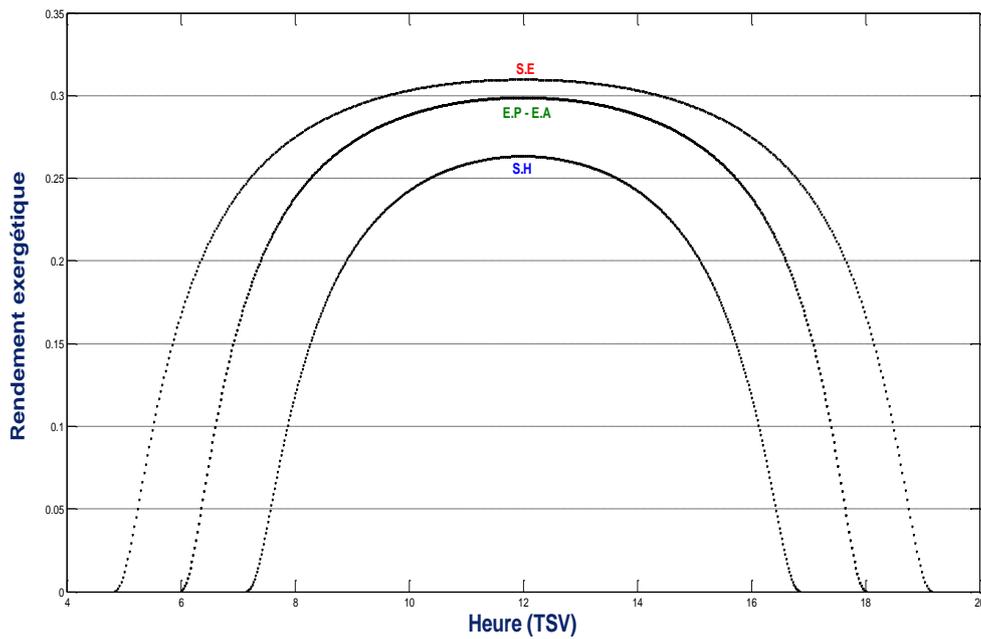


Figure V.23 : Variation du rendement exergetique quotidien du système TESCvFO pour les solstices et équinoxes

La température d'équilibre du récepteur au point focal à l'entrée de la fibre optique est de 359,5 K (86,35°C). Avec cette température nous pouvons affirmer la fiabilité de ce modèle.

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

V.4.3. Limites thermiques du four solaire alimenté par fibres optiques

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.

On rappelle que le prototype proposé 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 la 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 est réalisée à partir d'un ballon de verre de 20 cm de diamètre qui peut être scié suivant un grand cercle (Voir figure IV.5). L'un des deux hémisphères est fixé 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 qui limite les échanges par conduction avec l'enceinte.

Nous présentons les résultats de la variation de la température du récepteur du four solaire en fonction de sa surface (Voir figure V.24).

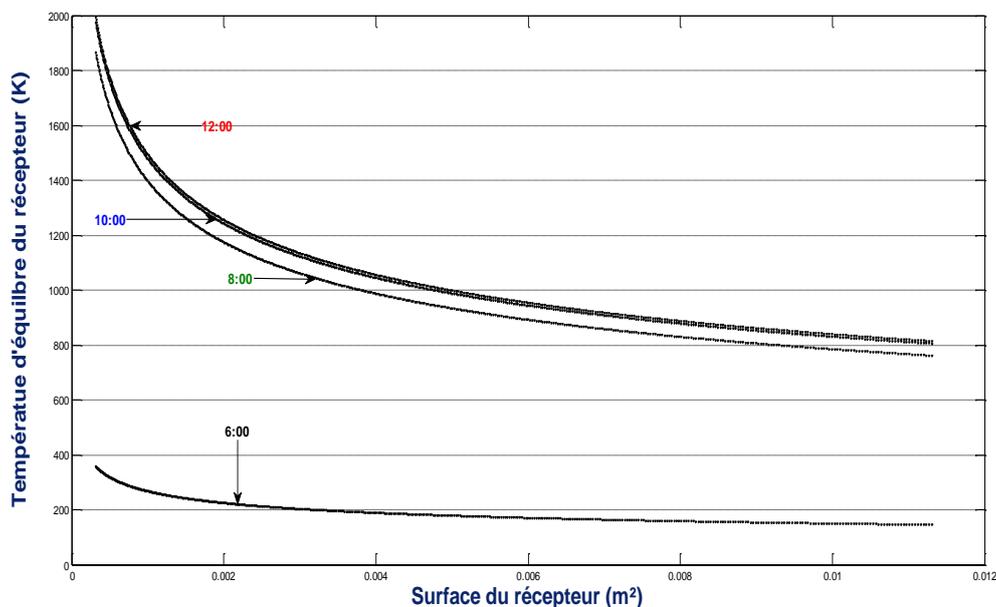


Figure V.24 : Variation de la température du récepteur du four solaire en fonction de sa surface

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 $0,002 \text{ m}^2$ et $0,01 \text{ m}^2$. 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 $0,003 \text{ m}^2$ (Voir figure V.24).

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

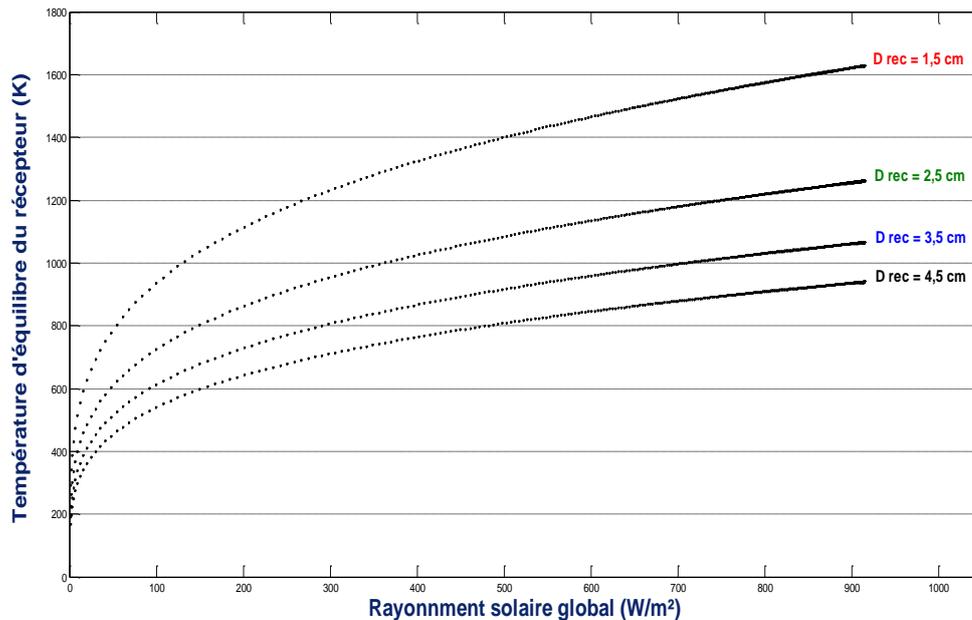


Figure V.25 : Variation de la température d'équilibre du récepteur du four solaire en fonction du rayonnement solaire global pour différents diamètres.

Le tableau V.9 suivant 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 figure V.25)..

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

Tableau V.9 : Variation de la température en fonction du diamètre du récepteur pour différents flux

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.

D'après les résultats présentés sur la figure V.26, 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.

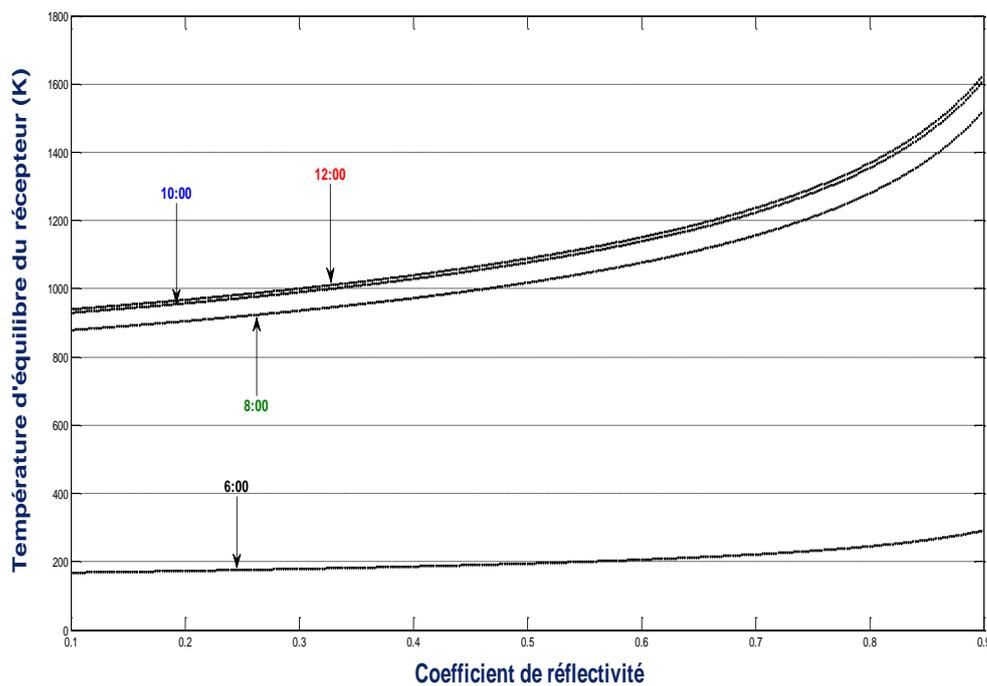


Figure V.26 : Variation de la température du récepteur du four solaire en fonction du coefficient de réflectivité de la paroi intérieure de l'enceinte.

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
6h (TSV)	169 K	174 K	180 K	187 K	196 K	207 K	222 K	246 K	293 K
8h (TSV)	880 K	906 K	937 K	974 K	1019 K	1078 K	1158 K	1282 K	1524 K
10h (TSV)	931 K	959 K	990,9 K	1030 K	1078 K	1140 K	1225 K	1356 K	1612 K
12h (TSV)	941 K	969 K	1002 K	1041 K	1090 K	1152°K	1238 K	1370 K	1629°K

Tableau V.10 : 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.

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 revient d'un corps noir comparé au prix d'une surface sélective, en gardant toujours le bon rendement du système.

V.5. Conclusion

Le dimensionnement optimal est basé sur le nombre de jour les plus défavorables égal au degré d'autonomie du système qui est défini par les données météorologiques d'ensoleillement d'un site.

Afin de maîtriser le potentiel énergétique solaire et 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 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 ; 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

- [BENY 99] Benyarou F., « Générateur Photovoltaïque A Réfraction Interne », Rev. Eng. Ren. Vol.1, (1999), pp. 65-70.
- [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.
- [BENY 04] Benyarou F., Bibi-Triki N., Zerga A., Benyoucef B., « Conversion Des Energies, Cours EN01 ». Université de TLEMCEM. 2004.
- [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).
- [KAND 09] Kandilli C., Ulgen K., « Review And Modelling The Systems Of Transmission Concentrated Solar Energy Via Optical Fibres », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, (2009), pp. 67-84.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Les résultats de cette recherche constituent une contribution importante pour l'enrichissement des connaissances et des travaux de recherche sur les systèmes photothermiques, et plus particulièrement ceux qui sont constitués par des éléments de haute performance et de meilleure qualité.

Le prix de la production industrielle photothermique reste une question majeure. Afin de réduire le coût de production, il est impératif de trouver un équilibre entre une technologie efficace et un prix raisonnable, tout en contrôlant l'impact environnemental du procédé de fabrication. Vu l'importance et la fiabilité de ces systèmes nous optons pour un système photothermique dénommé « four solaire alimenté par fibres optiques ». Ce travail fait l'objet d'une mise au point d'un procédé technologique directement transférable à l'industrie.

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 traités dans les travaux retrouvés dans la littérature spécialisée et dans les travaux expérimentaux. 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 exergétique 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 thèse ont été validés et présentés pour analyser le cheminement du rayonnement solaire incident, concentré, transporté ensuite reconcentré vers un récepteur sphérique. 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, tension de vapeur d'eau, 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.
- La conception d'un système photothermique avantage le suivi du soleil à deux axes surtout pour les systèmes à concentration. Concernant le capteur photothermique plan, la simulation des énergies annuelles maximales pour le site de Tlemcen donne une inclinaison optimale obtenue pour une orientation face au Sud $\alpha = 0$, inclinée d'environ $\beta \approx \varphi - 5^\circ$, au lieu de $\beta \approx \varphi$ trouvée dans la littérature 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 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 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 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 les mieux adaptés.
- Le choix d'un corps noir pour la surface du récepteur d'un four solaire est plus intéressant qu'une surface sélective. La surface sélective est réservée aux capteurs photothermiques où la chaleur se transporte à l'aide d'un fluide caloporteur.

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 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 thèse 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.
- Afin de déduire le comportement thermique de l'énergie solaire, la suite de ce travail tend vers une analyse exergétique au niveau du récepteur du four solaire.
- Nous prévoyons aussi l'étude d'une conception d'un capteur photothermique à eau et à air alimenté par fibres optiques solaires.

Résumé

La modélisation, le dimensionnement et la simulation des systèmes photothermiques constituent des axes de recherche d'actualité dans de nombreux laboratoires à travers le monde.

Afin de maîtriser le potentiel énergétique solaire et 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.

En se basant sur l'idée de transporter l'énergie solaire concentrée par des conducteurs de lumière, notre étude a été spécialement désignée pour l'analyse et l'étude d'un nouveau système photothermique en vue d'une nouvelle conception d'un «**four solaire alimenté par fibres optiques**».

L'étude menée consiste en une maîtrise des systèmes photothermiques permettant de passer d'une énergie solaire disponible, abondante et gratuite vers une énergie thermique concurrentielle susceptible 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, Simulation, Dimensionnement, Energie Solaire, Système photothermique, Concentrateur Parabolique, Fibre Optique, Four Solaire,

Abstract

Actually, many laboratories throughout the world dedicate significant interests for modelling, dimensioning and simulating 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.

Based on the idea of transmitting of concentrated solar energy by the light conductors, our study was specifically designated for the analysis and study of a new photothermal system for a new design of «**solar furnace powered by optical fibers**».

The aim of this work is to control photothermal system and pass from a solar energy available, abundant and free towards a competitive thermal energy, leading to a considerable contribution and integration in the photothermal energy and then resolve problems in our society actually.

Key-words: Modelling, Simulating, dimensioning, Solar Energy, Photothermal System, Parabolic Concentrator, Optical Fiber, Solar Furnace.

ملخص

يتم حاليا دراسة نمذجة و أبعاد و تصميم النظم الفوطوحرارية في العديد من المختبرات من جميع أنحاء العالم، و هذا للسيطرة 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 واعدا جدا. إستنادا إلى فكرة نقل الطاقة الشمسية المركزة من قبل موصلات الضوء، قمنا بدراسة نظام فوطوحراري لتصميم «**فرن شمسي جديد مدعم بالألياف البصرية**».

الهدف من هذا العمل هو السيطرة 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، محاكاة، أبعاد، الطاقة الشمسية، نظام فوطوحراري، مكافئ مركز، ألياف بصرية، فرن شمسي.