

République Algérienne Démocratique Et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique



UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TLEMEN



FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE  
UNITE DE RECHERCHE MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES

**THESE**  
**Pour obtenir le Grade de**  
**DOCTEUR en Physique Energétique et Matériaux**  
**Par**  
**Mr Abdelmadjid KADDOUR**

**Thème :**

*Modélisation et simulation d'un concentrateur  
parabolique solaire à moteur Stirling en vue d'un  
rendement optimal*

**Soutenue en Janvier 2013 devant la commission d'examen :**

<b>Président de Jury</b>	<b>Pr Nasreddine CHABANE SARI</b>	Professeur (Université de Tlemcen)
<b>Directeur de thèse</b>	<b>Pr Boumédiène BENYOUCEF</b>	Professeur (Université de Tlemcen)
<b>Examineur</b>	<b>Pr Tayeb BENOUAZ</b>	Professeur (Université de Tlemcen)
<b>Examinatrice</b>	<b>Pr Abla CHAKER</b>	Professeur (Université de Constantine)
<b>Examineur</b>	<b>Pr Michel AILLERIE</b>	Professeur (Université de Metz-France)
<b>Examineur</b>	<b>Pr Patrice BOURSON</b>	Professeur (Université de Metz-France)

**Année Universitaire 2012/2013**

A ma mère, A mon père

# Remerciements

*Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.*

*Ce travail a été réalisé dans l'Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables, de la Faculté des Sciences de l'Université de Tlemcen.*

*Je suis très satisfait d'avoir travaillé avec Monsieur Pr BENYOUCEF Boumédiène, Directeur de cette unité de Recherche URMER, je lui suis honoré d'adresser mes remerciements les plus sincères, dont j'ai tiré un immense profit de son savoir, de ses conseils utiles de discussions fertiles. Je lui suis très reconnaissant.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur CHAABANE SARI Nasreddine, Professeur à la Faculté des Sciences, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse.*

*Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur MICHEL AILLERIE, Professeur à l'Université de Metz-FRANCE, d'avoir accepté d'examiner ce travail doctoral.*

*Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à Monsieur PATRICE BOURSON, Professeur à l'université de Metz-FRANCE, d'avoir accepté d'examiner ma thèse de Doctorat.*

*Ainsi, je passe mes salutations distinguées à Monsieur BENOUAZ Tayeb, Professeur à la Faculté des Sciences, d'avoir accepté d'examiner cette thèse de recherche.*

*Enfin, j'adresse mon profond respect à Madame CHAKER Alba, Professeur de l'université de Constantine, pour avoir bien voulu juger ce travail de recherche.*

# TABLE DES MATIERES

NOMENCLATURE.....	
INTRODUCTION GENERALE .....	1
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	6
CHAPITRE I : GISEMENT SOLAIRE.....	7
I. 1 Introduction.....	8
I.2 Repérage et mesures d'ensoleillement .....	8
I.3 Mesure sur une surface d'inclinaison quelconque.....	16
I.3.1 Mesure par ciel clair sur une surface horizontale .....	16
I.3.2 Expression du rayonnement direct reçu sur un plan quelconque.....	17
I.3.3 Composante diffuse pour une surface d'orientation quelconque.....	18
I.3.4 Fraction d'insolation $\sigma$ .....	19
I.4 Rayonnement direct .....	19
I.5 Rayonnement diffus.....	21
I.6 Rayonnement global .....	21
I.7 Irradiation en fonction de l'inclinaison et de l'orientation .....	22
I.8 Potentiel solaire en Algérie.....	22
I.9 Conclusion .....	25
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	26
CHAPITRE II : CONCENTRATION SOLAIRE.....	27
II. 1 INTRODUCTION.....	28
II.2 APERÇU DE LA TECHNOLOGIE .....	29
II.3 LES CONCENTRATEURS (CAPTEURS) CYLINDRO-PARABOLIQUES.....	31
II.4 CONCENTRATEURS PARABOLIQUES A MOTEUR STIRLING.....	31
II.4.1 Le concentrateur .....	33
II.4.2 Facteur d'interception .....	34
II.4.3 Le récepteur.....	36
II.5. Pertes de récepteur.....	37
II.6. Modèle du moteur Stirling.....	38

II.7. Régénérateur.....	43
II.8. Fluides de travail du moteur Stirling .....	44
II.9. Analyse idéale du moteur Stirling .....	47
II.10. Puissance nette du modèle Stine en fonction de l'insolation .....	48
II.11. Système de refroidissement .....	50
II.12. Conclusion.....	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	51
Chapitre III : MODELISATION DES TRANSFERTS RADIATIFS .....	54
III-1. Introduction.....	55
III.2Approche intégrale .....	55
III.3.Correspondance entre un algorithme et sa formulation intégrale .....	57
III.4 Algorithmes à variance nulle .....	63
III.5 Conclusion .....	66
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	67
CHAPITRE IV : LOGICIEL DE SIMULATION GREENIUS.....	68
VI.1. Introduction.....	69
VI.2. Installation .....	69
VI.3.Wizard.....	70
VI.4. Nouveau Projet .....	70
VI.5. Écran Principal.....	71
VI.6. Mise en œuvre d'algorithmes de Monte-Carlo .....	71
VI.7. Choix de La Technologie.....	72
VI.8. Emplacement .....	73
VI.9. Technologie des Systèmes solaires paraboliques à moteur Stirling .....	73
VI.10. Modèle d'équations .....	74
VI.11. Conclusion .....	77
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	78
CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	79
V-1. Introduction :.....	80

V.2. Données météorologiques : .....	80
V.3 Performances du concentrateur : .....	80
V.4 Analyse de caractéristiques de système parabolique Stirling (WGA 2-2 ) .....	84
V.5 Effet de coupure de la puissance matinale .....	84
V.6 Puissance des parasites .....	87
V.7 Causes des parasites .....	89
V.8 Conclusion .....	91
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	92
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....	94
CONCLUSION GENERALE .....	95
PERSPECTIVES .....	99
ANNEXES .....	100
ANNEXE A : Configurattion Beta du moteur Stirling .....	101
ANNEXE B : Configurattion Gamma du moteur Stirling .....	105

# **NOMENCLATURE**

# NOMENCLATURE

Paramètre	Nom	Unité
$\lambda$	Longitude	Degré (°)
$\varphi$	Latitude	Degré (°)
$\delta$	Déclinaison solaire	Degré (°)
$\omega$	Angle horaire (AH)	Degré (°)
TSV	Temps solaire vrai	Heures
TSL	Temps solaire local	Heures
TU	Temps universel	Heures
h	Hauteur angulaire	Degré (°)
D <sub>0</sub>	Durée astronomique	Heures
a	Azimut	Degré (°)
G	Rayonnement global	W/m <sup>2</sup>
I	Rayonnement direct	W/m <sup>2</sup>
D	Rayonnement diffus	W/m <sup>2</sup>
G <sub>h</sub>	Rayonnement global horizontal	W/m <sup>2</sup>
D <sub>h</sub>	Rayonnement diffus horizontal	W/m <sup>2</sup>
$\beta$	Angle d'incidence	Degré (°)
i	Vitrage d'inclinaison	Degré (°)
$\gamma$	Vitrage d'orientation	Degré (°)
$\alpha$	Coefficient d'albédo du sol	-
$\sigma$	Fraction d'insolation	-
S	Durée d'insolation mesurée	Heures
S <sub>0</sub>	Durée maximale d'insolation	Heures
z	Altitude	Km
I <sub>l</sub>	Rayonnement direct perpendiculaire	W/m <sup>2</sup>
I <sub>0</sub>	Constante solaire hors atmosphère	-
m	Epaisseur d'atmosphère traversée	Km
p <sub>m</sub>	Pression atmosphérique	mbar
I <sub>h</sub>	Irradiation direct ciel quelconque	MWh
T <sub>a</sub>	Température ambiante	K
H	Humidité relative	%
DNI	Insolation normale directe	W/m <sup>2</sup>
G	Quantité de radiation directe incidente sur le collecteur	W/m <sup>2</sup>
T <sub>m</sub>	Température moyenne du fluide dans le récepteur	K
$\theta$	Angle d'incidence du rayonnement sur le capteur	Degré (°)
U <sub>L</sub>	Coefficient d'échange entre le récepteur et l'ambiance	W/m <sup>2</sup> .K
R	Coefficient de réflexion de miroirs	-
$\tau.\alpha$	Facteur de transmittivité-absorptivité	-
C	Facteur de concentration	-
F'	Facteur d'efficacité du capteur	-
E <sub>cor</sub>	Irradiance corrigée	W/m <sup>2</sup>
DIR	Type de récepteur	
SAIC	Science Applications International Corp	
SBP	Schlaich-Bergermann und Partner	
SES	Stirling Energy Systems	
WGA	Wilkinson, Goldberg, and Associates, Inc	
MMC	Méthode de Monte - Carlo	

# Introduction Générale

## **INTRODUCTION GENERALE**

Dans le cadre de changement climatique où la limitation des gaz à effet de serre est essentielle, et devant la menace d'épuisement des combustibles fossiles, le défi présenté est de trouver des sources d'énergie innovantes pour répondre à une nécessité toujours plus pressante.

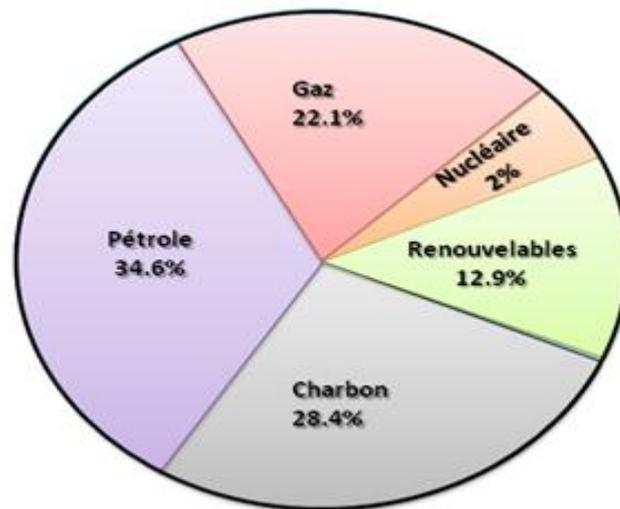


Figure 1 : Actions de sources d'énergie dans l'offre totale mondiale d'énergie primaire en 2008 [1]

Les énergies renouvelables peuvent être des solutions en raison de leur abondance. Une énergie renouvelable est une source d'énergie considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain. [2,3,4]

Les énergies renouvelables se présentent sous cinq formes :

- La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique pouvant devenir source d'énergie par

# *Introduction*

## *Générale*

---

combustion (ex : bois énergie), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques (agrocaburant). [5,6]

- L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie provenant du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur.
- La géothermie désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. [7]
- L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute, cours d'eau, courant marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.
- La ressource solaire pourrait permettre de répondre à une grande partie de la demande mondiale en électricité. Il existe trois filières :
  - Le solaire photovoltaïque demande l'utilisation exclusive de très grandes surfaces (contrairement à des éoliennes installées sur des surfaces agricoles). Le stockage par batterie étant très limité, cette technologie n'est envisageable qu'à petite échelle sur des surfaces comme les toitures, et des abris de parking qui ne sont pas valorisables autrement. [8]
  - Le solaire thermique sans concentration permet de fournir de l'eau chaude sanitaire. C'est une bonne alternative au chauffe-eau électrique. Mais ce n'est pas une solution très efficace à grande échelle pour le chauffage ou la production d'électricité.
  - La filière thermodynamique à concentration semble aujourd'hui être une alternative plausible pour répondre à la problématique mondiale de production d'énergie. Elle n'émet pas de gaz à effet de serre. Les technologies disponibles pour le stockage de chaleur peuvent permettre de garantir la production électrique en l'absence de soleil pendant certaines périodes. [9]

# ***Introduction***

## ***Générale***

---

Il existe différentes sortes d'installations pour couvrir toute la gamme des demandes (des sites isolés non reliés au réseau jusqu'aux centrales capables d'alimenter toute une ville). Comme il ne sera possible de construire des centrales de puissance unitaire supérieure à 100 MW électriques que dans les zones désertiques ou semi-désertiques, une grande part de la production sera effectuée par des installations de taille moyenne proche des lieux de consommations.

La chaleur ainsi produite peut être utilisée directement dans des procédés industriels endothermiques ou convertie notamment en électricité par des cycles thermodynamiques (turbines à gaz, à vapeur, à cycles combinés).

Les études ont montré que les problèmes abordés en concentration solaire comportent de très nombreux paramètres (physiques et géométriques) et que la détermination d'un jeu optimal de paramètres est très complexe. [10]

## **PROBLEMATIQUE**

Un système parabolique Stirling a enregistré un record mondial dans l'énergie solaire à efficacité élevée de conversion d'énergie électrique de 29,4% en 1984 (Andraka et al, 1996). Les systèmes cylindro-paraboliques ont dominé le marché de l'énergie solaire à concentration, mais les systèmes paraboliques Stirling sont prévus pour dépasser les réflecteurs cylindro-paraboliques par la production d'énergie à des taux plus économiques et des rendements élevés. Ces systèmes n'ont pas été étudiés aussi largement que les autres technologies solaires et ces études sont rarement organisées dans un rapport cohérent.

Des efforts de recherche et de développement sont menés entre autres sur les systèmes de concentrateurs paraboliques à moteur Stirling, cette problématique réside dans la principale motivation des travaux présentés dans cette thèse.

Nous choisissons d'utiliser la méthode de Monte-Carlo pour simuler les installations à concentration solaire. C'est une méthode de calcul statistique des transports corpusculaires, elle permet de simuler le transport de photons dans les géométries les plus complexes.

# *Introduction*

## *Générale*

---

Il s'agit de pouvoir simuler rapidement et précisément des installations réelles pour calculer les performances et les comparer aux résultats des expérimentations.

La thèse se compose en cinq chapitres.

Le premier chapitre porte sur le gisement solaire, tels que la présentation des paramètres essentiels utilisés dans le logiciel de simulation Greenius.

Dans le second chapitre nous présentons les technologies de la concentration solaire, en donnant un aperçu général sur les concentrateurs paraboliques, et en particulier sur le fonctionnement de concentrateur à moteur Stirling, objet de cette thèse.

Dans Le troisième chapitre, nous développons les bases théoriques de la méthode de Monte-Carlo, puis nous reprenons les derniers travaux sur ce thème en particulier concernant les techniques de réduction de la variance.

Au cours de quatrième chapitre nous exploitons le logiciel de simulation Greenius. Il permet de simuler le rayonnement solaire concentré dans des géométries complexes ainsi que la mise en œuvre de la Méthode de Monte Carlo dans celui-ci.

Dans le cinquième chapitre nous interprétons nos résultats de simulation telle que la puissance totale et la puissance nette, et le rendement de notre système.

Nous concluons ces travaux en synthétisant les résultats obtenus à la fois sur le plan théorique et sur le plan pratique. Dans les travaux en perspective, nous listerons quels pourront être les développements futurs et dans quelles mesures les travaux présentés dans cette thèse peuvent être utilisés en l'état.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] IEA (2010a). Energy Balances of Non-OECD Countries. International Energy Agency, Paris, France.
- [2] Andraka, Charles E., et al. "Solar Heat Pipe Testing of the Stirling Thermal Motors 4-120 Stirling Engine." IEEE. DE-AC04-94AL85000 (1996).
- [3] Kalogirou SA. Solar thermal collectors and applications. Prog Energy Combust Sci 2004; 30(3): 231-95.
- [4] Schawarzböl P, Buck R, Sugarmen C, Ring A, Jesus Marcos Crespo M, Altwegg P, et al. Solar gas turbine systems: design, cost and perspectives. Sol Energy 2006 ; 80(10) : 1231- 40.
- [5] Shinnar R, Citro F. Solar thermal energy: the forgotten energy source. Technol Soc 2007; 29(3): 261-70.
- [6] Klaisz H, Kohne R, Nitsch J, Sprengel U. Solar thermal power plants for solar countries technology, economics and market potential. Applied Energy 1995; 52(2-3) : 165-83.
- [7] Mancini TR, Kolb GJ, Chavez JM. Solar thermal power today and tomorrow. Mech Energy 1994; 116(8): 74-9.
- [8] Ravi Kumar K, Reddy KS. Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver. Applied Energy 2009; 86(9) : 1804-12.
- [9] Mancini T, Heller P, Butler B, Osborn B, Schiel W, Goldberg V, et al. Dish-stirling systems: an overview of development and status. J Solar Energy Eng 2003; 125(2): 135-51.
- [10] Karabulut H, Yücesu HS, Çinar C, Aksoy F. An experimental study on the development of  $\beta$ - type Stirling engine for low and moderate temperature heat sources. Applied Energy 2009; 86(1): 68-73.

# **Chapitre I : Gisement Solaire**

# Chapitre I : Gisement Solaire

## I.1. Introduction

L'irradiation solaire annuelle sur l'ensemble de la planète au niveau de la mer (754 million de TWh) représente plus de 5 000 fois l'énergie que nous consommons en 2004 (environ 139 000 TWh). Sur le long terme (environ 50 ans) le potentiel extractible des différentes sources d'énergie renouvelable pourrait en pratique couvrir la consommation mondiale actuelle : la photosynthèse au premier chef avec 6 Gtep (70 000 TWh), puis le vent avec 1,7 Gtep (20 000 TWh), la grande hydraulique 14 à 20 000 TWh, dont le potentiel théorique mondial est d'environ 40 000 TWh, le solaire installé sur les toits des bâtiments industriels, commerciaux, tertiaires et domestique 0.25 Gtep (2 900 TWh), et la géothermie des couches profondes 0.2 Gtep (2 300 TWh).

## I.2. Repérage et mesures d'ensoleillement

### I.2.1. Repérage du soleil dans le ciel

La hauteur du soleil est une donnée principale à cause de :

- ✓ Cette hauteur contribue clairement dans les calculs énergétiques.
- ✓ L'installation dans un site donné exige une étude des effets appuyés par l'environnement.

#### I.2.1.1. Longitude $\lambda$

Un point à la surface de la terre est localisé par deux coordonnées angulaires : la latitude  $\varphi$  et la longitude  $\lambda$ . C'est la mesure de l'angle entre le méridien du lieu et le méridien origine des longitudes (Greenwich en Angleterre). Les régions qui sont situées à l'Est sont comptées avec le signe +. Le grand arc de cercle qui joint le pôle Nord, Greenwich et le pôle Sud s'appelle méridien origine. Il y a 23 méridiens séparés de 15° donnant naissance aux 24 fuseaux horaires. [1]

On a décidé de fixer la ligne de modification de date sur le méridien n° 12 au beau milieu du Pacifique. Quand il est midi le jour J à Greenwich, il est minuit du même jour sur la bordure Ouest de la ligne de changement de date et minuit du jour J-1 sur bordure Est. Pour le comprendre, il suffit de montrer mentalement la projection cylindrique de la sphère terrestre. Par convection, bien que le méridien de Greenwich passe par Bordeaux, la France est avec l'Europe continentale dans le fuseau horaire 1.

# Chapitre I : Gisement Solaire

## I.2.1.2 Latitude $\varphi$

La latitude  $\varphi$  permet de localiser la distance angulaire d'un point arbitraire par rapport à l'équateur. Elle change de  $0^\circ$  à l'équateur à  $90^\circ$  au pôle Nord. [2,3]

## I.2.1.3 Déclinaison solaire $\delta$

La déclinaison solaire  $\delta$  est un angle formé de la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons. La figure I.1 en donne les valeurs notables.

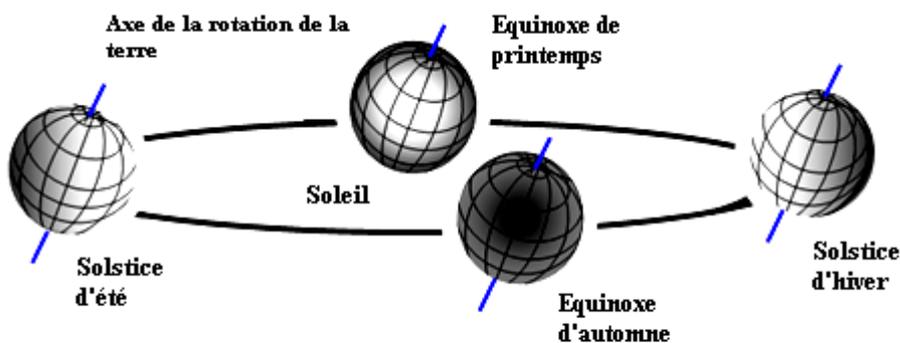


Figure I.1 : *Mouvement et rotation de la terre.* [4]

Equinoxe de printemps :	21 Mars	$\delta = 0$
Solstice d'été :	22 Juin	$\delta = +23^\circ 27'$
Equinoxe d'automne :	23 Septembre	$\delta = 0$
Solstice d'hiver:	22 Décembre	$\delta = -23^\circ 27'$
Approche maximale : Périhélie	2 Janvier	
Approche minimale : Aphélie	2 Juillet	

Entre ces 4 points remarquables,  $\delta$  prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par la relation (I-1):

$$\sin \delta = 0.4 \sin t \quad (I - 1)$$

où  $t = N \cdot \frac{360}{365}$  avec N : nombre de jours écoulés depuis l'équinoxe de printemps.

Ou par la relation (I-2) : [1]

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left( 360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (I - 2)$$

Avec n nombre de jours écoulés depuis le 1<sup>er</sup> Janvier.

# Chapitre I : Gisement

## Solaire

La déclinaison étant une fonction sinusoïdale, elle varie brusquement à proximité des équinoxes ( $0.4^\circ$  / jour) alors qu'elle est presque stationnaire pendant les périodes qui entourent les solstices d'été et d'hiver. [5]

### I.2.1.4 Angle horaire $\omega$ (ou AH)

L'angle horaire  $\omega$  (encore noté AH du soleil est calculé par la rotation journalière de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu exprimé en  $^\circ$  d'angle,  $\omega = 15(\text{TSV}-12)$  où TSV est le temps solaire vrai exprimé en heures. [6]

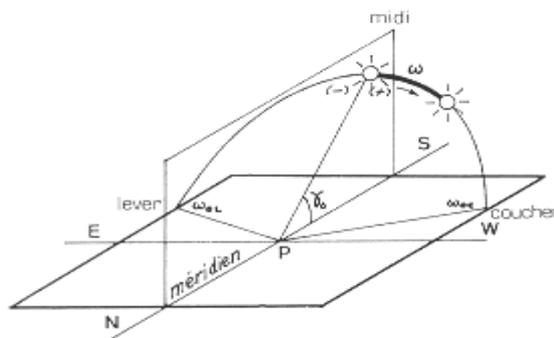


Figure I.2 : angle horaire  $\omega$  du soleil [7]

A chaque heure qui s'écoule correspond un accroissement de l'angle horaire de  $15^\circ$ , soit encore 4 mn de temps par  $^\circ$  de longitude (soit 24 mn de différence entre Chambéry et Bordeaux). A la latitude de  $45^\circ$ , une minute de temps représente environ 20 km, 11 km au cercle polaire et 28 km à l'équateur.

AH =  $90^\circ$  à 18 h (temps solaire vrai).

### I.2.1.5 Les cinq temps

#### I.2.1.5.1 Temps universel

Le temps universel (TU) est défini par l'heure de passage du soleil au méridien origine. En France métropolitaine, les longitudes sont comprises entre  $-5^\circ$  (Quessant) et  $+8^\circ$  (Strasbourg), entraînant des écarts de -20 mn à +32 mn entre le temps solaire local (TSL) et le temps universel (TU).

#### I.2.1.5.2 Temps solaire local

La différence entre temps solaire local et temps universel est appelée correction de longitude. En France métropolitaine, les longitudes sont comprises entre  $-5^\circ$  (Quessant) et  $+8^\circ$  (Strasbourg), entraînant des écarts de -20 mn à +32 mn entre le temps solaire local (TSL) et le temps universel (TU).

# Chapitre I : Gisement Solaire

La correction de longitude est donnée par la formule :  $TSL = TU + \frac{\lambda}{15}$

## I.2.1.5.3 Equation du temps

Jusqu'en 1964, la mesure du temps était basée sur la rotation de la terre : le jour était défini comme l'intervalle de temps entre deux passages du soleil par le même méridien. Toutefois, les jours solaires ne sont pas égaux, car l'angle AH que fait le soleil avec le méridien du lieu ne correspond pas exactement au temps solaire local bien que la terre tourne régulièrement sur elle-même ; en effet, l'expérience montre que les passages du soleil dans le plan méridien d'un lieu donné ne se succèdent pas exactement 24 heures d'intervalle et le midi vrai peut atteindre une avance de 16 minutes ou un retard de 14 minutes par rapport 12 heures, selon l'époque de l'année.

Deux facteurs interviennent dans cette variation :

- De l'excentricité de l'ellipse qui décrit la course de la terre autour du soleil, il résulte, d'après la loi de Kepler (loi des aires) que la vitesse orbitale au périhélie (Décembre) est plus grande qu'à l'aphélie (Juin). La terre a donc une variation saisonnière de sa vitesse orbitale qui affecte l'heure de passage du soleil au méridien.
- D'autre part, l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport au plan de l'écliptique introduit une oscillation supplémentaire de la durée du jour solaire, un jour de Novembre étant plus long d'une demi-minute qu'un jour de Mars.

Cet écart  $\Delta t$  entre temps solaire local (TSL) et temps solaire vrai (TSV) est désigné sous le terme d'équation du temps.

En plus, le mouvement de la terre consommant de l'énergie au perte de son énergie cinétique, celle-ci diminue, et des mesures précises ont constaté qu'entre 1900 et 1974, la terre a accumulé 44 secondes de retard dans sa rotation annuelle, ce qui signifie que la durée du jour moyen augmente de 1.6 s par an.

Nous reprenons l'expression proposée par Duffie et Beckman: [8]

$$E = 229,2. (0,000075 + 0,001868. \cos B - 0,032077. \sin B - 0,014615. \cos 2B - 0,0408. \sin 2B) \quad (I - 3)$$

$$\text{Avec } B = (n - 1) \frac{360}{365}$$

# Chapitre I : Gisement Solaire

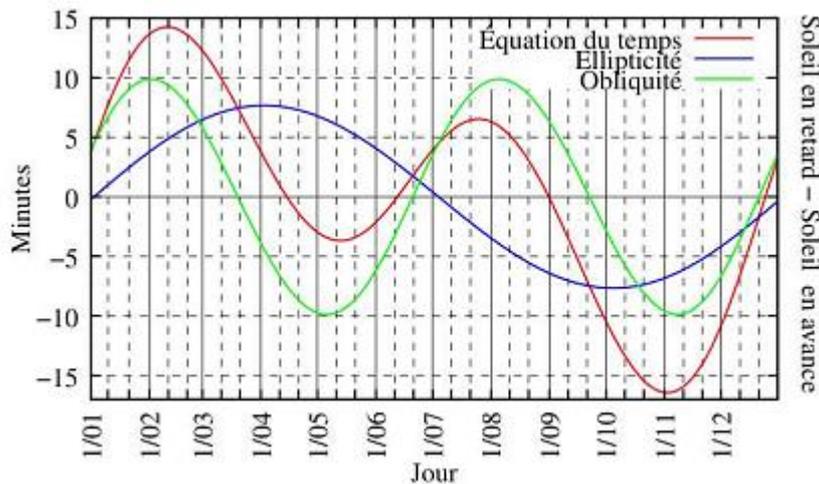


Figure I.3 : Graphe des variations annuelles de l'équation du temps

## I.2.1.5.4 Temps solaire vrai

C'est le temps solaire local corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil :

$$TS = TSL + \Delta t \quad (I - 4)$$

Pour un lieu de longitude  $\lambda$ , il existe une correspondance directe entre angle horaire AH, temps solaire vrai TSV, temps solaire local TSL et temps universel TU :

$$AH = 15 \cdot (TSV - 12) \quad TS = TSL + \Delta t \quad (I - 5)$$

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15} = 15 \cdot \left( TU + \frac{\lambda}{15} + \Delta t - 12 \right) \quad (I - 6)$$

## I.2.1.5.5 Heure légale

Pour des raisons évidentes de commodité, il est bon que les horloges d'un même pays indiquent la même heure. On définit ainsi le temps des horloges de façon arbitraire pour tout un territoire. Aux USA le territoire s'étend sur 4 fuseaux horaires ; il a fallu définir trois temps d'horloge : Eastern time, Central time et Western time ce qui fait que le décalage horaire entre Washington et Paris est de + 6 h, il est de + 8 h avec Denver et + 9 h avec Los Angeles.

Bien que Paris soit situé dans le même fuseau horaire que Greenwich, la France a avancé ses horloges d'une heure en 1940 pour s'aligner sur ses voisins continentaux (l'Angleterre et le Portugal restent alignés sur Greenwich).

# Chapitre I : Gisement Solaire

## II.2.1.6 Mouvement apparent

La figure I.4 donne l'aspect de la trajectoire solaire diurne en zone intertropicale, en zone tempérée et en zone polaire.

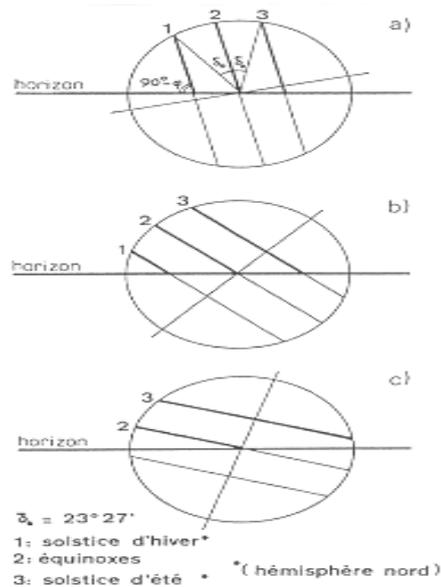


Figure I.4 : Trajectoire solaire diurne en zone intertropicale, en zone tempérée et en zone polaire

Nous remarquons en particulier :

- ❖ qu' au moment des équinoxes et pour toutes les latitudes le soleil se lève exactement à l'Est et se couche exactement à l'Ouest ;
- ❖ que dans la zone intertropicale, la culmination solaire peut s'effectuer soit au Nord soit au Sud, selon la saison. Ceci ne manquera pas de poser des questions quant à l'orientation des panneaux solaires dans cette zone.
- ❖ que dans les calottes polaires, le soleil peut rester sous l'horizon pendant plusieurs jours, et six mois plus tard rester visible pendant plus d'un jour.

## I.2.1.7 Hauteur angulaire

C'est l'angle  $h$  formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Il est donné par la relation :

$$\sinh = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \quad (I - 7)$$

# Chapitre I : Gisement

## Solaire

où l'on rappelle que  $\varphi, \delta, \omega$ , sont respectivement la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire. De la hauteur  $h$ , nous pouvons déduire les heures de lever et de coucher de soleil.

$$\text{Nous trouvons, en faisant } h = 0, \quad \cos \omega_0 = -\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (\text{I} - 8)$$

Et la durée astronomique du jour s'obtient tout aussi facilement en faisant :

$$D_0 = \frac{20}{15} \cdot \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta) \quad (\text{I} - 9)$$

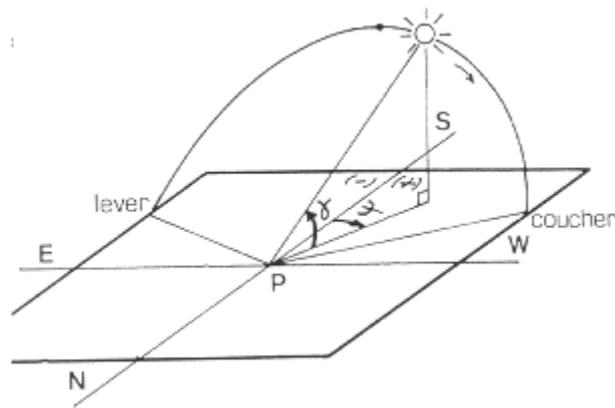


Figure I.5 : Hauteur angulaire ( $h = \gamma$ ) et azimut ( $a = \psi$ ) du soleil [9]

Nous vérifions au passage que l'heure du lever et du coucher du soleil n'est pas la même à Londres, Bordeaux et Oran, villes pourtant situées sur le même méridien.

### I.2.1.8 Azimut

C'est l'angle  $a$  compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil.

La connaissance de l'azimut est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. L'origine des azimuts correspond à la direction du Sud dans l'hémisphère Nord. L'angle d'azimut est compté positivement vers l'Ouest. L'azimut est relié à l'angle horaire, la hauteur et la déclinaison par la relation :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{I} - 10)$$

# Chapitre I : Gisement

## Solaire

et si nous souhaitons exprimer l'azimut indépendamment de la hauteur  $h$ , nous pouvons utiliser la formule :

$$tg(a) = \frac{\sin(\omega)}{\sin(\varphi) \cdot \cos(\omega) - \cos(\varphi) \cdot tg(\delta)} \quad (I - 11)$$

### I.2.1.9 Système de coordonnées équatoriales

La position du soleil en un lieu et en un temps donné peut être représentée par la figure I.6. Le mouvement du soleil sur la sphère céleste consiste à prendre comme centre de la sphère le lieu considéré : le plan équatorial devient l'horizontale du lieu et l'axe de la sphère est la verticale du lieu.

Dans le triangle sphérique Pôle-Soleil-Zénith (P-S- $S_m$ ), nous avons les relations :

✚ hauteur du soleil :  $\sin h = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega$

✚ la trace du soleil dans le plan horizontal étant donné par l'azimut  $a$  tel que :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (I - 12)$$

Où l'angle horaire  $\omega = AH$ .

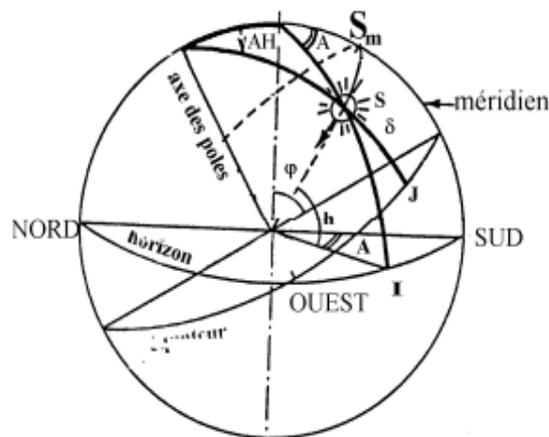


Figure I.6 : Repérage du soleil dans le ciel

### I.2.1.10 Abaque d'enseillement sur une latitude donnée

La projection stéréographique qui consiste à reporter la trajectoire du soleil sur la sphère céleste permet d'établir des diagrammes polaires du type de celui de la figure I.7. Ces abaques permettent de déterminer graphiquement la hauteur et l'azimut du soleil pour une latitude donnée à toute heure du jour et pour toute période de l'année.

# Chapitre I : Gisement Solaire

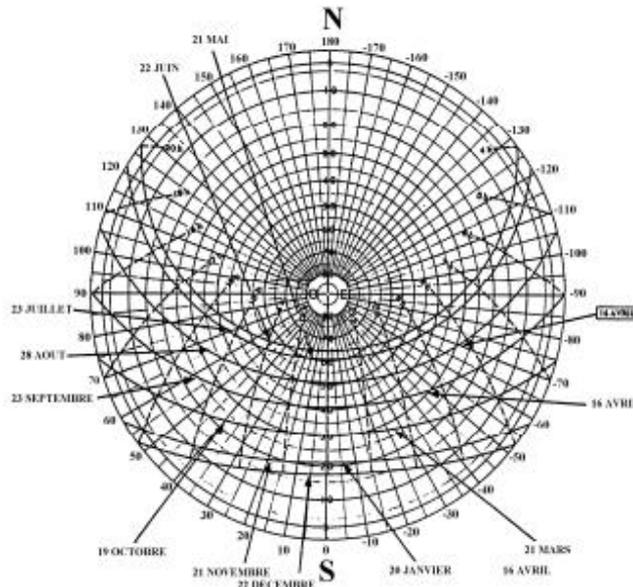


Figure I.7 : Diagramme polaire pour Paris 49 ° N

## I.3 Mesure sur une surface d'inclinaison quelconque

L'inclinaison  $i$  est l'angle du plan de l'objet étudié par rapport à l'horizontale. L'orientation  $\gamma$  est l'angle entre la normale au plan de l'objet étudié et le plan méridien du lieu (elle est comptée positivement vers l'Ouest par rapport au Sud dans l'hémisphère Nord).

### I.3.1 Mesure par ciel clair sur une surface horizontale

Le rayonnement global  $G$  reçu par une surface horizontale se décompose en deux termes :

- Le rayonnement direct  $I$  (éclairage corrigé des phénomènes atmosphériques)
- Le rayonnement diffus  $D$  en provenance de toute la voûte céleste.

Nous aurons donc sur un plan horizontal :

$$G_h = I \cdot \sin(h) + D_h = I_h + D_h \quad (I - 13)$$

Pour connaître  $D_h$ , nous faisons appel à la fraction d'insolation  $\sigma$  que représente le nombre d'heures de soleil mesurées par l'héliographe divisé par la durée théorique du jour.

Par ciel clair, nous pouvons en première approximation, utiliser la formule empirique :

$$D_h = G_h \cdot (0.9 - 0.8\sigma) \text{ valable pour } 0.15 < \sigma < 0.70 \quad (I - 14)$$

# Chapitre I : Gisement

## Solaire

### I.3.2 Expression du rayonnement direct reçu sur un plan quelconque

Si  $i$  est l'angle d'inclinaison de la normale du plan de mesure avec la verticale du lieu,  $h$  la hauteur du soleil,  $a$  l'azimut et  $\alpha$  l'angle d'incidence du rayon direct avec la normale au plan de mesure, nous aurons pour la composante directe  $I_i$  du rayonnement frappant le capteur :

- ✓ Soleil à midi (azimut nul) :  $a=0$ 
  - ❖ Pour un plan horizontal (Figure I.11.a) :  $i=0$  et  $I_i = I \cdot \sin(h)$
  - ❖ Pour un plan incliné sur l'horizontale, et orienté Sud (Figure I.11.b) :  
 $\alpha = 90^\circ - (h+i)$  et  $I_i = I \cdot \cos(\alpha) = I \cdot \sin(h+i)$
- ✓ Azimut quelconque :
  - ❖ Pour un plan vertical orienté Sud (Figure I.11.c) :  $90^\circ$  et  
 $I_i = I \cdot \cos(h) \cdot \cos(a)$
  - ❖ Pour un plan incliné sur l'horizontale et orienté Sud (Figure I.11.d) :  
 $I_i$  est la résultante de deux composantes projetées sur la normale au plan du capteur :
    - L'une perpendiculaire à l'horizon :  $I \cdot \sin(h)$ ,
    - L'autre dans le plan de l'horizon, pointant vers le Sud :  $I \cdot \cos(h) \cdot \cos(a)$

La somme des projections donne :

$$I_i = I(\sin(h) \cdot \cos(i) + \cos(h) \cdot \cos(a) \cdot \sin(i)) \quad (I - 15)$$

- ✓ Pour un plan vertical d'orientation quelconque dont la normale fait un angle  $\gamma$  avec le plan méridien (Figure I.11.e) :

$$i = 90^\circ \text{ et } I_i = I \cdot \cos(h) \cdot \cos(\gamma - a)$$

- ✓ Pour un plan d'inclinaison quelconque  $i$  et d'orientation quelconque  $\gamma$  (Figure I.11.f) :

$$I_i = I \cdot \cos(\beta) = I \cdot (\sin(h) \cdot \cos(i) + \cos(h) \cdot \cos(\gamma - a) \cdot \sin(i)) \quad (I - 16)$$

Ainsi, la formule la plus générale donnant l'angle d'incidence  $\beta$  du rayonnement solaire direct tombant sur un vitrage d'inclinaison  $i$  et d'orientation  $\gamma$  est :

$$\beta = \text{Arc cos}(\beta)(\sin(h) \cdot \cos(i) + \cos(h) \cdot \cos(\gamma - a) \cdot \sin(i)) \quad (I - 17)$$

# Chapitre I : Gisement Solaire

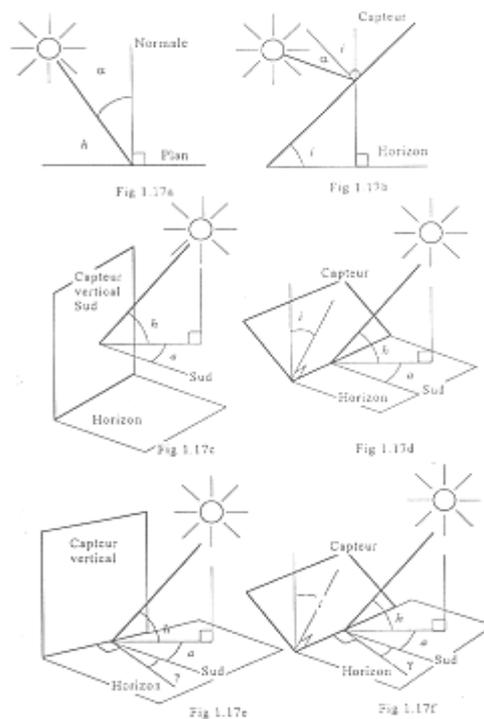


Figure I.8 : Expressions du rayonnement direct reçu sur un plan quelconque : a) repérage des angles par rapport à la normale au plan horizontal ; b) capteurs inclinés d'un angle  $i$  sur l'horizon ; c) plan vertical orienté Sud et azimut  $a$  quelconque ; d) Plan incliné sur l'horizontale et orienté Sud ; e) Plan vertical d'orientation quelconque ; f) Plan d'orientation et d'inclinaison quelconque. [11]

### I.3.3 Composante diffuse pour une surface d'orientation quelconque

Pour estimer l'apport solaire sur une surface d'orientation quelconque, il faut clairement séparer le calcul de la part du rayonnement diffus puisque seule intervient pour ce dernier l'inclinaison  $i$  de la surface qui permet de voir plus ou moins d'espace et plus ou moins d'albédo en provenance du sol. Par exemple, une surface verticale ne voit que la moitié de l'espace, mais l'albédo du sol peut devenir prépondérant.

$$D = \frac{1 + \cos(i)}{2} \cdot D_h + \frac{1 - \cos(i)}{2} \cdot \alpha \cdot G_h \quad (I - 18)$$

où  $\alpha$  est le coefficient d'albédo du sol.

Pour un plan vertical, en prenant  $\alpha = 0.2$ , nous aurons :  $D_v = 0.5(D_h + 0.2G_h)$

Dans des conditions moyennes de nébulosité, pour connaître  $D_h$ , nous faisons appel à la fraction d'insolation  $\sigma$  et en première approximation, la composante diffuse est donnée par la relation empirique :

$$D_h = G_h(1 - 0.25\sigma - 0.6\sqrt{\sigma}) \quad (I - 19)$$

# Chapitre I : Gisement Solaire

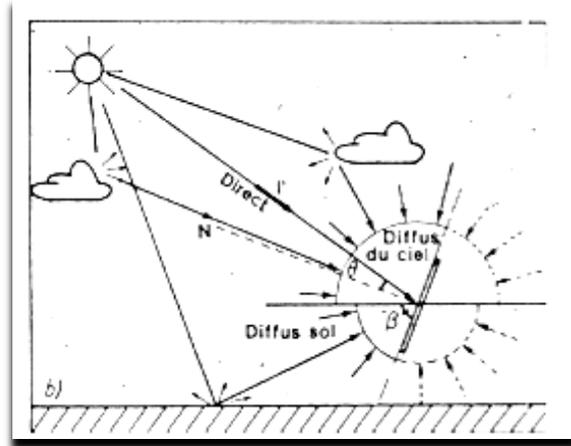


Figure I.9 : Composante diffuse en provenance du sol sur un capteur incliné d'un angle quelconque.

## I.3.4 Fraction d'insolation $\sigma$

C'est le paramètre représentatif des conditions de nébulosité et le rapport entre la surface du ciel couverte par les nuages et la surface totale du ciel au-dessus du territoire correspondant. Cette notion n'étant que descriptive, nous la relierons à la fraction d'insolation qui est une grandeur mesurable dès que nous connaissons les durées d'insolation enregistrées par l'héliographe et qui s'en déduit par le rapport :  $\sigma = S/S_0$  avec  $S$  = durée d'insolation mesurée et  $S_0$  durée maximale d'insolation.

Il est possible de relier le rayonnement global  $G$  sur une surface à la fraction d'insolation et au rayonnement diffus  $D$ . connaissant  $G$ , on peut donc calculer le rayonnement diffus  $D$ .

## I.4 Rayonnement direct

### I.4.1 Irradiance directe ciel clair (sans nuages)

L'irradiance (éclairage) directe dans un plan perpendiculaire au soleil est donnée en  $W/m^2$  par la formule de Kasten :

$$I_l = (I_0 - 31T_L) \exp(-mT_L / (0.9m + 9.4)) \quad (I - 20)$$

où  $I_0$  est la constante solaire hors atmosphère,

$$m = \frac{p_m}{1013} \cdot \frac{(0.88)^z}{\sin(h)}$$

Et  $T_L = 1.6 + 16\beta_a + 0.5 \cdot \ln t$

# Chapitre I : Gisement

## Solaire

Par l'épaisseur d'atmosphère traversée  $m$ , la formule tient compte de la pression atmosphérique en mbar de l'altitude  $z$  en km. Quant au trouble de Link, il dépend du coefficient de diffusion d'Angström et de la hauteur d'eau condensable.

- La composante du rayonnement direct sur une surface horizontale est alors, dans tous les cas :

$$I_{lh} = I_l \cdot \sin(h) \quad (I - 21)$$

- Et la composante directe dans un plan d'inclinaison quelconque  $i$  et d'orientation quelconque  $\gamma$  le soleil à une hauteur  $h$  et un azimut  $a$  :

$$I_{li} = I_l(\sin(h) \cdot \cos(i) + \cos(h) \cdot \cos(\gamma - a) \cdot \sin(i)) \quad (I - 22)$$

### I.4.2 Irradiation direct ciel quelconque

La dispersion des éclaircissements et les écarts entre valeurs mesurées et calculées ont très sensiblement réduits si l'on procède à une intégration sur des intervalles de temps de l'ordre de l'heure : nous obtenons alors des valeurs moyennes qui correspondent, avec une bonne précision, à celles déduites de relevés portant sur plusieurs journées identiques. Nous prenons alors, pour le calcul de la hauteur du soleil, l'heure correspondant au milieu de l'intervalle de temps considéré. On suppose que les éclaircissements calculés restent inchangés durant tout cet intervalle, ce qui fait que l'irradiation est égale à l'irradiance multipliée par une heure.

$$I_h = K \cdot I_{lh} \quad (I - 23)$$

$$K = \frac{\sigma}{(1 + c(1 - \sigma))} \quad (I - 24)$$

Le rapport  $K$  est donc une fonction de la fraction solaire  $\sigma$  et d'un paramètre de nuage  $c$  compris entre 0 et 2, à déterminer expérimentalement, en fonction du type de nuages et du régime des passages nuageux. L'étude statistique des variations de  $K$  en fonction de  $\sigma$  pour les intervalles horaires de chaque journée, montre que, en France Nord,  $c$  varie de 0.3 en hiver à 1 en été, et dans le Sud de 0.5 l'hiver à 1.2 l'été ; en l'absence de connaissance du climat du site, on prendra  $c = 1$  en toutes saisons.

# Chapitre I : Gisement Solaire

## I.5 Rayonnement diffus

### I.5.1 Ciel clair (sans nuages)

Pour calculer l'irradiance diffuse dans un plan horizontal, nous avons concocté la formule suivante :

$$D_{lh} = 380. \exp\left(-\frac{4}{T_L}\right) \cdot \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \cdot (\sin(h)) \cdot L^{(T+6)/30} \quad (I - 25)$$

### I.5.2 Ciel quelconque

Pour calculer l'irradiance diffuse horizontale par ciel quelconque dans le plan horizontal, la formule suivante a été proposée par Bedel :

$$D_h = I_h \cdot \frac{f(\sigma)}{(1 - f(\sigma))} \quad \text{avec} \quad f(\sigma) = 0.9 - \sigma(0.9 - (D_{lh}/G_{lh})) \quad (I - 26)$$

où  $\sigma$  représentant la fraction d'ensoleillement pour l'intervalle de temps horaire considéré.

## I.6 Rayonnement global

### I.6.1 Ciel clair (sans nuages)

Pour calculer l'irradiance globale dans un plan horizontal, nous avons concocté la formule suivante qui tient compte de l'altitude  $z$  (km), à partir de la formule proposée par une commission de l'Organisation Météorologique Mondiale :

$$G_{lh} = (1300 - 57 \cdot T_L) \cdot \exp\left(\frac{0.22z}{7.8}\right) \cdot (\sin(h)) \cdot L^{(T+36)/33} \quad (I - 27)$$

Cette relation doit vérifier à toute heure la condition :  $G_{lh} = I_{lh} + D_{lh}$

### I.6.2 Ciel quelconque

La formule générale dûe à Schuepp donne pour l'irradiation globale horizontale pour un ciel quelconque :

$$G_h = G_{lh} \cdot (a + (1 - a) \cdot (0.5 \cdot \sigma(\sigma + 1))) \cdot 0.5 \quad (I - 28)$$

où  $\sigma$  est la fraction solaire et  $a$  est un coefficient climatique compris entre 0 et 1, déduit des mesures :

# Chapitre I : Gisement Solaire

- En régions septentrionales, on prendra  $a = 0$ ,
- En régions tempérées,  $a = 0.10$ ,
- En régions intertropicales,  $a = 0.33$ ,
- En régions équatoriales,  $a = 0.5$ .

Cette relation doit bien sûr vérifier à toute heure la condition :  $G_h = I_h + D_h$

## I.7 Irradiation en fonction de l'inclinaison et de l'orientation

Compte tenu de la composante diffuse du rayonnement solaire relativement importante dans nos régions, le productible solaire annuel, rapporté à sa valeur maximale (orientation Sud, inclinaison  $35^\circ$ ) varie assez mollement avec l'orientation et avec l'inclinaison comme l'indique la figure I.10.

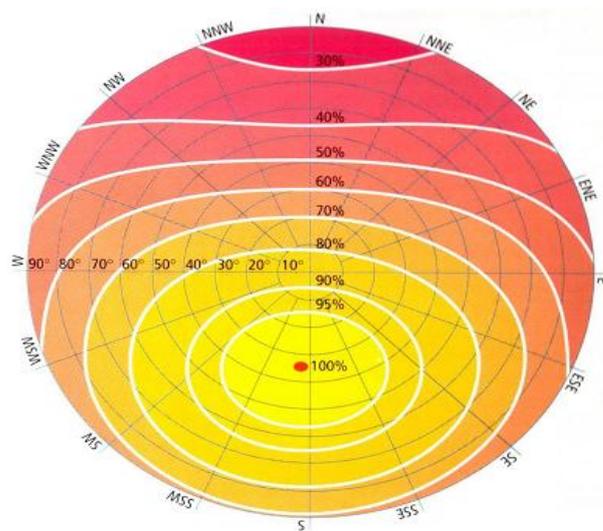


Figure I.10: Variation du productible en fonction de l'orientation et de l'inclinaison

## I.8 Potentiel solaire d'Algérie :

Par sa position privilégiée, l'Algérie dispose d'un grand solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara.

Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays.

# Chapitre I : Gisement Solaire

Tableau I.1 : Ensoleillement du territoire algérien [12]

Zones géographiques	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

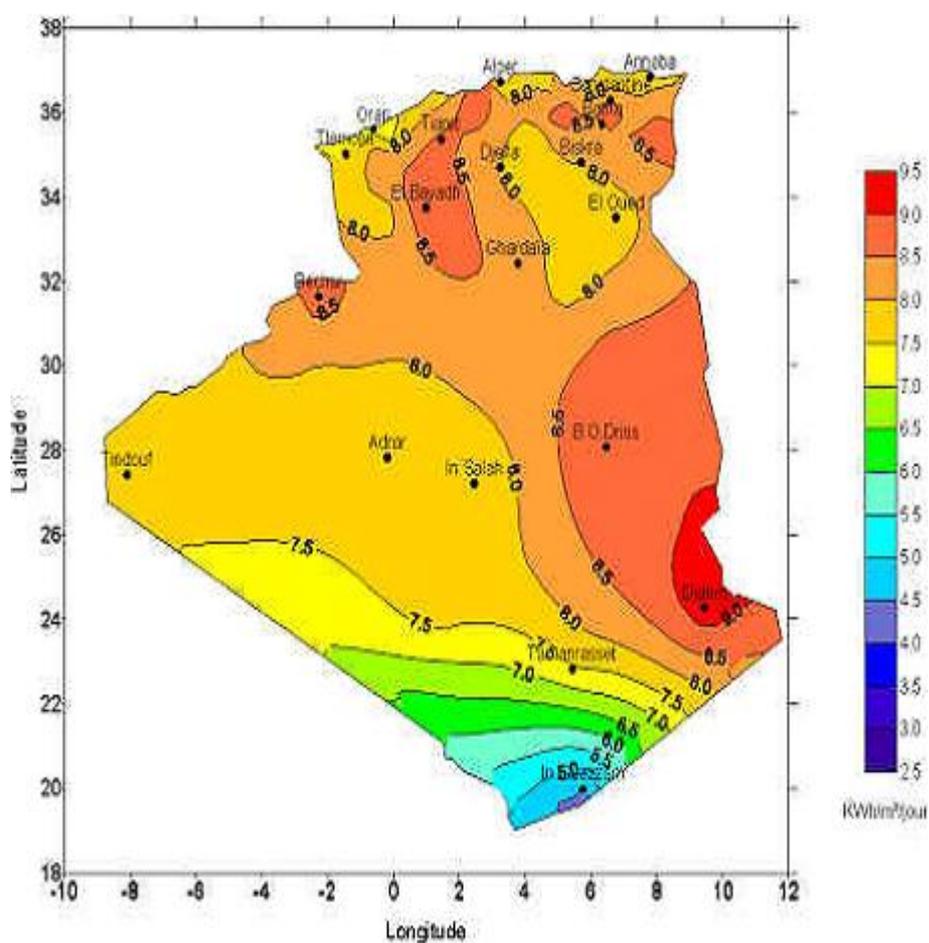


Figure I.11 :Irradiation directe journalière en Algérie (Juillet) [12]

Tlemcen est située au nord-ouest de l'Algérie, à 520 km au sud-ouest d'Alger, à 140 km au sud-ouest d'Oran et, frontalière du Maroc, à 76 km à l'est de la ville marocaine d'Oujda. Tlemcen, érigée dans l'arrière-pays, est distante de 40 km de la mer Méditerranée.

# Chapitre I : Gisement Solaire

Les coordonnées géographiques de la ville de Tlemcen sont :

**Tableau I.2 : Situation géographique de la ville de Tlemcen [12]**

Latitude	Longitude	Altitude
34.89°	-1.32°	800 m



Figure I.12 : Situation géographique de Tlemcen [12]

**Tableau I.3 : Données climatiques à Tlemcen [12]**

Mois	jan.	fév.	mar.	avr.	mai	juin	juil.	août.	sep.	oct.	nov.	déc.	année
Température minimale moyenne (°C)	5	7	8	10	12	16	19	20	18	13	10	7	12
Température moyenne (°C)	10	12	13	15	18	22	25	26	24	19	15	12	17
Température maximale moyenne (°C)	15	16	18	20	23	27	31	32	30	24	20	16	23

# *Chapitre I : Gisement Solaire*

## **I.9 Conclusion**

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de concentration solaire.

Le rayonnement reçu par un concentrateur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

L'utilisation efficace de l'énergie solaire nécessite une connaissance précise de l'énergie solaire, quantité d'énergie disponible à un endroit donné pendant une certaine période. Des données sont nécessaires sur les différents éléments de rayonnement solaire et leurs variations spatiales et temporelles.

Différentes applications de l'énergie solaire exigent des mesures et des données des différents éléments du rayonnement solaire. Les éléments suivants du rayonnement solaire sont les plus couramment utilisés dans les applications de l'énergie solaire.

Nous notons la moyenne mensuelle du rayonnement global journalier et sa variation tout au long de l'année. La moyenne mensuelle du rayonnement diffus et sa variation quotidienne tout au long de l'année. La moyenne mensuelle du rayonnement direct quotidien et ses variations tout au long de l'année. L'humidité, la température ambiante.

Ces données météorologiques seront tracées par notre logiciel de simulation Greenius, et elles seront utiles dans le chapitre des résultats des grandeurs suivantes : La puissance totale  $P_{gross}$ , la puissance nette  $P_{net}$  et le rendement de notre système) pour le site de Tlemcen.

Dans le prochain chapitre, nous donnerons un aperçu général sur les technologies de concentration solaire parabolique, nous intéressons sur celles à base de moteur Stirling.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Ricaud, A., *Gisement solaire et transferts énergétiques* Energies Renouvelables 2011, Université de CERGY-PONTOISE.
- [2] Bahraoui-Buret J, Bargach MN, Ben Kaddour ML, Leguere JR. Iereetima ´ tion du gisement solaire marocain a ` partir des mesures au sol, 1995.
- [3] Bahraoui-Buret J. Etude du Rayonnement solarire a Rabot A. Khtira revue internationale d’heliotechnique, 1984, p. 207–21.
- [4] Bahraoui-Buret J, Bargach MN, Ben Kaddour ML. Le gisement solarire Marocain, Centre de promotion des Energies Renouvelables, 1996.
- [5] Le rayennemetsolarire en Algerie. Office National de la Me ´te ´orologie Oran, 1986.
- [6] Lebedieva AN. Climatic Atlas of Africa, Part I Gidrometeoizdat, Leningrad, 1978.
- [7] Klein ASA. Solar Energy 1977;9:327.
- [8] Liu BT, Jordon RC. Solar Energy 1960;4:1.
- [9] Alnaser WE. Energy 1989;14(7):409–14.
- [10] The Saudi Arabian National Center for Science & Technology, Riyadh, Saudi Arabia, Saudi Arabian Solar Radiation Atlas, 1983.
- [11] Arab League Educational, Cultural and Scientific Organization, Science Department, Tunis, Tunisia, Solar Radiation Atlas for the Arab World, 1977.
- [12] Weatherbase, Tlemcen, Algeria [archive] sur [www.weatherbase.com](http://www.weatherbase.com). Consulté le 8 septembre 2011.

**Chapitre II : Concentration Solaire**

# ***Chapitre II : Concentration Solaire***

## **II. 1 INTRODUCTION**

L'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit une première fois l'homme à s'intéresser à des sources d'énergie renouvelables au premier rang desquelles l'énergie solaire. Les principales caractéristiques de l'énergie solaire ayant suscité l'intérêt qu'on lui a porté à l'époque étaient sa gratuité (nous y reviendrons), sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile.

Aussi le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique. Le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une croissance importante de la demande énergétique.

Comme alternative à ces préoccupations, le développement et l'implémentation des énergies renouvelables est incontournable. Des ressources énergétiques illimitées et abondamment disponibles existent et doivent être exploitées. Certaines, comme l'énergie éolienne ou hydraulique connaissent déjà un développement technique et commercial important et sont économiquement compétitives. [1]

D'autres, comme l'énergie solaire et thermoélectrique, sont techniquement disponibles, mais leur compétitivité nécessite une plus grande confiance de la part des entreprises privées et des institutions publiques afin de favoriser l'implémentation de ce type de systèmes et de favoriser une diminution des coûts par les économies d'échelle.

Deux filières possibles existent pour réaliser la conversion d'énergie solaire en électricité : le recours à des cellules photovoltaïques, ou la conversion thermodynamique. La première solution est assez chère, pour un rendement limité. En outre, la technologie de fabrication des cellules est délicate et reste l'apanage de grands groupes : elle peut difficilement être appropriée localement.

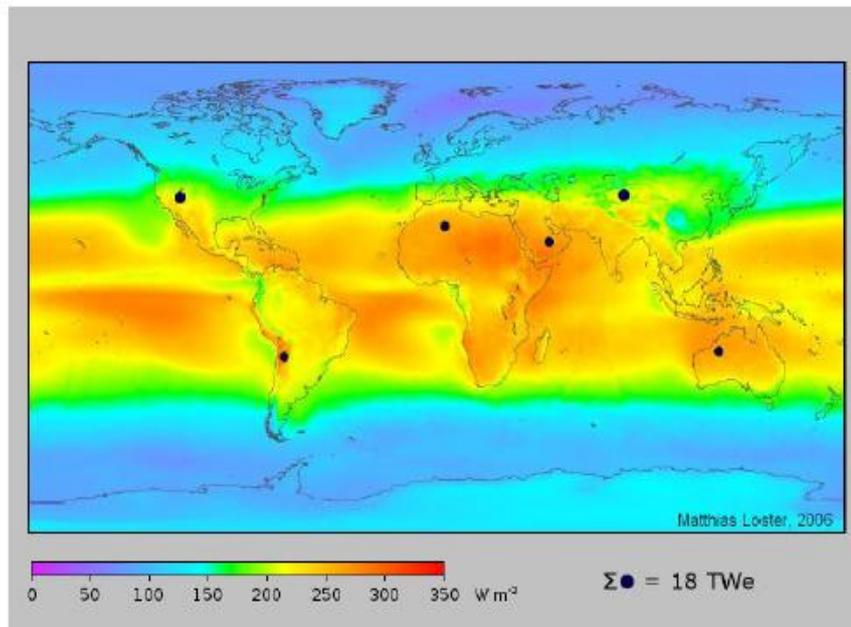
Nous constatons que l'énergie solaire, contrairement à une idée répandue, n'est pas tout à fait gratuite : son utilisation nécessite un investissement de départ souvent plus lourd que pour les sources d'énergie conventionnelles et nombre d'installations solaires sont aujourd'hui à l'arrêt faute d'avoir prévu un budget pour la maintenance des équipements.

## Chapitre II : Concentration Solaire

### II.2 APERÇU DE LA TECHNOLOGIE

Les centrales solaires utilisent des technologies relativement récentes, possédant un important potentiel de développement. Elles offrent une opportunité aux pays ensoleillés comparable à celle des fermes éoliennes pour les pays côtiers.

Les endroits les plus prometteurs pour l'implantation de ces technologies sont ceux du sud-ouest des États Unis, l'Amérique du Sud, une grande partie de l'Afrique, les pays méditerranéens et du Moyen Orient, les plaines désertiques d'Inde et du Pakistan, la Chine, l'Australie, etc. [2]



Dans beaucoup de régions du monde, un kilomètre carré de terrain suffirait à générer jusqu'à 120 Gwh d'électricité par an, grâce à la technologie des centrales solaire. Cette énergie est équivalente à la production annuelle d'une centrale classique de 50 MW.

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité.

Le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne, où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur. L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration.

## Chapitre II : Concentration Solaire

Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante.

La figure II.2 montre les 4 principaux systèmes de concentration. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels. [4]

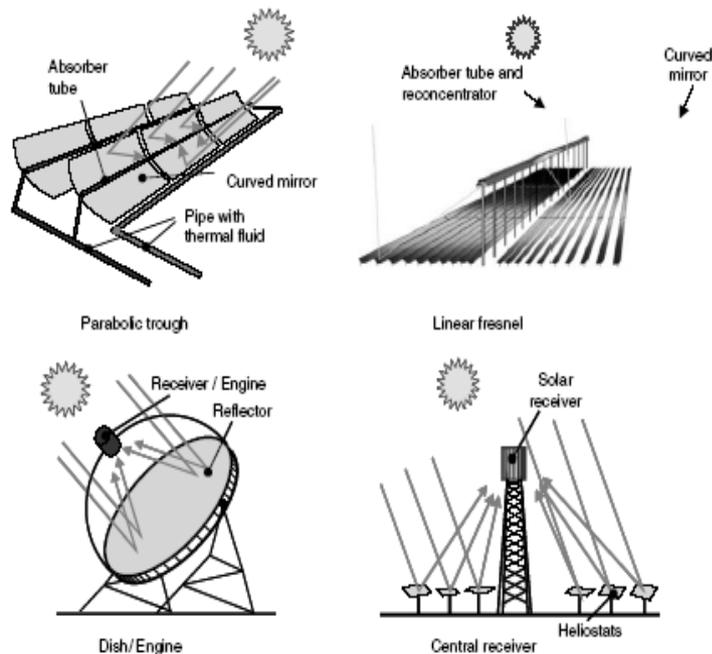


Figure II.2: Principales technologies de concentration solaire

Les systèmes de génération d'électricité sont divers : turbine à gaz, cycle de Rankine, Moteur Stirling, Cycle de Rankine organique sont les options généralement choisies.

La majorité des systèmes utilise des miroirs de verre pour réfléchir la radiation solaire. Des recherches sont en actuellement en cours avec comme objectif d'améliorer les propriétés physiques des matériaux réflecteurs, (réflectivité, résistance aux chocs, etc.)

Un aspect très important des systèmes à concentration et que seule la radiation directe peut être mise à profit, la radiation diffuse ne pouvant pas être focalisée par le concentrateur.

La centrale solaire ne peut donc fonctionner que si le ciel est dégagé et que la radiation directe n'est pas diffusée par la couverture nuageuse.

# Chapitre II : Concentration Solaire

## II.3 CONCENTRATEURS (CAPTEURS) CYLINDRO-PARABOLIQUES

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, dont certaines dans les années 80.

L'installation typique est constituée de trois éléments principaux : le champ solaire, le système de transfert de la chaleur et le système de génération électrique.

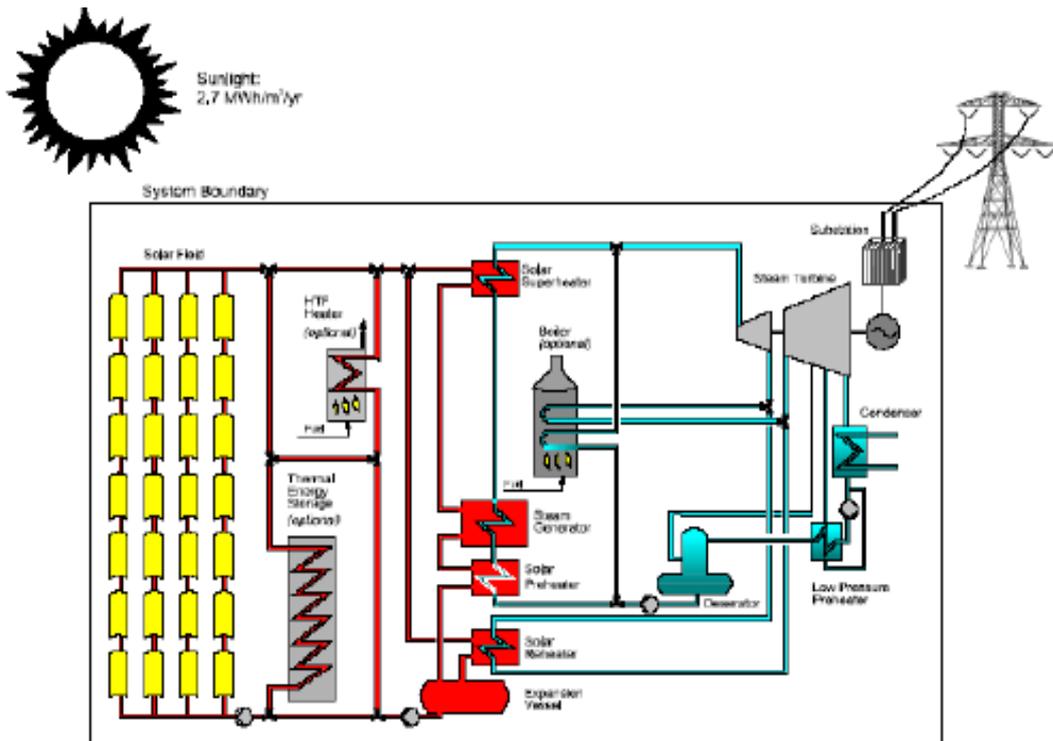


Figure II.3: Configuration typique d'une centrale à concentrateurs cylindro-paraboliques

L'énergie thermique reçue au collecteur est absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide. Le fluide (huile synthétique) qui circule à l'intérieur du tuyau, est chauffé à une température d'environ 400°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs conventionnels afin de produire de la vapeur surchauffée qui fait fonctionner une turbine/générateur électrique. [5]

## II.4 CONCENTRATEURS PARABOLIQUES A MOTEUR STIRLING

Les concentrateurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur deux axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est souvent supérieur à 2000 avec une température de 750°C.

## *Chapitre II : Concentration Solaire*

De toutes les technologies solaires, les concentrateurs paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaire-électricité (29.4%).[6]



Figure II.8: Capteur parabolique avec moteur Stirling

Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Ils possèdent donc également un important potentiel de développement, particulièrement dans des régions peu peuplées de certains pays du sud.

Le système convertit l'énergie thermique due aux radiations solaires en énergie électrique. Le système possède trois principaux éléments (cf. figure II.9) :

- Le concentrateur parabolique
- Le récepteur solaire
- Le moteur Stirling

A la parabole s'ajoute un système de contrôle, permettant le suivi de la course du soleil.

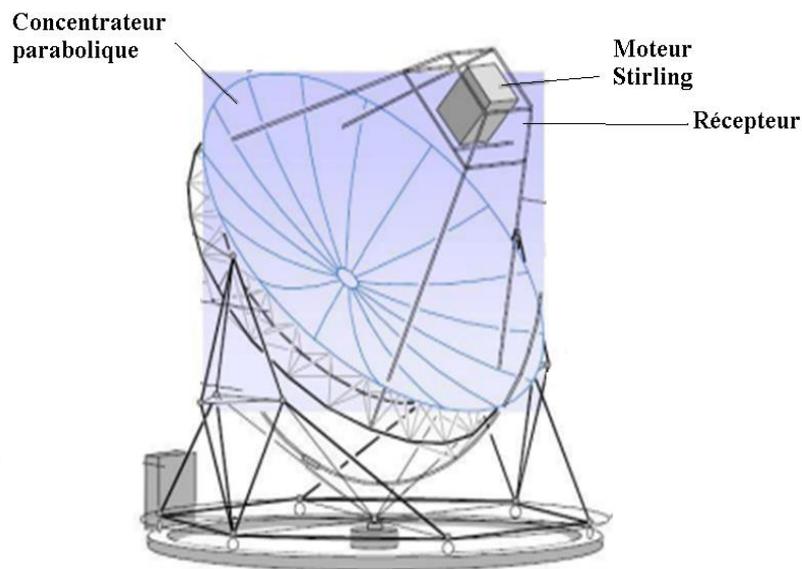


Figure II.9 :Schéma du concentrateur parabolique à moteur Stirling

### II.4.1 Le concentrateur

Le concentrateur est de type parabolique concentrant les rayons du soleil vers la zone appelée foyer (zone se situant juste avant le moteur Stirling) grâce à sa surface réfléchissante avec un coefficient de réflexion aussi grand que possible afin que la réflexion soit la meilleure possible. Pour cela la parabole est conçue en verre ou plastique.

La grande difficulté est de positionner la parabole dans la direction du soleil toute la journée. C'est pourquoi le système est monté sur un système de contrôle poursuivant le soleil sur deux degrés de liberté afin que la poursuite soit optimale. Le suivi se fait de façon autonome par le biais de pyrhéliomètres qui est un appareil de mesure de rayonnement direct.

#### II.4.1.1 Le miroir

Il est basé sur le même principe que les miroirs traditionnels, qui consistent en un dépôt d'argent ou d'aluminium à l'arrière d'une plaque de verre. Toutefois, pour améliorer la réflectivité du concentrateur parabolique l'épaisseur de la couche de verre doit être fine. Elle doit être inférieure au millimètre (0.8 mm) ce qui augmente le taux de réflexion du miroir jusqu'à 94%. [7]



Figure II.10 : Visualisation du miroir

### II.4.1.2 La structure et le système de contrôle

La parabole est formée de 12 éléments en composite résine époxy/fibre de verre sur lesquels sont collés des miroirs élémentaires en verre très fin avec dépôt. La parabole est montée sur une structure métallique pouvant tourner grâce au système de contrôle sur deux axes de rotation. L'axe d'élévation et l'axe de l'azimut sont utilisés pour suivre la direction du soleil. Nous contrôlons ces axes respectivement avec un arceau d'élévation et un arceau d'azimut tous deux guidés par des servomoteurs qui produisent le mouvement précis d'un élément mécanique selon une commande externe (données de la trajectoire solaire).

La structure repose sur le sol et est encombrante mais la stabilité du système est bonne. Le système d'orientation du soleil est déterminé par des capteurs traquant le soleil ou par un programme informatique de prédiction de la position du soleil.

### II.4.2 Facteur d'interception

Le facteur d'interception est la fraction du rayonnement solaire réfléchi à partir du collecteur parabolique qui pénètre dans l'ouverture.

Il est influencé par la taille de l'ouverture, des erreurs dans le système de collecteur, l'angle seuil du collecteur (défini ci-dessous), et la lumière du soleil non-parallèle [8].

## **Chapitre II : Concentration Solaire**

L'augmentation du facteur d'interception augmentera la fraction de l'énergie entrante dans le récepteur, bien que ce que ne soit pas toujours bénéfique. S'il y a une augmentation du facteur d'interception à la suite de la réduction des erreurs dans la surface réfléchissante du capteur parabolique, alors une augmentation du facteur d'interception améliorera les performances du système.

Si l'augmentation du facteur d'interception est accomplie en augmentant la taille de l'ouverture, il y aura des effets contradictoires ; une analyse est nécessaire pour déterminer si l'augmentation de l'énergie interceptée par le récepteur soit supérieure à l'énergie perdue en raison de pertes thermiques.

Il est avantageux d'obtenir un taux de la concentration élevé dans le système de concentrateur puisque l'ouverture peut alors être plus petite conçue plus petite afin de réduire les pertes thermiques, et le facteur d'interception sera plus grand pour un diamètre spécifique d'ouverture. Le taux de la concentration (CR maximal) défini dans le tableau II.1 est la concentration maximale du système normalisé par 1000 W/m<sup>2</sup>, sa valeur maximale est de 45.000 [9], et théoriquement elle peut être atteinte avec un angle seuil de 45° [8].

Beaucoup de fabricants ont des conceptions près de cet angle seuil.

**Tableau II.1 : Spécificités du système de concentrateur pour plusieurs fabricants [10]**

<b>concentrateur</b>	<b>SAIC</b>	<b>SBP</b>	<b>SES</b>	<b>WGA(Mod2)</b>
<b>Surface vitrée (m<sup>2</sup>)</b>	<b>117.2</b>	<b>60</b>	<b>91</b>	<b>42.9</b>
<b>Surface projetée (m<sup>2</sup>)</b>	<b>113.5</b>	<b>56.7</b>	<b>87.7</b>	<b>41.2</b>
<b>Réfectivité</b>	<b>0.95</b>	<b>0.94</b>	<b>0.91</b>	<b>0.94</b>
<b>Longueur focal (m)</b>	<b>12.0</b>	<b>4.5</b>	<b>7.45</b>	<b>5.45</b>
<b>Angle seuil (degrés)</b>	<b>29</b>	<b>52</b>	<b>40</b>	<b>37</b>
<b>Concentration maximale (suns)</b>	<b>2500</b>	<b>12730</b>	<b>7500</b>	<b>&gt; 13000</b>

### II.4.3 Le Récepteur

Le récepteur est le lien entre le concentrateur et le moteur Stirling appartenant à la boîte de protection du moteur (figure II.11). Il a pour but de récupérer le rayonnement provenant directement du concentrateur et de transférer la chaleur au fluide de travail du moteur. Ainsi le récepteur atteindra des températures importantes d'environ 650 °C . Pour être un bon récepteur, celui-ci doit transférer le maximum de puissance radiative incidente au fluide caloporteur du moteur. L'élément qui permet le transfert de chaleur est appelé l'absorbeur et il est placé au fond de la cavité, dont elle permet de diminuer au maximum les réflexions et les pertes par convection.

Le récepteur est constitué de plusieurs petits tubes ou circule le fluide de travail. le transfert thermique se fait à 90%, soit une perte de chaleur par conduction de l'ordre de 10%.

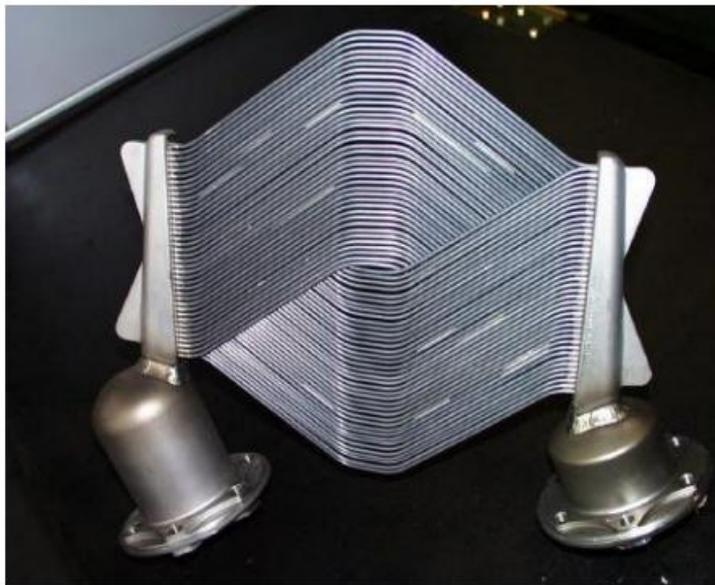


Figure II.11: Récepteur solaire de type SBP/SOLO V-160/161 [11]

Les récepteurs DIR emploient un côté des tubes pour chauffer directement le fluide de travail dans le moteur Stirling en utilisant le rayonnement solaire qui est absorbé sur la surface externe des tubes suivant les indications de la Figure II.11. Le fluide de travail est l'hydrogène ou l'hélium, qui peut absorber un flux solaire d'environ 75 W/cm<sup>2</sup> dus aux capacités élevées de transfert thermique de ces gaz aux vitesses élevées et aux pressions jusqu'à 20 MPa [12].

## Chapitre II : Concentration Solaire

Les rembourss du DIR comprennent la difficulté à équilibrer la puissance thermique entre les cylindres multiples de Stirling, et les tubes de chauffelette encourront des points chauds plus thermiques par rapport aux amortisseurs de caloduc. Le flux peut être plus uniformément distribué en travers des tubes de DIR en augmentant la réflectivité des murs de cavité de récepteur.

### II.5 Pertes de récepteur

Le récepteur d'un système parabolique Stirling est responsable de la majorité des pertes thermiques qui se produisent avant que l'énergie soit convertie en électricité dans le moteur Stirling. Les pertes de collecteur dues à la réflectivité de miroir comportent de 37 % et de 24 % des pertes thermiques pour les collecteurs de SES et de WGA respectivement, les pertes d'interception de récepteur représentent 12 % et 0 % de toutes les pertes thermiques pour les systèmes de SES et de WGA, et les pertes thermiques de récepteur (conduction, convection, rayonnement) se composent de 51 % et de 76 % de toutes les pertes thermiques pour les systèmes de SES et de WGA respectivement [10].

Une répartition des pertes dans un système parabolique Stirling est présentée sur le schéma suivant :

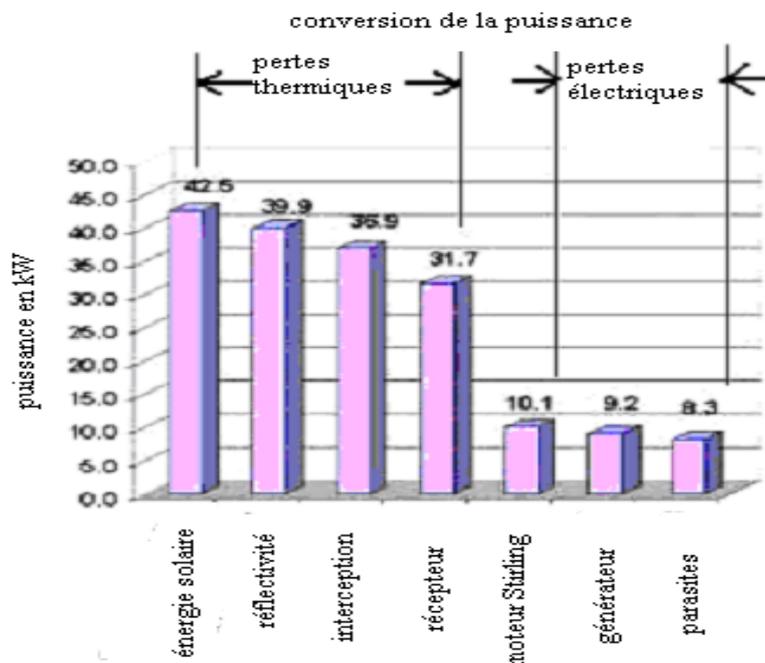


Figure II.12 : Cascade d'énergie pour le système SBP à  $1000 [W/m^2]$  : niveau de l'insolation [10]

### **II.6 Modèle du moteur Stirling**

Le moteur Stirling est un moteur externe de la chaleur (ou combustion) qui a la chaleur convertie de l'amortisseur à la transmission mécanique en quelque sorte assimilée aux moteurs à combustion interne. À la différence des moteurs à combustion interne, la chaleur est appliquée extérieurement à la tête de chaufferette de piston dans ce moteur Stirling. Puisque le moteur Stirling se fonde sur une source externe pour l'entrée de chaleur, le cycle lui-même fonctionne comme un système fermé puisque le liquide de fonctionnement est contenu dans les cylindres et pas mis à l'air libre comme des gaz d'échappement des moteurs à combustion interne.

L'addition d'un régénérateur améliore le rendement du moteur par un pré-refroidissement du fluide de travail lors de son déplacement à partir de l'espace de dilatation de la chambre de compression, et le préchauffage du fluide de travail lors de son déplacement à partir de l'espace de compression dans l'espace d'expansion.

Le fluide de travail est souvent un atome d'hydrogène, qui est chauffé à plus de 700 ° C à une pression maximale autour de 20 MPa ce qui donne un rendement thermique-mécanique d'environ 40% [12]. La chambre de compression est refroidie par une boucle de fluide réfrigérant qui circule un fluide secondaire à travers un radiateur commun automobile avec refroidissement à air pulsé fourni par un ventilateur.

Les moteurs Stirling appliqués dans les systèmes de vaisselle comprennent le SOLO 161 11 kW du moteur de Allemagne, les Kockums (auparavant Unis Stirling) 4-95 moteur de 25 kW de la Suède, et les moteurs Stirling thermique STM4-120 25 kW moteur des États-Unis [12].

Le moteur SOLO a été utilisé pour des projets de cogénération et de la recherche Euro/Enviro dish. Le Kockums 4-95 moteur est l'unité de puissance pour le Stirling Energy Systems (SES). Le STM4-120 a été développé par General Motors et le Département de l'énergie dans le cadre du prochain programme de la génération du véhicule (hybride) (SolarPACES, 2007).

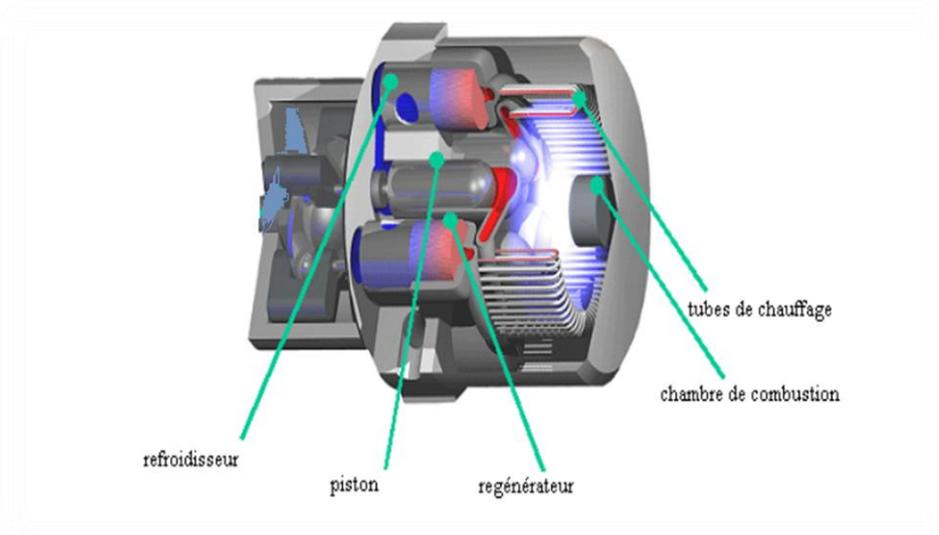


Figure II.13 : Composants internes du moteur Stirling [13]

### II.6.1 Avantages des moteurs Stirling [14]

1. L'efficacité maximale potentielle pour un moteur thermique fonctionnant entre les mêmes températures.
2. Oxydes d'azote faibles par rapport aux moteurs à combustion interne.
3. Vibrations minimales.
4. Moteurs Stirling à pistons libres ont une très grande fiabilité.
5. Moteurs Stirling ont un fonctionnement comme un réfrigérateur ou une pompe à chaleur.
6. Avoir le travail particulier externe le plus élevé pour n'importe quel cycle régénérateur fermé.

### II.6.2 Désavantages des moteurs Stirling [14]

1. Moteurs Stirling ont souvent une réponse plus lente à une augmentation ou une diminution de la charge.
2. Joints d'hydrogène ou de l'hélium peuvent être problématiques pour les moteurs Stirling cinématiques.

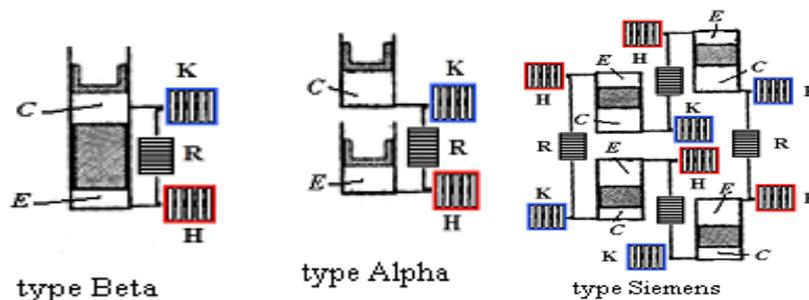
### II.6.3 Types des moteurs Stirling

Il y a deux types courants de moteurs Stirling qui ont été utilisés pour la production d'énergie : cinématique et le moteur à pistons libres.

## Chapitre II : Concentration Solaire

Les moteurs cinématiques ont le piston de pouvoir branché au vilebrequin par une bielle, qui est fixée à un croisillon pour éliminer les forces latérales contre les parois du cylindre [15]. Un sceau linéaire est utilisé entre le croisillon et le piston pour sceller la région entre les pressions élevées et plus basses de permettre aux surfaces d'appui de rester lubrifié dans l'endroit à basse pression tout en prévenant l'encrassement de la surface d'échangeur de chaleur dans région à haute pression. Des moteurs cinématiques de Stirling sont actuellement utilisées dans les systèmes paraboliques Stirling par tous les principaux constructeurs.

Un système du moteur à pistons libres de 6 kilowatts Stirling a été vérifié par la production d'électricité de Cummins et Sunpower pour avoir un 28 % a expliqué l'opération de rendement avec une température de l'espace de l'expansion 629°C [16]. Le système à pistons libres d'un système parabolique Stirling par Sunpower a eu un rendement net comparable au système du moteur cinématique de SBP.



### II.6.4 Configurations de moteur Stirling

Il y a trois configurations de modèle de moteur de base qui ont été employées pour des moteurs Stirling. Celles-ci comprennent l'alpha, bêta, et les configurations gamma. La configuration alpha utilise un cylindre séparé pour l'espace d'expansion et de compression. Les détails des deux autres configurations dans les annexes A et B.

#### II.6.4.1 Configuration Alpha

Un moteur Stirling de configuration alpha utilise un cylindre séparé pour l'expansion et l'espace de compression et il a deux pistons [15].

## Chapitre II : Concentration Solaire

Des configurations multiples de cylindre pour permettre une haute puissance de sortie particulière [14]. Il ya quatre processus dans le cycle de Stirling qui seront décrits pour la configuration alpha.

### Processus 1-2 : Compression

La majeure partie du gaz expansé est dans le cylindre de compression et le gaz se refroidit en transfère la chaleur au dissipateur externe. Le fluide de travail se contracte pendant qu'il refroidit et écarte les deux pistons du vilebrequin comme indiqué dans la figure II.15 :

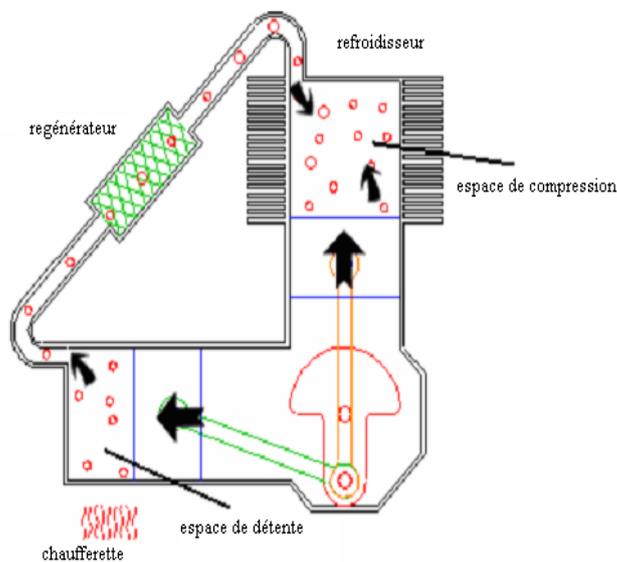


Figure II.15 : Phase de compression du moteur Alpha [18]

### Processus 2 - 3 : Transfert de la chaleur à partir du régénérateur au fluide de travail

La majeure partie du gaz contracté est toujours dans le cylindre de compression suivant les indications de la figure II.16. L'élan du volant continue à faire tourner le vilebrequin par 90 degrés supplémentaires pendant que le fluide de travail est transféré de nouveau dans le cylindre d'expansion. Tandis que le gaz se déplace par le régénérateur, il absorbe l'énergie thermique.

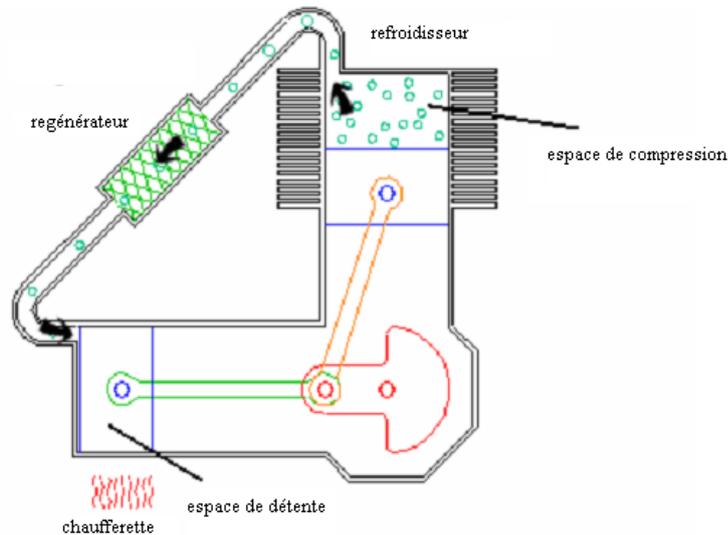


Figure II.16 : *Transfert de chaleur du moteur alpha du régénérateur au fluide de travail [18]*

### Processus 3-4 : Détente

La majeure partie du liquide de fonctionnement est dans l'espace d'expansion où elle est chauffée d'une source externe telle que l'énergie solaire ou la biomasse. Le gaz se dilate dans l'espace de détente et par le régénérateur tout en conduisant les deux pistons vers l'intérieur comme indiqué sur la figure II.17 :

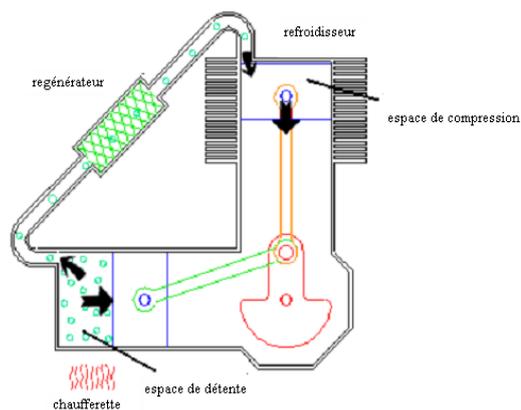


Figure II.17 : *Phase de détente du moteur Alpha [18]*

### Processus 4-1 : Transfert thermique à partir du fluide de travail au régénérateur

La plupart du gaz est toujours dans l'espace d'expansion que l'élan volant tourne le vilebrequin d'un 90 degrés supplémentaires. Cela provoquant le gaz resté poussé à travers le régénérateur dans l'espace de compression comme présenté sur la figure II.18. La chaleur est transférée à partir du fluide de travail vers le régénérateur dans cette étape.

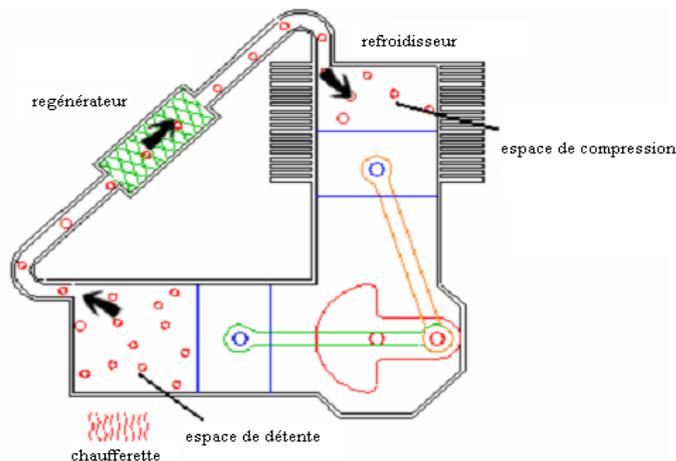


Figure II.18 : *Transfert de chaleur du moteur alpha du fluide de travail vers le régénérateur* [18]

### II.7 Régénérateur

Un régénérateur se compose de disques métalliques, il est employé souvent dans des moteurs Stirling pour améliorer le rendement du moteur [16].

De l'énergie thermique est absorbée par le régénérateur quand le fluide de travail est déplacé de l'espace de détente à l'espace de compression. Pour cette raison le fluide de travail est refroidi avant d'arriver à l'espace de compression. De l'énergie thermique est transférée à partir du régénérateur au fluide de travail et pour cette raison il préchauffée quand le fluide de travail se déplace de l'espace de compression à l'espace de détente. Le régénérateur dans un moteur Stirling peut atteindre des rendements plus grands que de 98 %, ce qui indique le fluide de travail partira de la proximité du régénérateur à la température de l'espace qu'il occupe [14].

## **Chapitre II : Concentration Solaire**

Un régénérateur n'améliore pas la puissance de sortie d'une conception spécifique du moteur, mais contribue plutôt à une légère baisse de puissance de sortie en raison des pertes de pression à travers le régénérateur. Une amélioration importante de l'efficacité du moteur à l'aide d'un régénérateur emporte de loin sur la réduction mineure de la puissance spécifique.

### **II.8 Fluides de travail du moteur Stirling**

Les fluides de travail couramment utilisés dans des moteurs Stirling se composent de l'air, de l'hélium, ou de l'hydrogène. La sélection d'un fluide de travail particulier est basée sur les propriétés des fluides suivantes : conductivité thermique, chaleur spécifique, densité, et viscosité. Un fluide de travail avec une plus grande conductivité thermique, une densité et une chaleur spécifique plus élevée permettra d'améliorer les capacités de transfert de chaleur du gaz et l'efficacité des échangeurs de chaleur. Un fluide de travail avec une plus faible densité et une viscosité réduite la chute de pression à travers le régénérateur, l'aire de travail, et l'espace vide et il améliorera par conséquent le rendement du moteur.

Le fluide de travail pour des moteurs Stirling d'une haute performance est souvent l'hydrogène ou l'hélium puisqu'ils ont une plus grande conductivité thermique et une capacité thermique par rapport à l'air suivant les indications du schéma (II.19) et schéma (II.20) respectivement.

Chacun des quatre procédés de cycle de Stirling dure moins de 10 ms dans un moteur, ainsi le choix du fluide de travail dépend hautement de la conduction thermique du gaz [8]. Une plus grande chaleur spécifique pour le fluide de travail améliore également l'efficacité de l'énergie de transfert vers le régénérateur.

L'hydrogène a le facteur le plus élevé pour le transfert thermique avec une valeur de  $104 \text{ kJ}^{1.5}/(\text{kg}^{0.5} \cdot \text{K}^{1.5} \cdot \text{kmol})$ , puis hélium avec 44, et finalement air à 29 [6]. L'hydrogène devrait être le fluide de travail le plus effectif au transfert de chaleur, qui est supporté avec une comparaison des performances avec de l'hélium.

## Chapitre II : Concentration Solaire

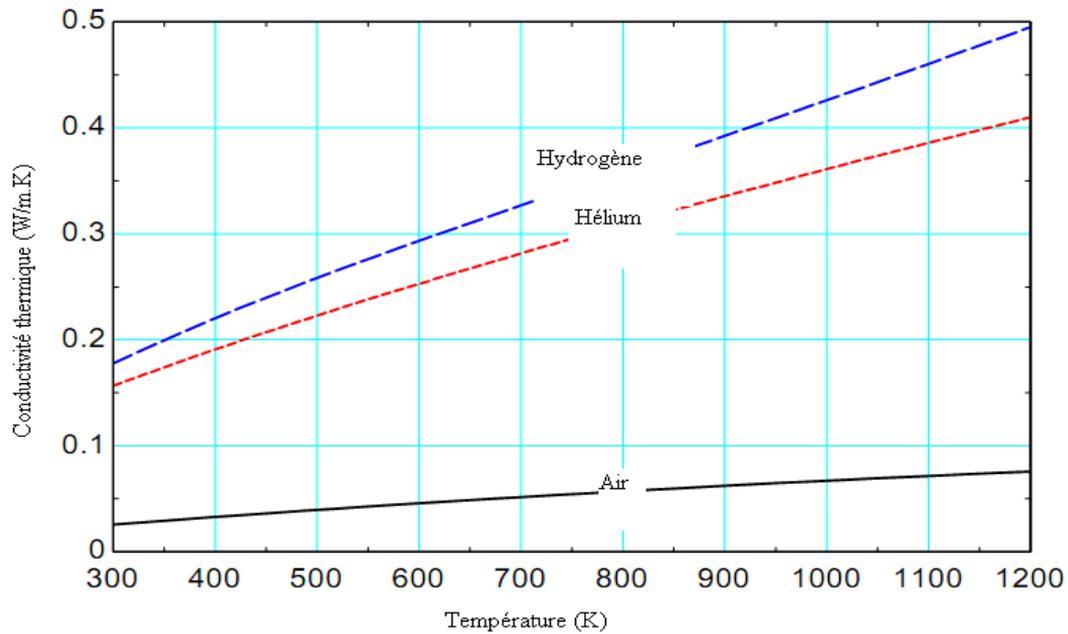


Figure II.19 : Conductivités thermiques des fluides de travail en fonction de la température [19]

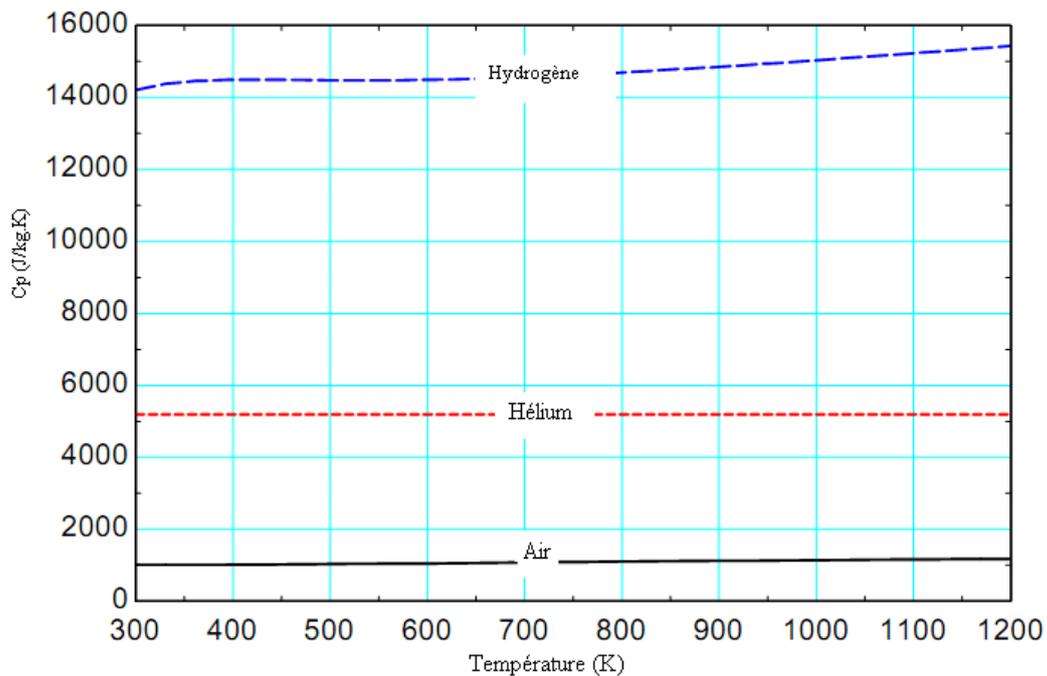


Figure II.20 : Chaleurs spécifiques des fluides de travail en fonction de la température [19]

## Chapitre II : Concentration Solaire

Les pertes de pression dans les aires de travail et le régénérateur dépendent de la viscosité et de la densité du fluide de travail. Un fluide de travail avec une faible viscosité et une densité aura comme conséquence des gouttes de plus basse pression, améliorant principalement le rendement thermique. Une comparaison des viscosités et des densités pour les fluides de travail est donnée sur les figures (II.21) et (II.22) respectivement.

Malgré les nombreux avantages de l'utilisation de l'hydrogène et de l'hélium pour les fluides de travail, un désavantage de l'hélium et de l'hydrogène est que les pertes de sceau seront plus grandes et plus difficiles à contrôler. Deux inconvénients supplémentaires sur l'hydrogène sont qu'il peut absorber dans différents matériaux provoquant la fragilisation par l'hydrogène, et il est combustible quand il est en contact avec l'oxygène. Dans l'ensemble, l'hydrogène est le premier choix pour le fluide de travail, car il a les propriétés de transport les plus efficaces pour améliorer les performances du moteur Stirling.

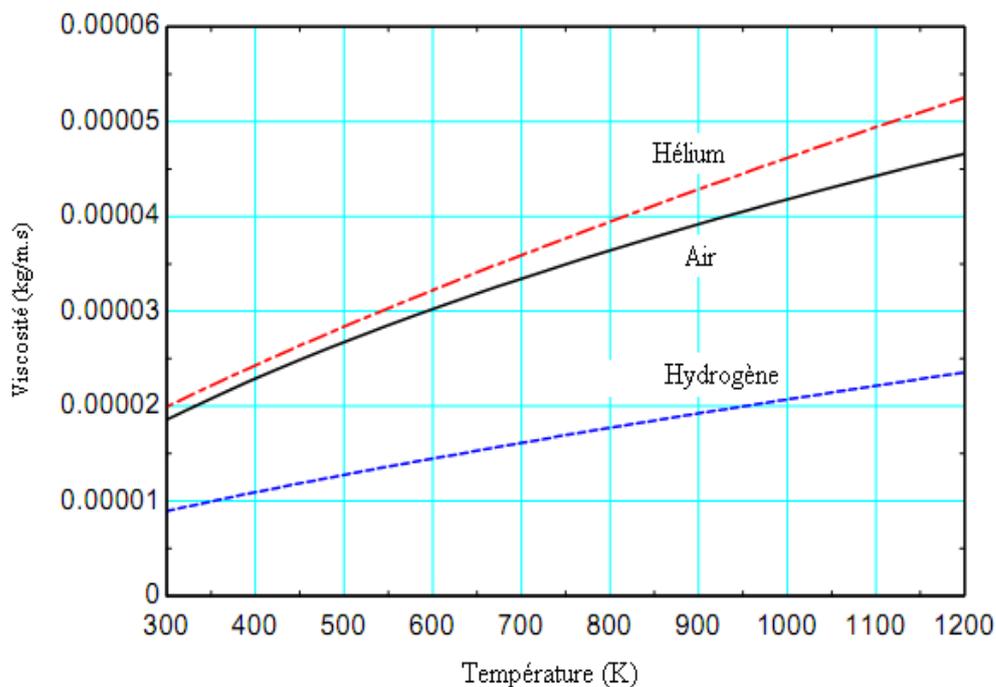


Figure II.21 : Viscosités des fluides de travail en fonction de la température [19]

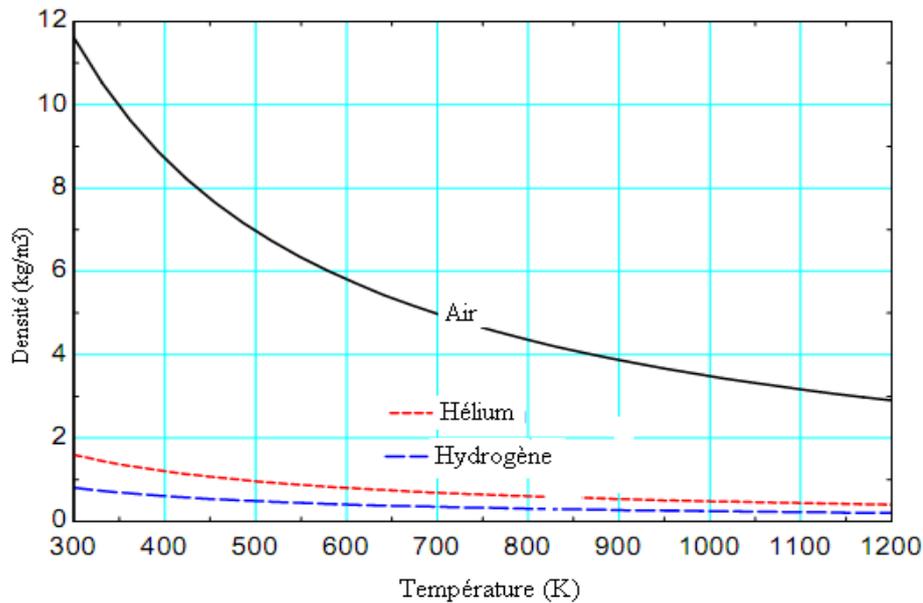


Figure II.22 : Densités des fluides de travail en fonction de la température [19]

### II.9 Analyse idéale du moteur Stirling

Le cycle de Stirling idéal se compose de quatre processus réversibles à l'intérieur comme le montre la Figure II.23 [20].

Processus 1-2: compression isotherme à une température  $T_c$  pendant le transfert de la chaleur du fluide de travail à un dissipateur externe.

Processus 2-3 : chauffage isochore de fluide de travail par le régénérateur.

Processus 3-4 : Détente isotherme à une température de  $T_H$ , transfert thermique externe au fluide de travail.

Processus 4-1 : Refroidissement isochore, transfert de chaleur à partir du fluide de travail au régénérateur.

Un régénérateur avec une efficacité théorique de 100 % stocke une partie de l'énergie rejetée dans le processus 4-1 et l'utilise dans le processus de l'apport de chaleur 2-3. La chaleur à une température  $T_H$  est alimentée extérieurement dans le processus 3-4, le rejet de l'énergie à partir du système à la température  $T_C$  produisant dans le processus 1-2.

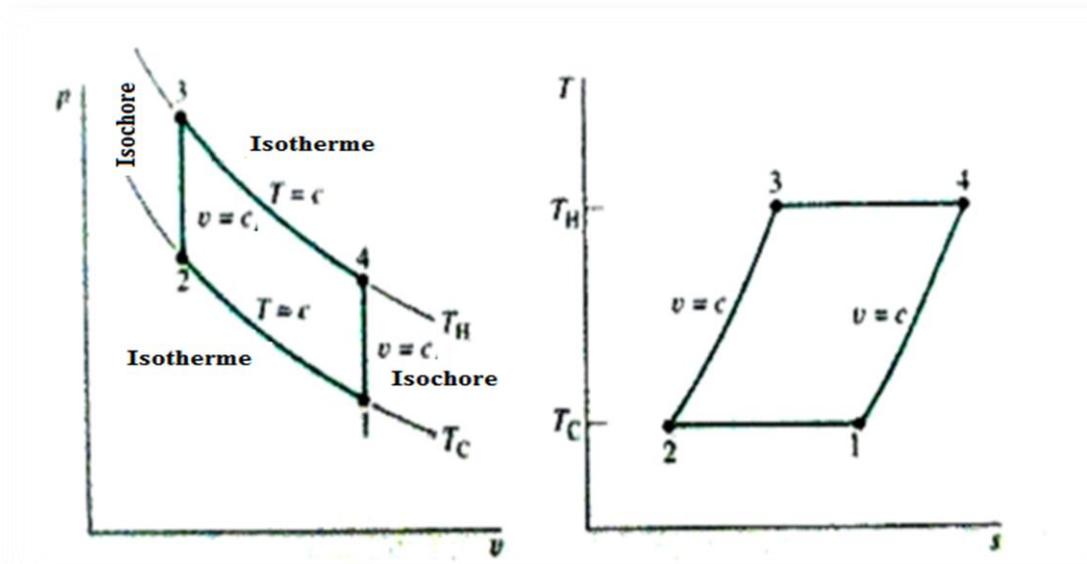


Figure II.23 : Diagrammes du cycle Stirling Idéal [20]

### II.10 Puissance nette de modèle Stine en fonction de l'insolation

Le modèle à long terme de prévision de l'énergie de Stine ne prévoit pas la puissance de sortie ou le rendement du moteur Stirling, mais il prévoit plutôt la puissance nette entière du système parabolique de Stirling. Ce modèle validé expérimentalement a été créé par Stine pour prévoir l'énergie à long terme à partir des systèmes paraboliques Stirling [8].

Ce modèle a été validé en vérifiant les systèmes (SBP) au site solaire de Plataforma en Espagne. Le modèle est construit à l'aide de quelques paramètres obtenus expérimentalement que l'on trouve en utilisant des données provenant des systèmes performants sur plusieurs mois. Le modèle de production d'énergie s'est développé à partir ces données expérimentales, exigeant d'entrer l'insolation solaire, la température ambiante, le miroir souillant, et la puissance des parasites. Il prévoit le rendement à long terme d'un système parabolique Stirling.

Le modèle à long terme de production d'énergie emploie des données expérimentales pour tracer la puissance de sortie totale en fonction de l'insolation solaire. Le rendement de ces systèmes peut être développé à partir d'un modèle linéaire simple. La puissance de sortie prévue est inférieure le matin et légèrement plus grande en soirée. Ceci est dû à la capacité thermique du système que le modèle n'inclut pas.

## Chapitre II : Concentration Solaire

Ces caractéristiques de système ont toujours comme conséquence un très bon ajustement linéaire lorsque les données prévoient des performances du système.

Le modèle emploie l'équation (II.1) pour prévoir la puissance de sortie brute. Le système est tel que  $I_{bm,corr}$  est l'insolation rectifiée de faisceau,  $m_1$  est la pente de l'ajustement linéaire, et  $b_1$  est le facteur d'interception de puissance [21].

$$P_{gross} = m_1 \cdot I_{bm,corr} + b_1 \quad (II.1)$$

Des estimations pour les valeurs de  $m_1$  et de  $b_1$  ont été obtenues par l'observation des données mesurées de puissance de sortie avec un ajustement linéaire pour chacun des quatre systèmes paraboliques Stirling [10] suivant les indications du tableau II.2.

**Tableau II.2 : Les valeurs de pente et l'interception des systèmes paraboliques Stirling en utilisant la méthode de Stein**

Concentrateur	$m_1$ (m <sup>2</sup> )	$b_1$ (kW)
SAIC	32.3	-12.3
SES	30.2	-5.3
SBP	14.9	-3.4
WGA (MOD1)	12.6	-2.7

Une fois que la puissance totale est obtenue, la puissance nette peut être trouvée en soustrayant la puissance parasite employée pour exécuter le suivi, le refroidissement, et les systèmes de régulation de la puissance totale. La puissance nette d'un système parabolique Stirling est donnée par l'équation (II.2) :

$$P_{net} = P_{gross} - \sum P_{parasitics} \quad (II.2)$$

## II.11 Système de refroidissement

Le système de refroidissement pour un système parabolique Stirling rejette les pertes thermiques du moteur Stirling afin de réduire la température de l'espace de compression et pour améliorer le rendement du moteur.

La configuration la plus courante de système de refroidissement pour un système parabolique Stirling est un radiateur et un ventilateur avec une boucle de fluide de pompe et de refroidissement. Cette configuration est illustrée sur la figure II.24.

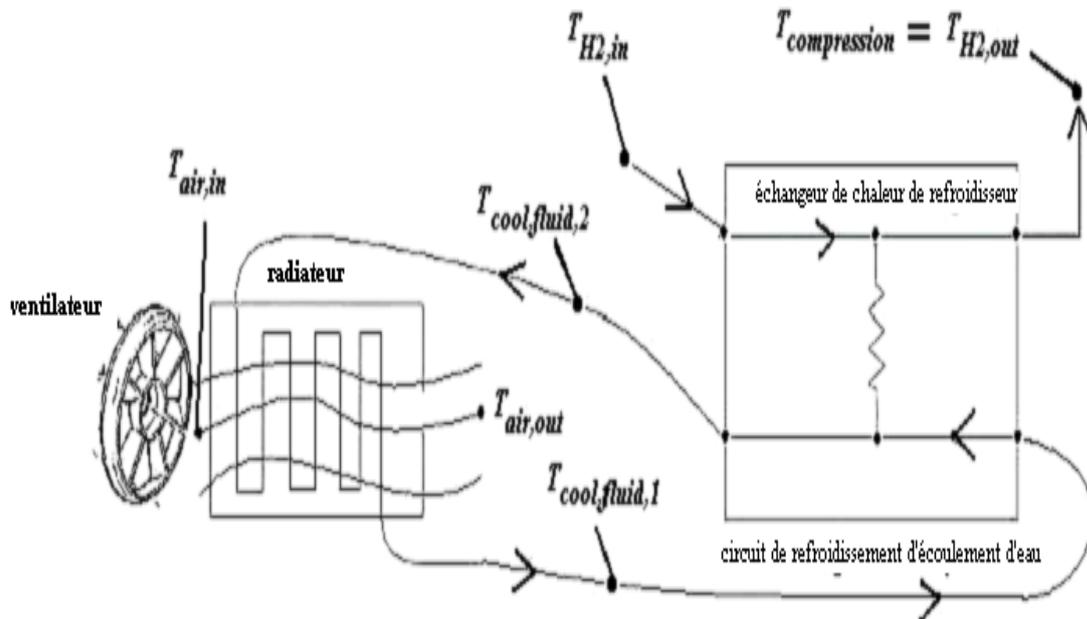


Figure II.24 : Système de refroidissement pour la technologie parabolique Stirling

### **II.12 CONCLUSION**

Parmi les technologies de concentration solaire, nous nous focalisons sur les deux technologies les plus dominantes :

1. les cylindro-paraboliques
2. les systèmes paraboliques à moteur Stirling.

Notre étude est basée sur la dernière qui apparait plus innovante à la première. Dans ce chapitre nous donnons une présentation bien détaillée sur les performances des composantes de notre système étudié ( concentrateur parabolique, récepteur, moteur Stirling, régénérateur).

Notre concentrateur est de type WGA, il est caractérisé par sa grande réflectivité de 94% et sa grande capacité de concentration plus de 13000 (suns).

Ensuite, nous présentons la configuration Alpha du moteur Stirling, son principe de fonctionnement et la comparaison entre caractéristiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, viscosité et densité) des trois fluides de travail dans cette technologie :

l'air, l'hélium et de l'hydrogène qui est le fluide plus convenable pour la performance et le rendement du notre système, et par suite les avantages et les inconvénients du moteur Stirling.

Enfin, nous présentons le modèle Stine qui est intégré dans le logiciel de simulation Greenius, (chapitre IV).

Nous décrivons notre système de refroidissement qui est nécessaire pour la réduction des pertes thermiques du moteur Stirling et l'augmentation de performance et l'efficacité du notre système.

Dans le chapitre suivant, nous donnons une approche intégrale de la concentration solaire par la méthode de Monte Carlo.

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] IEA SolarPACES, Technology Characterization Solar Dish Systems, [http://www.solarpaces.org/solar\\_dish.pdf](http://www.solarpaces.org/solar_dish.pdf). Consulté le 8 Septembre 2011.
- [2] A.GAMA ; *Etude et réalisation d'un concentrateur cylindroparabolique avec poursuite solaire aveugle* ; revue des énergies renouvelables vol 11 n° 3 ; 2008.
- [3] IEA SolarPACES." 2007.  
[http://www.solarpaces.org/CSP\\_Technology/docs/solar\\_dish.pdf](http://www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_dish.pdf). Consulté le 8 Septembre 2011.
- [4] Sylvain, Q. (2007) ; *Les centrales solaires à concentration* ; université de LIEGE, Belgique
- [5] Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation, Renewable Energies, [http://www.trec-eumena.org/re\\_energies](http://www.trec-eumena.org/re_energies). Consulté le 25 Décembre 2011.
- [6] Walker, G. (1980). *Stirling Engines*. Oxford.
- [7] Sébastien, R. *Théorie du Concentrateur Solaire et du Rayonnement Solaire sur l'île de la Réunion* p.p (6/42).
- [8] Stine, William B., and Raymond W. Harrigan, eds. *Solar Energy Fundamentals and Design with Computer Applications*. New York: Wiley-Interscience, 1985.
- [9] Duffie, John A., and William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Third ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [10] Mancini, Thomas, et al. "Dish-Stirling Systems: *An Overview of Development and Status*." *Journal of Solar Energy Engineering* 125 (May 2003).
- [11] "Ministerio De Educación Y Ciencia Website."  
<http://www.psa.es/webeng/instalaciones/discos.html>. Consulté le 20 Décembre 2011.
- [12] Teagan, Peter W. Review: *Status of Markets for Solar Thermal Power Systems*, May 2001. <<http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/pdfs/adlitt1.pdf>>. Consulté le 15 Octobre 2011.
- [13] "STM Power website." <http://www.stmpower.com>. Consulté le 8 Septembre 2011.
- [14] Urieli , David Berchowitz, eds. *Stirling Cycle Engine Analysis*. First ed. Bristol: Adam Hilger Ltd, 1984.

## ***Chapitre II : Concentration Solaire***

- [15]Stine, W. B., and Frank Kreith, eds. *Mechanical Engineering Handbook*. Boca Raton: CRCPress LLC, 1999.
- [16]Stine, W. B., and Richard B. Diver. *A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology*. Vol.SAND93-7026., 1994.
- [17]Finkelstein, Theodor. "*Specific Performance of various Stirling Engine Designs.*" Proceedings of the 4th European Stirling Forum 1998. Osnabruck, Germany.
- [18]Keveney, Matt. "*Animated Engines.*" 2001. <http://www.keveney.com/Engines.html>. Consulté le 12 Octobre 2011.
- [19]MaMahan, A., Klein, S.A., and Reindl, D.T., "A *Finite-Time Thermodynamic Framework for Optimizing Solar-Thermal Power Plants,*" ASME J. Solar Energy Engineering, Vol. 129 p. 355, 2007.
- [20]Moran, Michael J., and Howard N. Shapiro, eds. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 5th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [21]Stine, William B. "Experimentally Validated Long-Term Energy Production Prediction Model for Solar Dish/Stirling Electric Generating Systems." IECEC'95.

**Chapitre III : Application de la Méthode  
de Monte Carlo : Approche intégrale de  
la concentration solaire**

### **III.1 Introduction**

Vus les besoins et problématiques du solaire à concentration présentés dans le chapitre précédent, la méthode de Monte-Carlo semble bien adaptée à la simulation des systèmes optiques concentrateurs réels. Nous développons dans ce chapitre une revue de la méthode de Monte-Carlo, d'une part, et d'autre part, de mettre en avant ceux qui sont au cœur de notre travail méthodologique (formulation intégrale, variance nulle). [1]

Depuis la publication initiale [2], de nombreux ouvrages et publications ont été consacrés à la méthode de Monte-Carlo. Dans la plupart des problèmes que nous étudions, les transferts radiatifs sont les phénomènes de transport linéaires (les photons n'interagissent pas entre eux que ce soit directement ou indirectement). La littérature sur la méthode de Monte-Carlo en transport linéaire est très riche et variée selon les applications. Nous choisissons arbitrairement de signaler les ouvrages qui constituent pour nous d'excellents outils. La monographie [3] est reconnue par la communauté comme l'ouvrage synthétique de référence.

La revue [4] concerne plus sphériquement les applications d'ingénierie qui nous intéressent. Ces textes apportent un cadre théorique suffisant pour bien appréhender la plupart des algorithmes de Monte-Carlo utilisés habituellement dans la recherche en concentration solaire. Ils constituent une base solide pour toute recherche bibliographique plus étendue. Cependant, la modélisation des phénomènes de transport linéaires par Monte-Carlo permet de consulter la littérature sur les plasmas et sur le transport de neutrons [5, 6].

Nous rappelons brièvement les étapes essentielles du développement des algorithmes de Monte-Carlo ainsi que leurs trois principales techniques d'optimisation. Nous insistons sur les aspects qui sont suffisamment mûrs pour être directement appliqués à la problématique solaire.

### **III.2 Approche intégrale**

La méthode de Monte-Carlo est une méthode' statistique de calcul intégral : tous les algorithmes estiment une intégrale. Comme les équations de transport linéaire peuvent toujours s'écrire sous forme intégrale. Il est possible de formuler l'intégrale que l'on estime avec un algorithme de Monte-Carlo linéaire.

Dans cette partie, nous montrons comment formuler l'intégrale, estimée par un algorithme, dans le but de servir par la suite cette écriture intégrale en vue d'optimiser l'algorithme en question.

Contrairement aux algorithmes de Monte-Carlo non linéaires où le parcours aléatoire de chaque particule dépend statistiquement du parcours des autres particules, les réalisations aléatoires dans un algorithme de Monte-Carlo linéaire sont strictement indépendantes. Ainsi, quand on étudie une grandeur physique A, toute estimation  $\widetilde{a}_N$  de cette grandeur par un algorithme linéaire avec N réalisations aléatoires se construit comme la moyenne de la valeur de ces réalisations :

$$\widetilde{a}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \quad (\text{III.1})$$

où  $w_1, w_2 \dots w_N$  sont N réalisations indépendantes de la même variable aléatoire W. les réalisations dans un algorithme de Monte-Carlo est :

- parfois très simples, comme par exemple dans l'algorithme standard d'estimation du facteur de forme  $F_{12}$  entre deux surfaces  $S_1$  et  $S_2$  où on tire aléatoirement des rayons partant de  $S_1$  et dont le poids statistique  $w_i$  prend soit la valeur 1 (si le rayon considéré frappe  $S_2$ ) soit la valeur 0 (si le rayon considéré passe à coté de  $S_2$ ) ;
- parfois très complexes, dès que l'on simule les phénomènes de réflexion multiple ou de diffusion multiple.

Dans tous les cas, toutes les réalisations sont strictement indépendantes et ceci à deux conséquences essentielles :

- on peut systématiquement connaître la fiabilité de l'estimation  $\widetilde{a}_N$  grâce à l'incertitude statistique (évaluation de l'écart-type de l'estimateur) selon :

$$\widetilde{\sigma}_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i^2 \right) - \widetilde{a}_N^2} \quad (\text{III.2})$$

La fiabilité de l'estimation est directement liée à la variance de la variable aléatoire W dont on tire N réalisations. On peut remarquer qu'il faut réaliser 100 fois plus de tirages pour obtenir une estimation 10 fois plus précise.

- Il est facile de paralléliser les calculs de l'algorithme.

**Remarque :**

Même si les réalisations sont indépendantes entre elles, dans tous les cas non triviaux, l'échantillonnage des réalisations se fait en utilisant des générations aléatoires

successives (pour le facteur de forme : tirage d'une position sur  $S_1$  puis tirage d'une direction sur l'hémisphère d'émission- soit 4 générations aléatoires). Le nombre de générations aléatoires nécessaires pour une réalisation de  $W$  dans l'algorithme est égal à la dimension du domaine d'intégration dans la formulation.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons d'abord montrer au travers d'exemples simples comment développer à partir de n'importe quel algorithme une écriture intégrale, et réciproquement comment décrire un algorithme en partant d'une formulation intégrale.

Ces exemples sont déjà présentés dans la littérature mais il est important de les décrire une fois de plus en détail avec les notations et le formalisme que nous avons choisi ici.

**III.3 Correspondance entre un algorithme et sa formulation intégrale :**

Soit une réalisation définie par le tirage d'une valeur  $x$  de la variable aléatoire  $X$  de densité de probabilité  $p_X(x)$  et d'une valeur  $y$  de la variable aléatoire  $Y(x)$  dont la densité de probabilité  $p_Y(y|x)$  dépend de  $x$ . Après avoir tiré  $x$  et  $y$ . on calcule la valeur du poids  $w$  comme la valeur d'une fonction  $\hat{w}$  de  $x$  et de  $y$ . l'algorithme est le suivant :

1. Tirage de  $x_1$  selon  $p_x$  : tirage de  $y_1$  selon  $p_{y|x=x_1}$  ; calcul de  $w_1 = \hat{w}(x_1, y_1)$ .
2. Tirage de  $x_2$  selon  $p_x$  : tirage de  $y_2$  selon  $p_{y|x=x_2}$  ; calcul de  $w_2 = \hat{w}(x_2, y_2)$ .
3. ....
4. Tirage de  $x_N$  selon  $p_x$  : tirage de  $y_N$  selon  $p_{y|x=x_N}$  ; calcul de  $w_N = \hat{w}(x_N, y_N)$ .
5.  $A$  est estimé par la moyenne  $\tilde{a}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i$  et l'écart-type associé est estimé

par

$$\tilde{\sigma}_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i^2 \right) - \tilde{a}_N^2}$$

La traduction de cet algorithme en formulation intégrale est triviale :  $N \rightarrow +\infty$ , l'estimation  $\widehat{a}_N$  estime effectivement  $A$  comme l'espérance de la variable aléatoire  $W = \widehat{w}(X, Y(X))$  qui correspond à

$$A = E(W) = \int_{D_x} p_X(x) dx \int_{D_Y(x)} p_Y(y/x) dy \widehat{w}(x, y) \quad (\text{III.3})$$

avec  $D_x$  et  $D_y(x)$  les domaines respectifs de définition de  $X$  et de  $Y(X)$ .

si on applique cette procédure à l'exemple du facteur de forme  $F_{12}$  entre deux surfaces  $S_1$  et  $S_2$  (voir la figure III.1), on obtient l'intégrale :

$$F_{12} = E(W) = \int_{S_1} p_X(x) dx \int_{2\pi} p_\Omega(w) dw \widehat{w}(x, y) \quad (\text{III.4})$$

avec  $\widehat{w}(x, y) = 1$  s'il ya une intersection entre  $S_2$  et le rayon défini par la position  $x$  sur  $S_1$  et la direction  $w$  sur l'hémisphère d'émission (défini par  $2\pi$  d'angle solide), et  $\widehat{w}(x, y) = 0$  sinon. Les fonctions densités de probabilité sont  $p_X(x) = \frac{1}{S_1}$  (tirage uniforme de la position sur la surface  $S_1$ ) et  $p_\Omega(w) = \frac{w \cdot n_1}{\pi}$  (échantillonnage lambertien de la direction d'émission) avec  $n_1$  la normale à  $S_1$ . Sur un exemple aussi simple, il est évident que l'équation III.4 correspond strictement à l'algorithme de Monte-Carlo. Nous verrons plus tard que meme avec des algorithmes très compliqués, cette correspondance reste directe.

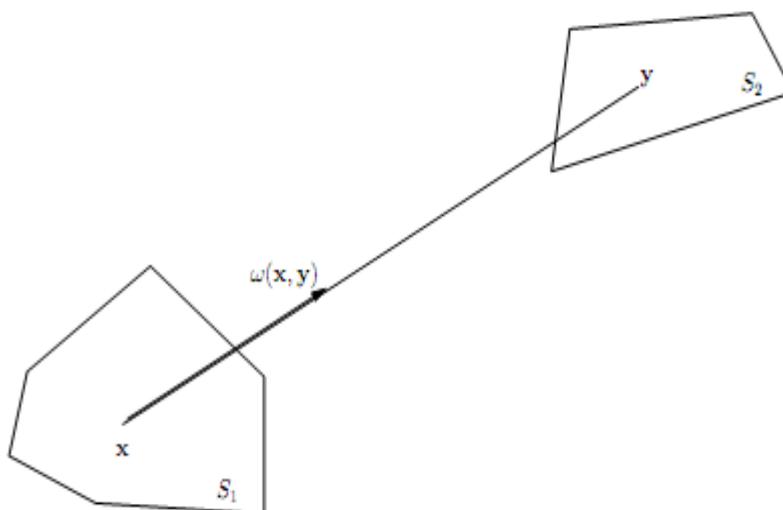


Figure III.1 – Facteur de forme  $F_{12}$  entre deux surfaces  $S_1$  et  $S_2$

La procédure inverse pour passer d'une formulation à un algorithme est aussi très utile. Considérons à nouveau l'exemple du facteur de forme  $F_{12}$  mais en partant cette fois-ci de son expression intégrale habituelle :

$$F_{12} = E(W) = \int_{S_2} dx \int_{S_2} dy \frac{[w(x,y).n_1][-w(x,y).n_2]}{\pi S_1 (y-x)^2} \quad (\text{III.5})$$

où  $n_2$  est la normale à  $S_2$  en  $y$  et  $w(x,y) = \frac{y-z}{\sqrt{(y-x)^2}}$  est le vecteur unitaire partant de  $x$  vers  $y$ . si on compare cette dernière formulation intégrale avec l'équation III.4, on constate que les domaines d'intégration sont différents et qu'on ne trouve aucune information statistique sur l'échantillonnage du domaine d'intégration considéré.

On y remédie facilement en introduisant arbitrairement une première densité de probabilité  $p_X$  définie sur  $S_1$ , par exemple

$p_X(x) = \frac{1}{S_1}$ , puis une seconde densité de probabilité  $p_Y$  définie sur  $S_2$ , par exemple

$p_Y(y) = \frac{1}{S_2}$  et on exprime finalement la fonction poids  $\hat{w}(x, y)$ . On obtient :

$$F_{12} = E(W) = \int_{S_1} p_X(x) dx \int_{S_2} p_Y(y) dy \hat{w}(x, y) \quad (\text{III.6})$$

avec

$$\hat{w}(x, y) = \frac{1}{p_X(x)p_Y(y)} \frac{[w(x,y).n_1][-w(x,y).n_2]}{\pi S_1 (y-x)^2} \quad (\text{III.7})$$

On peut alors facilement déduire de cette formulation, un nouvel algorithme correspondant :

1. Tirage uniforme de  $x_1$  sur  $S_1$  : tirage uniforme de  $y_1$  sur  $S_2$  ; calcul de  $w_1 = \hat{w}(x_1, y_1)$ .
2. Tirage uniforme de  $x_2$  sur  $S_1$  : tirage uniforme de  $y_2$  sur  $S_2$  ; calcul de  $w_2 = \hat{w}(x_2, y_2)$ .
3. ...
4. Tirage uniforme de  $x_N$  sur  $S_1$  : tirage uniforme de  $y_N$  sur  $S_2$  ; calcul de  $w_N = \hat{w}(x_N, y_N)$ .

5.  $A$  est estimé par la moyenne  $\widetilde{a}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i$  et l'écart-type associé est estimé par

$$\widetilde{\sigma}_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i^2 \right) - \widetilde{a}_N^2}$$

A partir de ces images élémentaires, nous pouvons maintenant illustrer les trois techniques les plus couramment utilisées pour optimiser un algorithme de Monte-Carlo donné : l'échantillonnage préférentiel, la variable de contrôle et la reformulation intégrale.

### III.3.1 Échantillonnage préférentiel

Dans le précédent algorithme, nous avons vu que les choix de  $p_X$  et de  $p_Y$  sont arbitraires. Cependant, ces choix concernant l'échantillonnage des variables aléatoires sont évidemment des conséquences en termes de convergence numérique : l'écart-type  $\widetilde{\sigma}_N$  est modifié lorsque l'on change les densités de probabilité  $p_X$  et de  $p_Y$ .

L'échantillonnage préférentiel consiste à optimiser le choix de ces pdf (On notera désormais pdf pour fonction densité de probabilité) afin de réduire la valeur de l'écart-type associé à l'estimation pour un nombre limité de réalisations aléatoires.

Cette technique est très facile à réaliser quand l'algorithme à optimiser a été déduit d'une formulation intégrale : on remplace simplement les routines de tirage de  $x$  et de tirage de  $y$  par celles qui correspondent aux nouvelles pdfs, et on modifie en conséquence les expressions de ces pdfs à l'intérieur de celle du poids  $w(x,y)$  (cf. Eq .III.7).

Dans le cas où l'algorithme de Monte-Carlo a été développé sur la base d'images de physique statistique sans expliciter la formulation intégrale correspondante, il suffit de savoir qu'il existe une traduction intégrale des algorithmes de transport linéaire et que cette écriture intégrale s'exprime sous une forme similaire de celle de l'équation III.3 (avec éventuellement beaucoup plus de générations aléatoires successives).

Remplacer les pdfs d'origine des pdfs optimisées  $p_{X,opt}$  et  $p_{Y,opt}$  conduit à une intégrale de cette forme :

$$A = E(W) = \int_{D_X} p_{X,opt}(x) dx \int_{D_{Y(x)}} p_{Y,opt}(y|x) dy \widehat{w}_{opt}(x, y) \quad (III.8)$$

avec

$$\widehat{w}_{opt}(x, y) = \widehat{w}(x, y) \frac{p_X(x)}{p_{X,opt}(x)} \frac{p_Y(y|x)}{p_{Y,opt}(y|x)} \quad (III.9)$$

Cela signifie qu'il n'est pas obligatoire d'explicitier la formulation intégrale : la structure de l'algorithme ne change pas, à l'exception de nouvelles fonctions densité de probabilité qui sont maintenant utilisées pour les tirages de  $x$  et de  $y$ , et de l'ancien poids qui est maintenant multiplié par le rapport entre les fonctions densité de probabilité d'origine et les fonctions densité de probabilité optimisées. Cependant, choisir judicieusement les densités de probabilité n'est pas évident tout comme il n'est pas évident de définir un maillage non-uniforme bien adapté pour les méthodes numériques déterministes.

### III.3.2 variable de contrôle

S'il existe une fonction  $\widehat{v}(x, y)$  telle que

$$\int_{D_X} p_X(x) dx \int_{D_{Y(x)}} p_Y(y|x) dy \widehat{v}(x, y) = 0 \quad (III.10)$$

Alors, la fonction poids  $\widehat{w}(x, y)$  de l'équation III.3 peut, dans l'idéal, être remplacée par une fonction poids optimisée  $\widehat{w}_{opt}(x, y) = \widehat{w}(x, y) + \widehat{v}(x, y)$ . On a effectivement :

$$E(W_{opt}) = A :$$

$$\int_{D_X} p_X(x) dx \int_{D_{Y(x)}} p_Y(y|x) dy \widehat{w}_{opt}(x, y) = \int_{D_X} p_X(x) dx \int_{D_{Y(x)}} p_Y(y|x) dy [\widehat{w}(x, y) + \widehat{v}(x, y)] = A \quad (III.11)$$

C'est la fonction  $\widehat{v}$  qui appelée la variable de contrôle et elle est associée à la variable aléatoire  $V$ . pour que cette technique soit efficace, il faut choisir  $\widehat{v}$  telle que

$$\text{Var}(W + V) < \text{Var}(W).$$

Ici aussi, comme pour l'échantillonnage préférentiel, il n'est pas indispensable d'explicitier la formulation intégrale, il suffit d'être certain que l'intégrale de  $\hat{v}$  soit nulle.

### III.3.3 Reformulation intégrale

Nous avons vu à travers l'exemple sur le facteur de forme que deux formulations intégrales distinctes (Eq.III.4 et Eq.III.6) conduisant à deux algorithmes différents peuvent être utilisés pour calculer la même grandeur. En fait, c'est aussi un moyen –le plus efficace en pratique– pour réduire la variance des algorithmes de Monte-Carlo. Si les aires des surfaces  $S_1$  et  $S_2$  sont petites devant la distance qui les sépare, alors l'algorithme standard (où on tire une position  $x$  sur  $S_1$  et une direction d'émission  $w$  sur l'hémisphère de sortie) converge difficilement. En effet, la plupart des rayons

générés aléatoirement n'intercepteront pas  $S_2$  (la valeur des poids correspondants sera nulle) et les réalisations du poids prendront très rarement la valeur 1 (quand une intersection sera trouvée) : en conséquence, l'écart-type de l'estimateur tend vers l'infini quand la distance entre les deux surfaces tend vers l'infini. Le second algorithme (tirage de deux positions  $x$  et  $y$  respectivement sur  $S_1$  et  $S_2$ ), au contraire, conduit à un écart-type relatif qui tend vers zéro pour la même limite (dans ce cas, un seul tirage suffit pour connaître exactement la valeur du facteur de forme entre deux surfaces élémentaires). Si la distance entre les deux surfaces tend vers zéro et que leur aires sont grandes, c'est l'inverse : l'incertitude statistique de l'algorithme standard tend vers zéro alors que celle du second tend vers l'infini.

En fonction des caractéristiques du problème, une formulation intégrale peut être idéalement choisie ou bien totalement inadaptée. Seule la pratique régulière de la méthode de Monte-Carlo permet d'acquérir suffisamment d'expérience et de confiance pour entrer en profondeur dans la formulation intégrale et la modifier (en basant sur les images physiques disponibles) quand on rencontre de sérieux problèmes de convergence.

### III.4 Algorithmes à variance nulle

Nous allons maintenant discuter les bénéfices de concept de variance nulle dans la recherche sur l'énergie solaire concentrée. Comme l'ont mentionné ASSARAF et CAFFAREL dans [66], les algorithmes à variance nulle sont aussi vieux que la méthode de Monte-Carlo elle-même. Dans ces algorithmes, à chaque réalisation du poids, la valeur obtenue est constante et rigoureusement égale à la grandeur que l'on souhaite calculer. Autrement dit, la distribution de la variable aléatoire  $W$  du poids statistique est une distribution de Dirac centrée en  $A$  (conformément aux notations de l'équation III.1). ainsi, une réalisation unique est nécessaire et suffisante pour obtenir une estimation parfaite de la grandeur  $A$ . cependant, pour développer un algorithme à variance nulle, il est indispensable de connaître à l'avance la valeur exacte de la grandeur à estimer. On ne peut donc en pratique créer un algorithme à variance nulle que lorsque l'on connaît déjà la valeur de la grandeur  $A$  (estimer  $A$  par la méthode de Monte-Carlo est alors inutile).

En dehors de ces considérations purement théoriques, nous allons montrer qu'en travaillant sur les formulations intégrales selon les grandes lignes de [7,8] et en faisant comme si toutes les solutions analytiques étaient disponibles, on peut, d'une manière efficace et générale, orienter de façon quasi-systématique les procédures d'optimisation décrits plus tard (principalement l'échantillonnage préférentiel et la reformulation intégrale). Dans la littérature récente, le cœur théorique du concept de variance nulle est présenté à l'aide des fonctions ajointes. [9,10]

Dans les trois prochains paragraphes, nous allons présenter le formalisme théorique d'abord sur une intégrale simple puis double puis enfin sur une intégrale de dimension infinie dans le cadre de la diffusion multiple.

#### III.4.1 Présentation et illustration du concept sur une intégrale simple :

Considérons l'intégrale simple suivante :

$$A = \int_a^b f(x)dx = \int_a^b p_X(x)w(x)dx \quad (\text{III.12})$$

$$\text{avec } w(x) = \frac{f(x)}{p_X(x)} \quad (\text{III.13})$$

que l'on estime à l'aide d'un algorithme de Monte –Carlo dans lequel on a introduit une densité de probabilité  $p_X(x)$  définie sur  $D = [a, b]$ . L'expression de l'écart-type de l'estimation obtenue est donnée par l'équation suivante (cf. Eq. III.2) :

$$\frac{\sqrt{E(W^2) - E(W)^2}}{\sqrt{N}} \approx \tilde{\sigma}_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i^2\right) - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i\right)^2}$$

On rappelle que l'échantillonnage préférentiel consiste à choisir astucieusement la densité de probabilité  $p_X(x)$  pour diminuer l'écart-type  $\tilde{\sigma}_N$  et que même si les lois de tirage aléatoire sont modifiées, l'algorithme converge toujours vers A (pour un nombre infini de tirages). Si la fonction f ne change pas de signe sur l'intervalle D, la densité de probabilité optimisée idéale  $p_{X,opt}^I(x)$  qui conduit à une variance nulle, c'est-à-dire à une estimation exacte de A quelque soit le nombre de tirages, s'écrit :

$$p_{X,opt}^I(x) = \frac{f(x)}{\int_a^b f(x)dx} = \frac{f(x)}{A} \quad (III.14)$$

Ceci signifie simplement que si on connaît la solution analytique de l'intégrale, on peut définir une densité de probabilité idéale telle que chaque génération se traduit par une valeur du poids qui est exactement la solution  $w(x) = A$ . si l'intégrale est connue, l'utilisation de méthode de Monte-Carlo est inutile, mais on retiendra que plus l'expression de la densité de probabilité se rapproche de l'équation III.14, plus l'erreur statistique diminue.

### III.4.2 Extension du concept à des intégrales de dimensions supérieures :

Partant de l'équation III.3 :

$$A = E(W) = \int_{D_x} p_X(x)dx \int_{D_Y(x)} p_Y(y/x)dy \hat{w}(x, y)$$

où chaque réalisation de l'algorithme est définie par l'échantillonnage de deux variables aléatoires X et Y, pour réfléchir formellement sur la question de variance nulle en utilisant l'échantillonnage préférentiel. On introduit deux pdfs optimisées idéales  $p_{X,opt}^I$  et  $p_{Y,opt}^I$ , et on transforme l'équation III.3 :

$$A = \int_{D_x} p_{X,opt}^I(x)dx \int_{D_Y(x)} p_{Y,opt}^I(y/x)dy \hat{w}_{opt}^I \quad (III.15)$$

avec

$$\widehat{w}_{opt}^I = \frac{p_X(x)}{p_{X,opt}^I(x)} \frac{p_Y(y/x)}{p_{Y,opt}^I(y/x)} \widehat{w}(x, y) \quad (III.16)$$

où  $p_{X,opt}^I$  et  $p_{Y,opt}^I$  sont choisies de sorte que  $\widehat{w}_{opt}^I = A$  pour tout couple  $(x,y)$  de  $D_X \times D_Y(x)$ .

Comme  $\widehat{w}_{opt}^I$  est indépendant de  $y$  (car  $A$  est une constante), le rapport  $\frac{p_Y(y/x)\widehat{w}(x,y)}{p_{Y,opt}^I(y/x)}$

doit aussi être indépendant de  $y$  quelque soit la valeur de  $x$ . on pose

$$A_X(x) = \int_{D_Y(x)} p_Y(y/x) \widehat{w}(x, y) dy$$

Et on obtient la loi de tirage des  $y$  :

$$p_{Y,opt}^I(y/x) = \frac{p_Y(y/x)\widehat{w}(x,y)}{\int_{D_Y(x)} p_Y(y/x)\widehat{w}(x,y) dy} = \frac{p_Y(y/x)\widehat{w}(x,y)}{A_X(x)} \quad (III.17)$$

En reprenant cette expression dans l'équation (III.18), on obtient la loi de tirage idéale des  $x$  :

$$p_{X,opt}^I(x) = \frac{p_X(x)A_X(x)}{\int_{D_X} p_X(x)A_X(x) dx} \quad (III.18)$$

Ceci démontre que les pdfs optimisées idéales sont uniques et qu'elles peuvent être déterminées successivement en suivant la démarche décrite au paragraphe précédent dans l'exemple avec une simple intégrale. Pour la première intégrale, on a introduit  $A_X(x)$  qui est la contribution à la grandeur  $A$  de la part de toutes les réalisations dont le tirage de  $X$  donne la même valeur de  $x$ .

$$A = \int_{D_X} p_X(x)A_X(x) dx \quad (III.19)$$

En supposant que  $A_X(x)$  est connue, l'équation III.18 signifie que la pdf idéale  $p_{X,opt}^I$  prend en compte l'importance de la contribution de chaque valeur de  $x$  au résultat final pour définir la probabilité de réalisation de cette valeur. Pour la seconde intégrale et ce quelque soit la valeur de  $x$ , l'équation III.4 est obtenue en suivant la démarche d'optimisation idéale appliquée à l'intégrale suivante :

$$A_X(x) = \int_{D_Y(x)} p_Y(y/x) dy A_Y(y|x) \quad (III.20)$$

avec  $A_Y(y|x) = \hat{w}(x, y)$ . Cette démarche peut être généralisée si l'équation III.3 présente plus de deux intégrales successives :  $A_Y(y|x)$  aurait alors une forme intégrale et chaque nouvelle intégrale conduirait à la définition d'une nouvelle pdf utilisée idéale. Cependant, comme nous l'avons déjà précisé plus haut,  $p_{X,opt}^I$  et  $p_{Y,opt}^I$  (et éventuellement toutes les autres pdf successives) ne peuvent pas être utilisées en l'état : il faut trouver des approximations de ces expressions qui correspondent à des modèles physiques simplifiés permettant des intégrations de façon analytique. [11]

### III.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons donné une application de la méthode de Monte Carlo pour la concentration solaire.

Nous avons expliqué la correspondance entre un algorithme et sa formulation intégrale, des algorithmes à variance nulle, la présentation et illustration du concept sur une intégrale simple et l'extension du concept à des intégrales de dimensions supérieures

Cette approche intégrale de la méthode de Monte Carlo est implémenté dans notre logiciel de simulation Greenius.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter notre logiciel de simulation Greenius, par ces performances de calcul, il est désigné pour l'installation et la conception des grands projets pour les énergies renouvelables : dans les secteurs de photovoltaïque, éolien, géothermique, biomasse, et plus particulièrement en concentration solaire.

En associant rigueur méthodologique et efficacité informatique, nous n'avons aucune difficulté à répondre aux besoins que les outils solaires actuels couvrent déjà. De plus, quand les grands codes disponibles ne permettent pas d'aborder les problématiques scientifiques des nouvelles pistes de développement du solaire à concentration, nous avons montré qu'il est possible de développer, pour un investissement minimum, des codes spécifiques et de calculer du rendement, de la puissance totale  $P_{gross}$ , la puissance nette  $P_{net}$  de notre système, ces paramètres physiques sont utiles à la compréhension des phénomènes mis en jeu.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Jérémie De la Torre, « Calculs de sensibilités par méthode de Monte-Carlo, pour la conception de procédés à énergie solaire concentrée », Thèse de DOCTORAT, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), France 2011.
- [2] Nicholas Metropolis and S. Ulam. The Monte Carlo Method. Journal of the American Statistical Association, 44(247) :335–341, Sept. 1949.
- [3] J.M. Hammersley and D.C. Handscomb. Monte Carlo Methods. Chapman and Hall, London, 1964.
- [4] J.R. Howell. The Monte Carlo method in radiative heat transfer. Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme, 120(3) :547–560, Aug. 1998.
- [5] M.H. Kalos and P.A. Whitlock. Monte Carlo Methods. John Wiley & Sons, 1986.
- [6] I. Lux and L. Koblinger. Monte Carlo particle transport methods : neutron and photon calculations. CRC Press, Boca Raton, 1991.
- [7] R. Assaraf and M. Caffarel. Zero-variance principle for Monte Carlo algorithms. Physical Review Letters, 83(23) :4682–4685, Dec. 1999.
- [8] J.E. Hoogenboom. Zero-variance Monte Carlo schemes revisited. Nuclear Science and Engineering, 160(1) :1–22, Sept. 2008.
- [9] D. Glouchkov, K. Koshelev, and A. Schulz. Monte Carlo simulation of photon transport for optically thick, differentially moving plasmas : II. Escape factors for differentially moving spheres. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 81:191–197, 2003.
- [10] M. Cherkaoui, J.-L. Dufresne, R. Fournier, J.-Y. Grandpeix, and A. Lahellec. Monte Carlo simulation of radiation in gases with a narrow-band model and a net-exchange formulation. Journal of Heat Transfer, 118(2) :401–407, 1996.
- [11] G.A. Mikhailov. Optimization of Weighted Monte Carlo Methods. Springer-Verlag, 1995.

# **Chapitre IV : Logiciel de Simulation Greenius**

### VI.1. Introduction

Greenius est un logiciel puissant de simulation pour le calcul et l'analyse de Projets des énergies renouvelables à alimentation électrique. Nous notons les centrales thermiques solaires, les cylindro-paraboliques, les systèmes photovoltaïques, et les centrales éoliens ou concentrateurs paraboliques à Moteur Stirling. Ce programme offre une seule combinaison des calculs techniques et économiques détaillés comme ils sont nécessaires pour la planification et l'installation des projets renouvelables.

Des applications de Windows peuvent être sauvegardées dans d'autres formats. Les résultats de calcul sont détaillés et les simulations étendues exécutent très rapidement.

Greenius a été développé au centre aérospatial allemand (DLR). Dr. Rainer Kistner, WinfriedOrtmanns, Dr. Volker Quaschnig et Dr. Jürgen Dersch ont appartenu à l'équipe de son développement. La vente, la distribution et le service sont faits sous le permis de DLR.[1,2]

### VI.2. Installation

Pour l'utilisation du Greenius, un système d'exploitation et le matériel minimum doit répondre aux conditions nécessaires nécessaires :

- 32bit version de Mme.-Windows (MS-Windows98 ou plus récent)
- Pentium II processor 300 Mhz (1 Ghz ou plus recommandés)
- 128 MB RAM ( 256 MB ou plus recommandé)

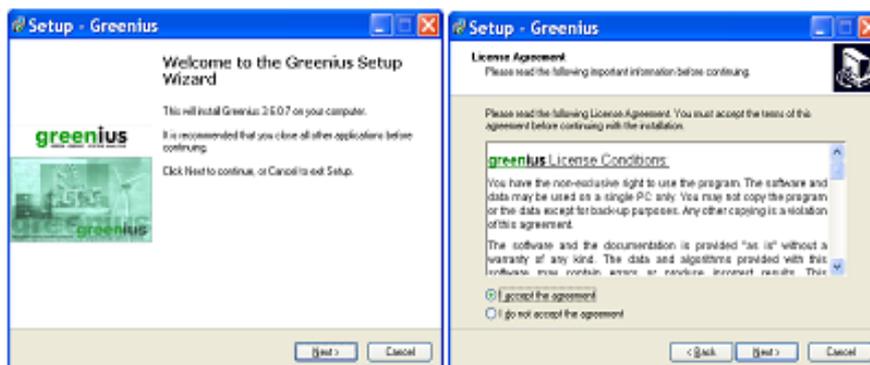


Figure I.V.1 : Fenêtre de l'installation

#### VI.3. Wizard

Après avoir commencé le programme wizard apparaît automatiquement sur le bureau. Il permet de créer de nouveaux projets ou ouverture des projets existants. Avec la commande  ESC nous pouvons fermer la fenêtre wizard . À l'entrée de menu  File|Wizard respectivement la commande  F12, et par suite nous pouvons commencer le wizard encore à n'importe quel moment.



Figure I.V.2 : Fenêtre de wizard

#### VI.4. Nouveau Projet

Après le choix d'un nouveau projet au wizard, nous pouvons écrire le nom de projet à distinguer différents projets. Dans la prochaine étape nous choisissons la technologie souhaitée.

Par conséquent, la fenêtre de sélection de technologie commence automatiquement.

Dans la prochaine étape nous nous devons choisir un fichier de données météorologiques. C'est essentiel pour la plupart des technologies renouvelables.

Maintenant, les paramètres du projet peuvent être changés où une simulation peut être initiée directement avec la commande  F9.

#### VI.5. Écran Principal

Si aucun projet n'est disponible, seulement le menu standard et un écran de fond sont visibles. Si un projet est ouvert ou un nouveau projet créé, le menu standard de projet et l'écran standard de projet sont visibles.



Figure I.V.3 : Fenêtre de l'écran principal

#### VI.6. Mise en œuvre d'algorithmes de Monte-Carlo :

Les techniques présentées au chapitre III peuvent être mises en œuvre de façon à satisfaire les besoins de simulation, c'est-à-dire ceux de l'ingénierie actuelle des systèmes solaires à concentration. Le principal argument défendu ici est que de nombreux outils logiciels et de nombreuses bibliothèques scientifiques sont aujourd'hui disponibles permettant au non-spécialiste de passer rapidement d'une formulation intégrale (choisie parmi les concepts d'optimisation) à la mise en œuvre de l'algorithme correspondant, sur une architecture quelconque (ordianteur personnel, curseur, ou calculateur massivement parallèle). La présentation est appuyée par le logiciel de simulation Greenius issu du centre aérospatial allemand (DLR). Dr. Rainer Kistner, Winfried Ortmanns, Dr. Volker Quaschnig et Dr. Jürgen Dersch.[3]

Tout autre logiciel de simulation avec des objectifs comparables conduirait à la même démonstration : modéliser des scènes d'un haut niveau de complexité géométrique et mettre en œuvre de façon autonome des algorithmes parallélisés impliquant un suivi de rayon efficace.

(C'est-à-dire incluant des tests d'intersection avec un grand nombre de primitives géométriques. C'est aujourd'hui accessible rapidement à tout chercheur observant que les codes de simulation existants. Ils ne répondent pas encore à des besoins précis d'analyse, ni de concevoir son propre code. L'idée soutenue n'est donc pas que des codes sont aujourd'hui disponibles (répondant aux attentes), mais qu'il est facile de construire de tels codes, au cas par cas, en fonction des spécificités de problème étudié, lorsque les grands codes du domaine ne couvrent pas encore le besoin.

#### VI.7. Choix de La Technologie



Figure I.V.4 : Fenêtre du choix de la technologie

Dans cette fenêtre nous pouvons choisir la technologie. Au moment où le logiciel supporte les technologies suivantes :

- ✓ Centrales thermiques solaires de cuvette
- ✓ Systèmes solaires paraboliques
- ✓ Concentration des systèmes photovoltaïques
- ✓ Parcs d'alimentation électrique par conversion éolienne
- ✓ Systèmes paraboliques de cuvette de stockage

### VI.8. Emplacement

L'emplacement contient des données géographiques, des données de structure de la terre pour le site de projet (un site de Tlemcen pour notre étude). La latitude, la longitude et le fuseau horaire sont la référence pour tous les calculs de la position solaire. Par conséquent, ils sont choisis soigneusement.

La longueur de rugosité et la structure de la terre ont une grande influence sur le rendement du parc de vent. Ce paramètre est employé pour estimer la vitesse de vent dans la taille de pivot sur la base de la vitesse de vent dans la taille de mesure de référence.

Ce logiciel permet de calculer les huit paramètres météorologiques pendant 8760 heures pour une année de référence :

- ✓ La température ambiante
- ✓ Pression atmosphérique
- ✓ Humidité
- ✓ Irradiance globale
- ✓ Irradiance normale directe
- ✓ Irradiance diffuse
- ✓ Direction de vent
- ✓ Vitesse de vent

### VI.9. Technologie des Systèmes solaires paraboliques à moteur Stirling

Les paramètres techniques sont présentés dans la figure ci-dessous.

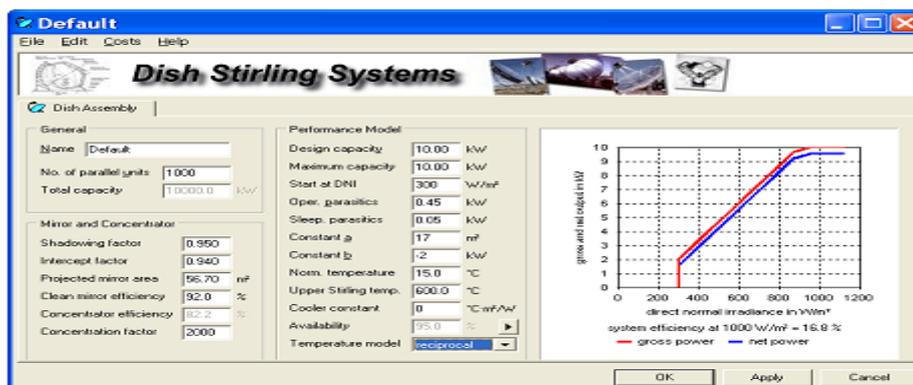


Figure IV.5 : Fenêtre principale de notre technologie

Les données pour le miroir et le concentrateur sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1 : Caractéristiques du miroir et du concentrateur**

<b>Facteur d'ombre</b>	0.95
<b>Facteur d'interception</b>	0.94
<b>Zone du miroir projeté (m<sup>2</sup>)</b>	41.2
<b>Facteur de netteté du miroir</b>	92 %
<b>Rendement du concentrateur</b>	82
<b>Facteur de concentration</b>	9000

#### VI.10. Modèle d'équations :

Le logiciel de simulation est basé sur le modèle mathématique suivant :

La puissance électrique totale est [4] :

$$P_{gross} = \begin{cases} a \cdot E_{cor} + b \cdot E_{DNI} & \text{if } E_{DNI} \geq E_{DNI,min} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (IV-1)$$

$E_{cor}$  : l'irradiance corrigée [W/m<sup>2</sup>],

$E_{DNI}$  : l'irradiance normale directe en W/m<sup>2</sup>

$E_{DNI,min}$  : l'irradiance normale directe pour le démarrage de la génération en W/m<sup>2</sup>

a : constante de modèle performant en  $W_e / (W/m^2)$

b : constante de modèle performant en  $W_e$

L'irradiance corrigée est donné par la formule suivante :

$$E_{cor} = E_{DNI} \cdot f_{ref} \cdot f_{temp} \quad (IV-2)$$

Le facteur de correction de réflexion est :

$$f_{ref} = f_{shadowing} \cdot f_{intercept} \quad (IV-3)$$

$f_{\text{shading}}$  : Facteur d'ombrage et de colmatage

$f_{\text{intercept}}$  : Facteur d'interception

Le facteur de correction de la température est [5,6]:

$$f_{\text{temp}} = \begin{cases} \frac{\vartheta_{\text{norm,amb}} + 273.15^{\circ}\text{C}}{\vartheta_{\text{amb}} + f_{\text{ref}} \cdot E_{\text{DNI}} \cdot c_{\text{cooler}} + 273.15^{\circ}\text{C}} & \text{reciprocal model} \\ \frac{\vartheta_{\text{up,Stirling}} - (\vartheta_{\text{amb}} + f_{\text{ref}} \cdot E_{\text{DNI}} \cdot c_{\text{cooler}})}{\vartheta_{\text{up,Stirling}} - \vartheta_{\text{norm,amb}}} & \text{Carnot model} \end{cases} \quad (\text{IV-4})$$

$\vartheta_{\text{norm,amb}}$  : la température normalisée pour le modèle performant en °C

$\vartheta_{\text{amb}}$  : la température ambiante actuelle en °C

$\vartheta_{\text{up,Stirling}}$  : la température supérieure de Stirling en °C

$c_{\text{cooler}}$  : constante de refroidissement en °C/(W/m<sup>2</sup>)

#### VI.10.1 Modèle de Perez :

##### VI.10.1 Rayonnement sur une surface inclinée (ciel quelconque)

###### VI.10.1.1 Rayonnement direct [7,8]

La composante directe dans un plan d'inclinaison quelconque  $i$  et d'orientation quelconque  $\gamma$  pour une hauteur  $h$  et un azimut  $a$  du soleil est:

$$I_{li} = I_l \cdot (\sin(h) \cdot \cos(i) + \cos(h) \cdot \cos(\gamma - a) \cdot \sin(i)) \quad (\text{IV-5})$$

###### VI.10.1.2 Rayonnement diffus [9]

La composante du diffus dans un plan d'inclinaison quelconque  $i$  est donné par :

$$D = D^* + \frac{1 - \cos(i)}{2} \cdot \alpha \cdot G_h \quad (\text{IV-6})$$

où  $\alpha$  représente l'albédo.

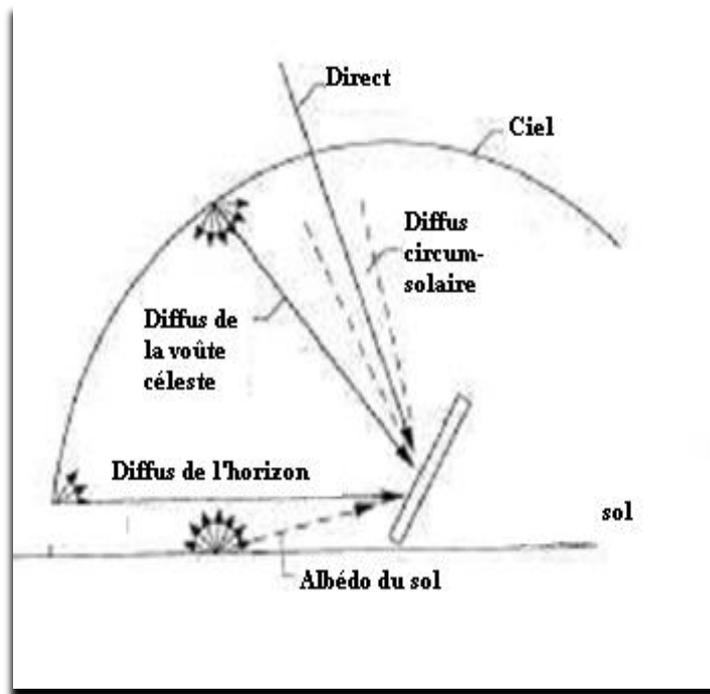


Figure VI.6 : Différentes composantes du rayonnement diffus sur une surface inclinée : direct, diffus circum-solaire, diffus de la voûte céleste, albédo du sol. [10,11]

Le rayonnement diffus peut être décomposé en trois parties : une partie isotrope, une partie qui correspond au halo diffus autour du soleil et une partie qui correspond au rayonnement proche de l'horizon. (voir Figure VI.6)

Plusieurs modèles permettent de donner la diffusion  $D^*$ ; le logiciel Greenius comprend le modèle de Perez :

Le premier terme de l'addition précédente (diffus hors albédo) doit alors être remplacé par :

$$D^* = D_h \cdot (1 - F_1) \cdot \frac{1 + \cos(i)}{2} + D_h \cdot F_1 \cdot \frac{a}{b} + D_h \cdot F_2 \cdot \sin(\beta) \quad (\text{VI-7})$$

où F1 et F2 sont des coefficients exprimant respectivement le degré d'anisotropie autour du soleil et d'anisotropie à l'horizon et au zénith. Ils s'obtiennent à partir des mesures de paramètres de clarté et de brillance du ciel.

#### **VI.11. Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté le schéma de fonctionnement du logiciel de simulation Greenius : son installation, les types de technologies des énergies renouvelables supportées.

Ensuite, nous avons présenté le modèle mathématique implémenté dans ce logiciel :

- Puissance électrique totale
- Facteur de correction de réflexion
- L'irradiance corrigée
- Le facteur de correction de la température

Le modèle de Perez présente les rayonnements diffus et direct.

Tous les algorithmes de Greenius sont mis en application et vérifiés . Cependant, des erreurs de calcul ou les incertitudes des modèles utilisés ne peuvent jamais totalement être évitées. En outre, les paramètres d'entrée choisis incorrects peuvent produire des résultats avec des déviations élevées à celles de la réalité. On recommande strictement, de vérifier tous les résultats de simulation. Aucun élément de passif n'est reçu pour aucune réclamation due aux résultats incorrects de simulation. Afin de permettre une simulation complète, les coûts d'équipement de charge de placement et de calcul de LEC sont mis en application pour toutes les technologies.

Ce logiciel nous a permis d'optimiser le concentrateur parabolique solaire à moteur Stirling, dans le but d'atteindre le rendement optimal, en introduisant les paramètres météorologiques. Les résultats de simulation sont présentés dans le prochain chapitre.

Nous simulons les données météorologiques de l'insolation normale directe, l'humidité, et les insolation globale et diffus, dans le chapitre suivant des résultats du rendement et de puissance produite totale et nette de notre système.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] Schulte-Fischedick, J.; Tamme, R.; Herrmann, U.: CFD Analysis of the Cool Down Behaviour of Molten Salt Thermal Storage Systems; Proceedings of the ES 2008, Energy Sustainability 2008, August 10-14, 2008, Jacksonville, Florida.
- [2] Theunissen, P.-H.; Beckman, W.A.: Solar Transmittance Characteristics of Evacuated Tubular Collectors with Diffuse Back Reflectors. In: Solar Energy Vol. 35 (1985) Nr. 4, S. 311-320.
- [3] A.Kaddour, B.Benyoucef, Simulation of Dish Stirling Solar Concentrator by Greenius Software, Journal of Electrical & Electronics, vol°1, issue 3 (2012).
- [4] Quaschnig V (2006) Regenerative Energiesysteme. HanserVerlagMünchen, Auflage.
- [5] Stirling Engines G, Walker (1980) Clarendon Press. Oxford.
- [6] Rochelle P (2005) LTD Stirling engine simulation and optimization using finite dimension thermodynamic. In: Proceedings of the 12th international Stirlingengine conference, Durham University, UK.
- [7] Kongtragool B, Wongwiset S (2006) Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space, cold space and regenerator. Renew Energy 31: 345-359.
- [8] Senft JR (1991) An ultra low-temperature differential Stirling engine. In: Proceeding of the 5th international Stirling engine Conference, paper ISEC 91032, Dubrovnik.
- [9] Organ AJ (1997) The regenerator and the Stirling engine. Mechanical Engineering Publications, London.
- [10] Van Arsdell BH (2001) Stirling engines. In: Zumerchick J (Eds.) Macmillan encyclopedia of energy 3: 1090-1095.
- [11] Amara S, Nordell B, Benyoucef B, Benmoussat B (2011) Concentration heating system with optical fiber supply. EnergyProcedia 6: 805-814.

## **Chapitre V : Résultats et Discussions**

### **V-1. Introduction :**

Les systèmes paraboliques Stirling donnent le rendement le plus élevé de n'importe quel système de production d'électricité solaire en convertissant presque 31.25% [1] de rayonnement solaire normal incident direct en électricité, en prenant par considération des pertes de puissance des parasites. Par conséquent, la technologie parabolique Stirling est prévue pour surpasser les cylindro-paraboliques en produisant le pouvoir à des régimes plus économiques et à des rendements plus élevés. Puisque les systèmes de Stirling sont modulaires, chaque système est un groupe électrogène indépendant, il peut être assemblé dans des centrales s'échelonnant à taille de kilowatts à 10 MW [2,3].

Ces systèmes peuvent également être combinés au gaz naturel, et l'hybride fournit la production d'électricité continue comme d'autres systèmes à énergie solaire conventionnelle [4,5]. Les systèmes de Stirling d'assiette s'appliquent dans les régions à niveau élevé de l'insolation normal direct. L'Afrique du Nord (où l'Algérie est localisée), le Mexique, le sud-ouest des Etats-Unis, l'Australie.

Un chapitre est réservé à l'étude d'un concentrateur parabolique à moteur Stirling, par une simulation du système. Les éclairissements variables pendant toute l'année, permettent de trouver un rendement annuel optimal.

### **V.2. Données météorologiques :**

#### **Performance du site de Tlemcen**

Tlemcen est située au nord-ouest de l'Algérie, à 520 km au sud-ouest d'Alger, à 140 km au sud-ouest d'Oran et, frontalière du Maroc, à 76 km à l'est de la ville marocaine d'Oujda. Tlemcen, érigée dans l'arrière-pays, est distante de 40 km de la mer Méditerranée.

### **V.3 Performances du concentrateur :**

Dans le but de trouver un état de fonctionnement optimum, nous adoptons un comportement thermique de concentrateur en tant que générateur de la source chaude du moteur Stirling.

En procédant à une étude des paramètres météorologiques (la température, l'irradiation), on cherche l'effet sur ces performances.

Notre gisement solaire est caractérisé par les données météorologiques suivantes : variations annuelles de l'humidité, la température ambiante, l'insolation normale directe, l'insolation diffuse, et l'insolation globale horizontale (figures de (V.1) à (V.5)).

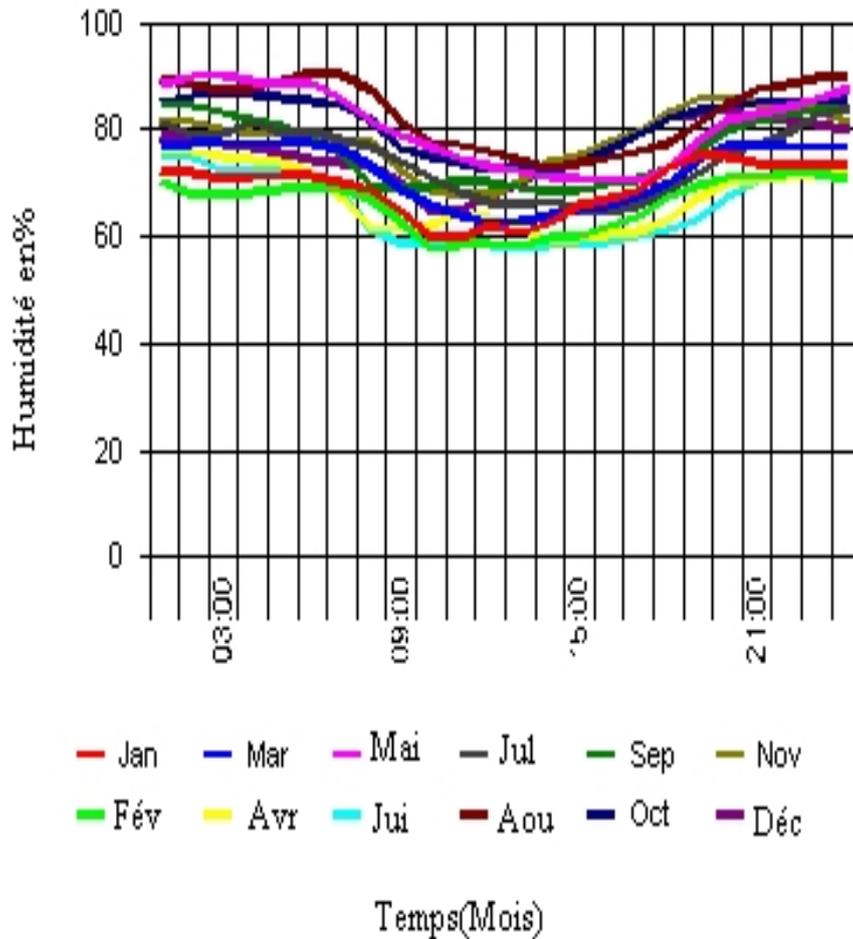


Figure V.1 : Variations mensuelles de l'humidité journalière

D'après la figure V.1, nous constatons que l'humidité est minimale en mois de Juillet d'une valeur moyenne de 57%, et elle devient maximale en Décembre d'une valeur moyenne de 90%.

Dans la figure V.2, nous remarquons que l'insolation normale directe est supérieure en Juin d'une valeur moyenne de 300 W/m<sup>2</sup>, et elle devient minimale en Décembre d'une valeur moyenne de 160 W/m<sup>2</sup>.

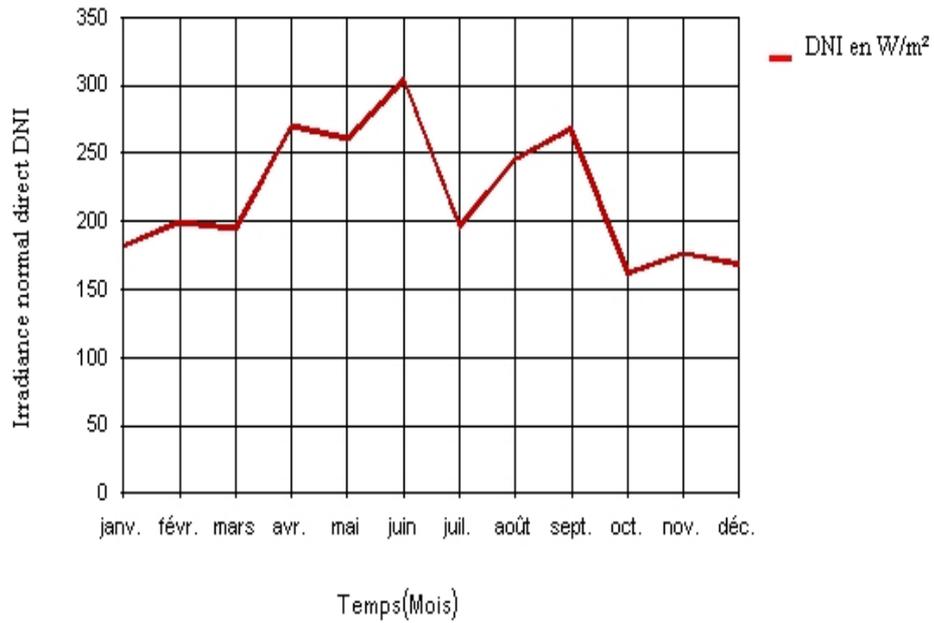


Figure V.2 : Variations mensuelles de l'insolation normale directe

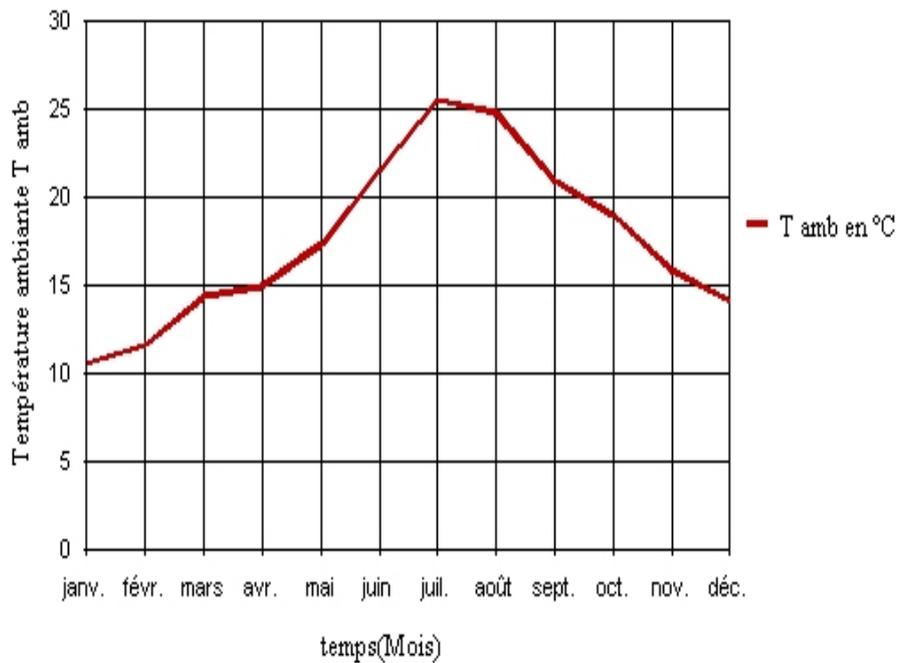


Figure V.3 : Variations mensuelles de la température ambiante

Dans le figure V.3, nous remarquons que la valeur moyenne de la température ambiante est maximale en mois Juillet de 28°C, contrairement en mois Janvier ; elle diminue progressivement d'une valeur moyenne de 12°C.

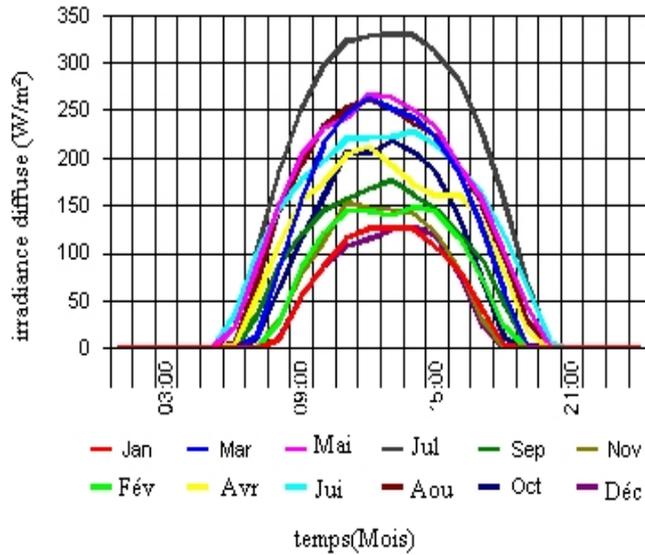


Figure V.4 : Variations mensuelles de l'insolation diffuse journalière

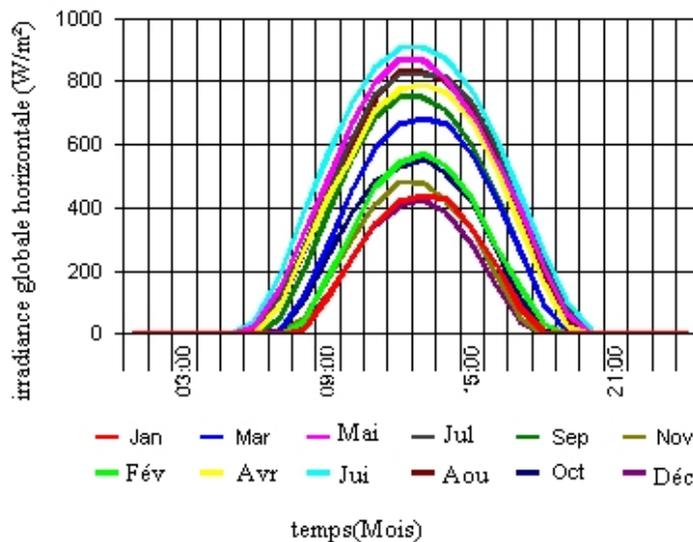


Figure V.5 : Variations mensuelles de l'insolation globale horizontale journalière

Les figures V.4 et V.5 représentent les variations mensuelles des insolation diffuse et globale horizontale respectivement. L'insolation diffuse due aux nuages varie entre deux valeurs moyennes : de 130 W/m<sup>2</sup> (Janvier) à 330W/m<sup>2</sup>(Juillet) (voir figure V.4) , par contre l'insolation globale horizontale qui est la somme des deux insolation directe et diffuse, varie entre deux valeurs moyennes : de 450 W/m<sup>2</sup> (Janvier) à 900 W/m<sup>2</sup>(Juillet) (voir figure V.5).

### V.4 Analyse de caractéristiques de système parabolique Stirling (WGA 2-2 )

Les caractéristiques utilisées dans ce modèle développent la cornière d'élévation du soleil, le bras de mer de l'eau de refroidissement/températures de prise, la pression du moteur, les 100 températures de l'espace d'expansion (la température principale de chaufferette), la puissance nette, la vitesse du vent, la température ambiante, l'insolation normale directe, et la température moyenne de récepteur. Des caractéristiques mesurées sont présentées durant un jour franc (4/26/2009) pour mieux comprendre les facteurs influençant les performances du système parabolique Stirling. Deux jours de caractéristiques de l'été (7/24/09), et hiver (1/13/09) ont été utilisés pour obtenir le système parabolique Stirling, dans le modèle de composante de cycle de Stirling. Le modèle constitutif est alors comparé aux données expérimentales qui n'ont pas été employées pour établir les courbes de rendement. [6,7]

### V.5 Effet de coupure de la puissance matinale

La courbe de la puissance totale contre l'insolation illustre les coupures dans le rendement pendant le matin et le soir comme le montre la figure (V.6). Les systèmes paraboliques Stirling tendent à mal exécuter les calculs le matin. Ceci est dû à la capacité thermique des murs et de l'amortisseur de récepteur exigeant de l'énergie afin d'obtenir une température équilibrée de tête de chaufferette. la figure (V.6) indique également des caractéristiques influencées par l'ombrage le matin résultant des montagnes à l'est, éliminant la plupart des points d'informations à des valeurs plus basses d'insolation [8]. L'ombrage effectif des montagnes a comme conséquence un ajustement de courbe des caractéristiques au-dessus-prévoyant légèrement les performances du système durant le matin, puisque les points d'informations enregistrés à l'insolation sont évalués en dessous de 400 W/m<sup>2</sup>.L'effet de réseau sur les caractéristiques dues aux montagnes est alors minimal.

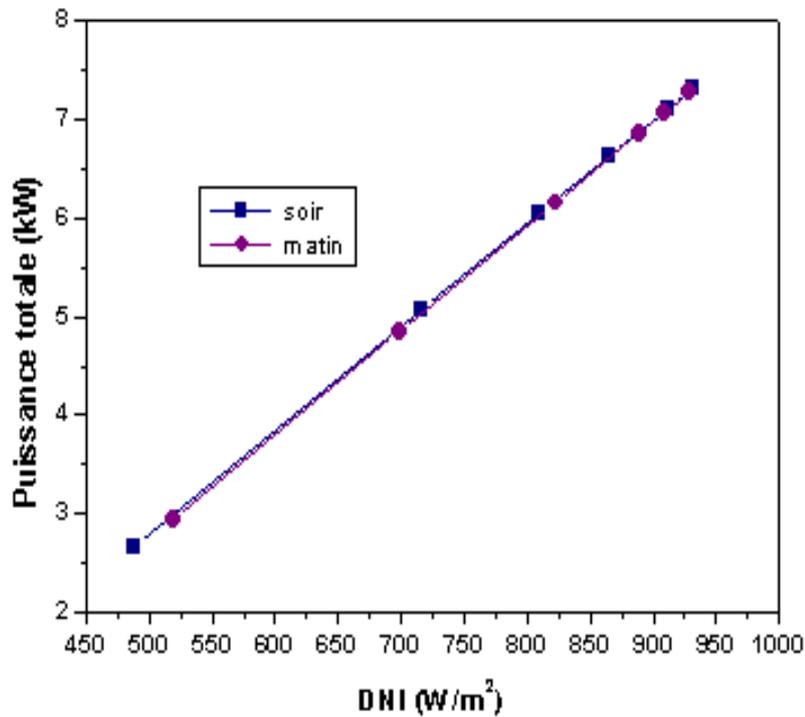


Figure V.6: Coupures de matin et de soir pour le système de WGA de la puissance totale en 26/04/09. [9]

Les puissances totales en fonction des caractéristiques normales directes d'insolation sont présentées pendant deux jours de caractéristiques sur les figures (V.7) et (V.8). Elles montrent le rendement inférieur pendant la mise en train des températures plus froides. Ceci pourrait également être affecté par l'emplacement les élévations du soleil au-dessus des montagnes orientales pendant différentes périodes de l'année. La caractéristique indique une plus haute performance une fois que le système fonctionne aux températures ambiantes inférieures.

Aux températures ambiantes inférieures, les pertes de récepteur sont également plus grandes. Ainsi la puissance nette en fonction de l'insolation normale directe ne sera pas considérée comme élevée aux températures plus froides par rapport aux variations de rendement.

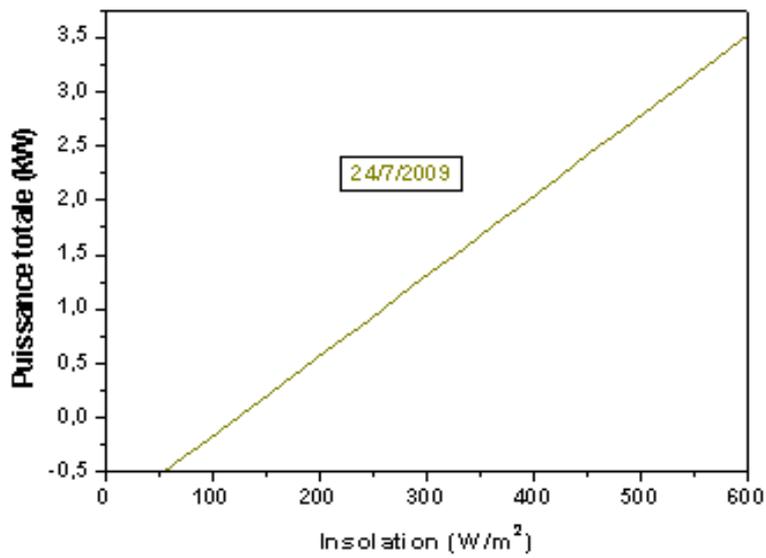


Figure V.7 : Puissance totale en fonction l'insolation pour un jour d'été [9]

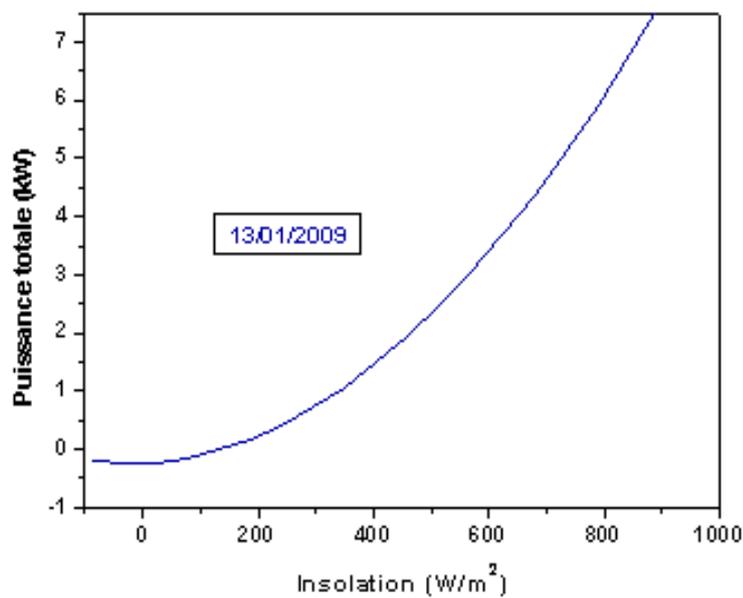


Figure V.8: Puissance totale en fonction l'insolation pour un jour d'hiver [9]

### V.6 Puissance des parasites

Les grands chargements de puissance des parasites ont eu comme conséquence de grandes valeurs négatives pour la puissance nette. Les caractéristiques prennent en charge la puissance nette (les figures V.9 à V.11 pour différentes insolation), mais pas de puissance totale. Les caractéristiques avec des valeurs nettes négatives de puissance ont été filtrées à l'extérieur afin d'obtenir de meilleures valeurs pour les simulations de prévision de rendement. La puissance parasite peut devenir plus grande que 1.0 kilowatt tôt dans le matin ou la soirée due à mettre en marche le moteur et le collecteur partant ou entrant dans de la position d'arrimage. Les grands chargements des puissances parasites supplémentaires tout au long de la journée ont très probablement résulté des erreurs de système ou des états de nuage exigeant le moteur à l'arrêt et au redémarrage.

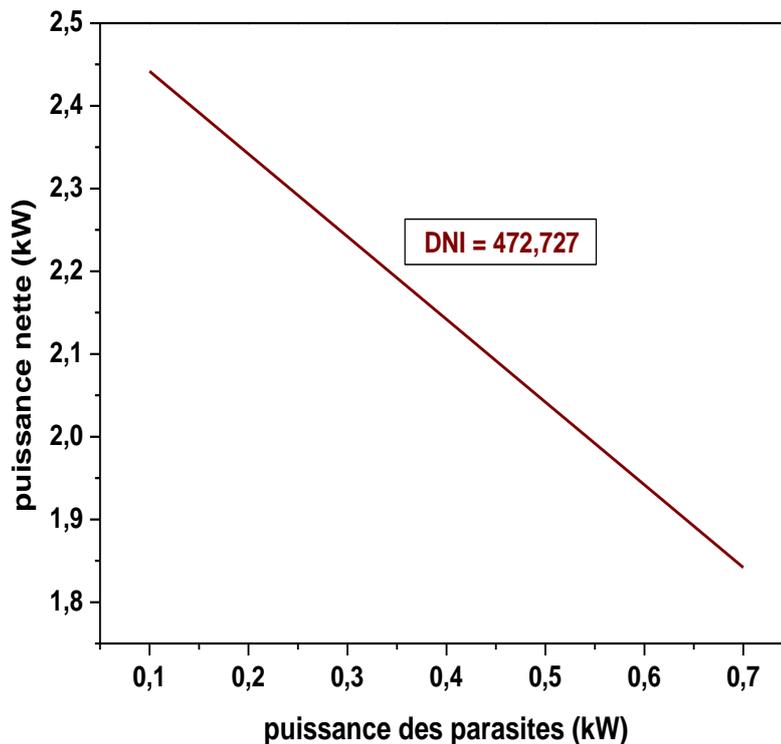


Figure V.9: Puissance nette fonction de la puissance des parasites pour  $DNI = 472,727 \text{ W/m}^2$  [9]

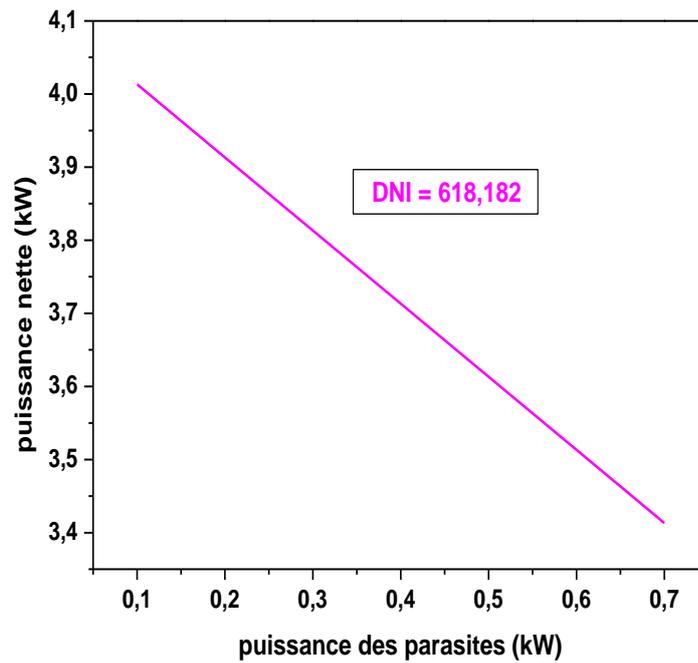


Figure V.10: Puissance nette en fonction de la puissance des parasites pour  $DNI = 618,182 \text{ W/m}^2$  [9]

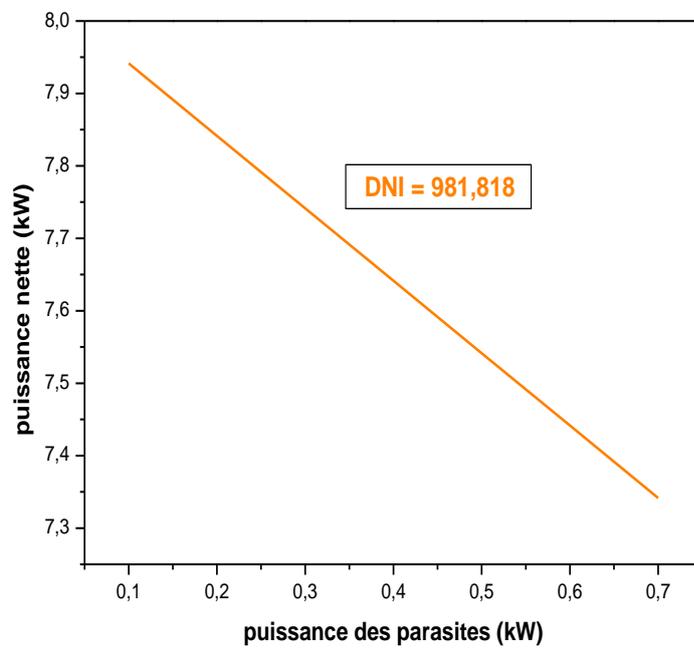


Figure V.11: Puissance nette en fonction de la puissance des parasites pour  $DNI = 918,818 \text{ W/m}^2$  [9]

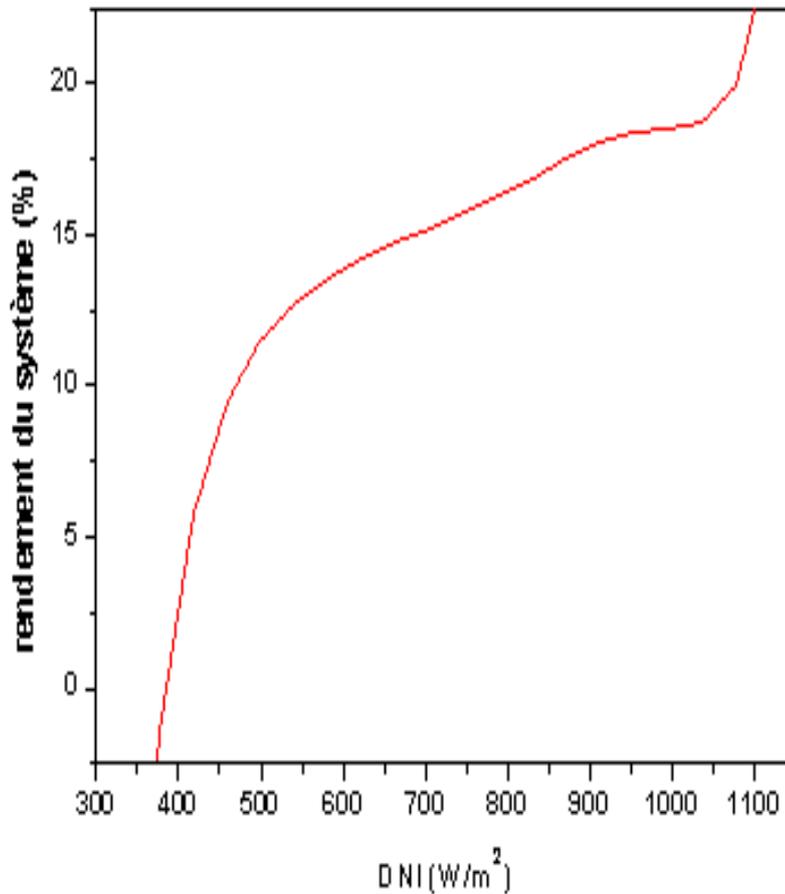


Figure V.12: Rendement du système par rapport à l'insolation directe normale [9]

Sur la figure (V.12) nous observons que le rendement du système parabolique Stirling se développe en augmentant l'insolation solaire jusqu'à ce qu'il devienne continu (19%), avec  $DNI = 1000 \text{ W/m}^2$ .

### V.7 Causes des parasites

Dans les figures (V.13), (V.14) et (V.15), le rendement de systèmes paraboliques Stirling diminue en augmentant la puissance parasite résultant du mouvement du ventilateur, et les pertes thermiques au niveau du récepteur.

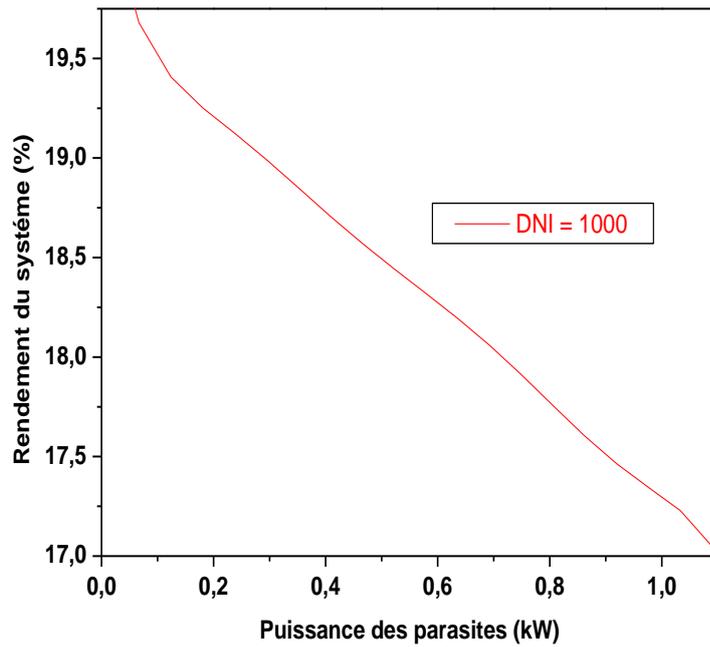


Figure V.13 : Rendement du système en fonction des parasites pour  $DNI = 1000 \text{ W/m}^2$  [9]

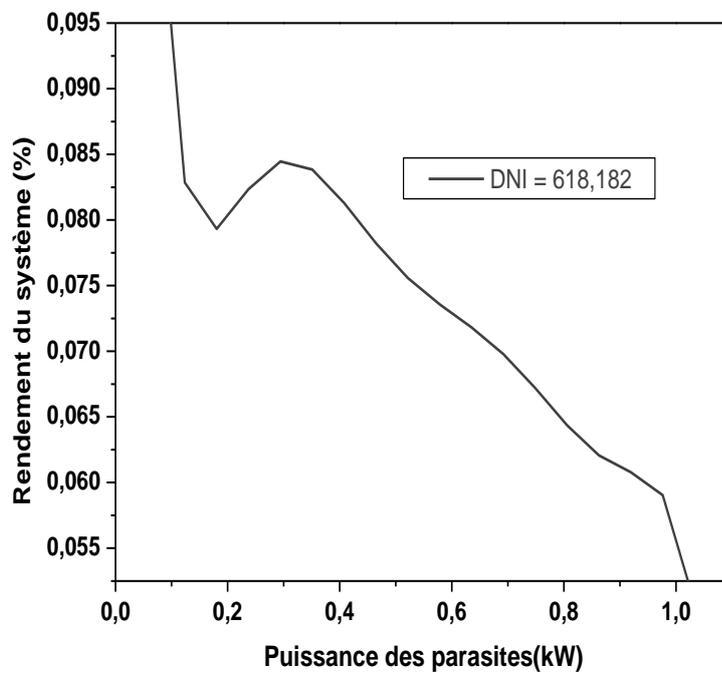


Figure V.14 : Rendement du système en fonction des parasites pour  $DNI = 618.182 \text{ W/m}^2$  [9]

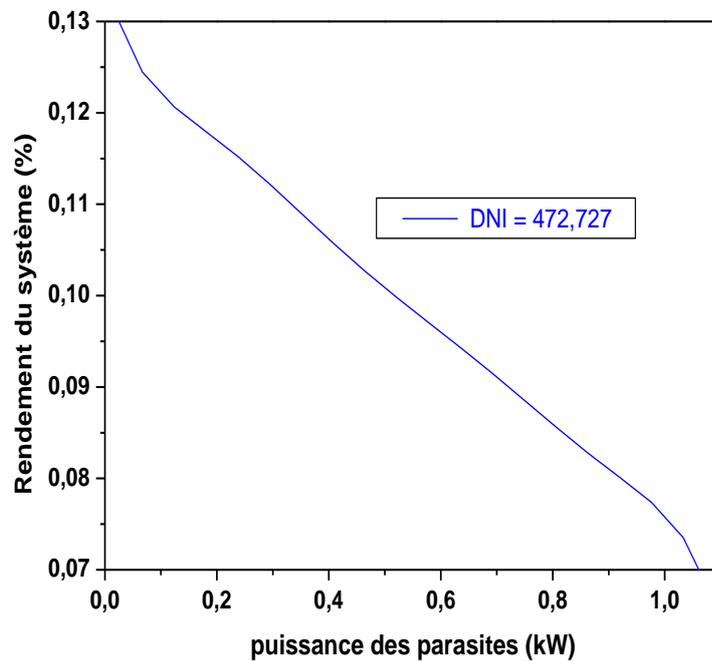


Figure V.15 : Rendement du système en fonction des parasites pour  $DNI = 472.727 \text{ W/m}^2$  [9]

### V.8 Conclusion :

A l'aide des données météorologiques de l'insolation globale, l'humidité, la température ambiante, et plus précisément l'insolation normale directe, nous sommes arrivés à expliquer l'effet de coupure de la puissance matinale. Nous avons choisi un jour typique le 26 Avril 2009.

Pour comprendre l'effet de l'insolation directe sur la puissance totale produite, nous avons choisi deux jours typiques : 24 Juillet 2009 et 13 Janvier, où notre système est performant dans ces deux jours.

Ensuite nous constatons l'effet remarquable des parasites qui résultent des pertes de récepteur et des erreurs de notre système, pour trois valeurs différentes d'insolation directes :  $472.727 \text{ W/m}^2$ ,  $618.182 \text{ W/m}^2$  et  $918.818 \text{ W/m}^2$ .

Nous avons mentionné quelques origines de ces parasites, nous concluons les effets remarquables des parasites sur la performance et le rendement total de notre système, pour différentes valeurs d'insolation directe.

Des simulations ont été faites pour estimer le rendement d'un concentrateur parabolique à moteur Stirling. Les simulations ont montré que le rendement du système et l'énergie totale produite dépendent de la température ambiante et de l'irradiation solaire sur le paraboloïde.

Les résultats obtenus dans ce chapitre ont été publiés dans l'article référencié. [9] L'étude du procédé dans son ensemble peut mettre en évidence l'influence des paramètres sur le rendement total du système. On pourra ainsi analyser l'impact du lieu géographique, de la géométrie, des propriétés optiques, du fluide caloporteur, du cycle thermodynamique.

Le modèle devrait intégrer l'évaluation d'options technologiques telles que le stockage thermique ou l'hybridation avec une autre source d'énergie. Ces deux options, surtout le stockage, renforcent la pertinence des technologies solaires thermodynamiques dans le paysage énergétique actuel et futur.

Pour modéliser le fonctionnement d'un procédé complet, une approche systémique semble particulièrement pertinente. Notre modèle analytique présente une bonne base pour un modèle systémique.

Une étude plus poussée en ce sens permettrait ainsi de simuler le comportement dynamique du système : on pourrait alors étudier sa réaction à différentes situations, comme une variation rapide de l'ensoleillement (nuage...), ou une situation imprévue (panne...). L'intérêt est de vérifier si le comportement du procédé répond à nos attentes, en termes de sûreté, ou de production d'énergie par exemple.

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Taggart S. CSP: dish projects inch forward. *RenawableEnergyFocus* 2008;9(4):52-4.
- [2] Mancini T, Heller P, Butler B, Osborn B, Schiel W, Goldberg V, et al. Dish Stirling system. An overview of development and status. *Journal of Solar Energy Engineering* 2003;125:135-51.
- [3] AbKadir MZA, Rafeeu Y, Adam NM. Prospective scenarios for the full solar energy development in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:3023-31.
- [4] Schawarzböl P, Buck R, Sugarmen C, Ring A, Jesus Marcos Crespo M, Altwegg P, et al. Solar gas turbine systems: design, cost and perspectives. *Sol Energy* 2006 : 80(10) : 1231- 40.

[5] Yong Shuai, Xin-Lin Xia, He-Ping Tan. "Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems". *Solar Energy* 82 : 13-21 (2008).

[6] H.I. Villafañán-Vidalesa, et al. "Monte Carlo radiative transfer simulation of a cavity solar reactor for the reduction of cerium oxide". *international journal of hydrogen energy* 34 : 115-124 (2009).

[7] Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik Universität Stuttgart (ITW): Freigegebene Testberichte zur Solarkollektoren. ITW : Stuttgart 2005.

[8] Andraka, Charles E. "Alignment Strategy Optimization Method for Dish Stirling Faceted Concentrators." *Energy Sustainability 2007*. Long Beach, CA, June 27-30.

[9] A.Kaddour, B.Benyoucef, Simulation and modelization of parabolic solar concentrator, *Journal of Earth Science and Climatic Change*, vol°3 issue 2 (2012).

**CONCLUSION GENERALE ET  
PERSPECTIVES**

## CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés à la technologie solaire thermodynamique, basée sur le concentrateur à moteur Stirling. Cette technologie récente est en pleine évolution. Les performances des systèmes existants s'améliorent et les premières centrales commerciales apparaissent. L'expérience et le savoir faire dans cette technologie progressent donc rapidement, mais beaucoup reste à faire. En France, la filière cylindro-parabolique est particulièrement dynamique sur la technologie parabolique à moteur Stirling.

L'intérêt pour cette technologie est du à sa conception simple, qui permet de réduire les coûts. Les applications vont de la grande échelle pour la production d'électricité, à des installations de petite et moyenne puissances pour le bâtiment ou l'industrie, notamment en cogénération. Le concentrateur parabolique Stirling est composé d'une parabole, et d'un récepteur comprenant un ou plusieurs tubes dans le quel circule le fluide caloporteur. Nous nous sommes en particulier intéressés à un récepteur à un tube. Nous avons étudié le fonctionnement avec l'hydrogène comme un fluide de travail. Il est alors envisageable de le coupler avec un moteur Stirling, qui fonctionne avec de l'hydrogène.

Nous simulons les performances d'un procédé solaire quelconque, basé sur la technologie de concentrateur à moteur Stirling. Ce modèle fait appel à une méthode de Monte Carlo. Il permet de prendre en compte précisément les phénomènes radiatifs.

La proposition que nous présentons ici ne vise en aucun cas à remplacer les outils dédiés au solaire à concentration. Lorsque ces outils sont insuffisants, elle permet aux scientifiques d'y remédier en développant facilement des codes (ce qui est déjà le cas mais demande beaucoup de travail) en attendant que de nouveaux outils spécifiques soient disponibles.

Un modèle de calcul a été développé et utilisé pour étudier les effets des paramètres de conception du système parabolique Stirling.

Le modèle est mis en œuvre dans le logiciel de simulation Greenius, qui nous a permis de prédire les variations de l'énergie électrique nette produite et du rendement total du système étudié. En cet endroit précis, nous utilisons des fichiers d'entrée de données météorologiques.

Le modèle devrait avoir une plus grande précision afin de prévoir la performance du système dans des endroits différents en raison de la vitesse du vent, l'angle d'élévation du soleil et l'altitude.

Ce modèle idéal serait utilisé par des chercheurs en vue d'optimiser les paramètres de conception. Ceci permet d'obtenir une meilleure présentation de performance du système parabolique Stirling.

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'installer un système de concentration solaire. Le rayonnement reçu par un concentrateur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

Nos travaux au cours de cette thèse permettent d'obtenir un rendement annuel du système de 19%.

Les simulations ont montré que le rendement du système et l'énergie totale produite dépendent de la température ambiante et de l'irradiation solaire sur le paraboloïde.

Il existe plusieurs codes de flux solaires :

L'objectif de ces logiciels permet d'optimiser la conception des centrales solaires sur des critères technico-économiques (définir un système concentrateur optimal afin que le récepteur intercepte un maximum d'énergie pour un coût minimal). Aussi la finalité est de simuler et de prédire les performances énergétiques (calculer le rayonnement réfléchi par le système optique et la puissance reçue par l'absorbeur).

Pour cela nous projetons les éléments suivants :

- Cartes de flux ;
- Matrices d'efficacité ;
- Implantation optimisée des réflecteurs ;
- Performances instantanées et annuelles

Chaque type de logiciel répond à des objectifs distincts. Les codes d'optimisation (OPTI) utilisent la méthode de convolutions et les codes d'analyse de performances (PERF) et font appel au lancer de rayons. Les méthodes de lancer de rayons sont plus précises pour des systèmes à géométrie complexe car elles permettent de modéliser des surfaces optiques non idéales.

Cependant elles consomment des temps de calcul plus longs. Les codes d'optimisation peuvent modéliser l'installation complète dans le but d'une optimisation globale, tandis que les codes PERF permettent souvent de ne traiter que le sous-système optique. P. Garcia et al. ont publié une revue comparative des codes de calculs utilisés pour la simulation des systèmes à récepteur central. Des logiciels similaires au Greenius permettent de simuler particulièrement les systèmes de la concentration solaire :

**DELSOL** : Depuis 1986, un outil facile d'accès permet la conception et l'optimisation de centrale solaire. Les temps de calcul plus faibles que ceux de MIRVAL et HELIOS les rendent efficaces pour optimiser la hauteur de tour, les dimensions du champ selon des critères économiques. WINDELSOL est une adaptation du code pour Windows. Bien qu'il propose une interface conviviale, il ne permet pas d'étudier les systèmes existants, car on ne peut pas implémenter le champ d'héliostats personnalisé. Une précision assez faible l'empêche de traiter de manière fiable les petites installations. Ce logiciel est une aide intéressante à la conception et aux études préliminaires de projets de grande taille.

**HELIOS**: C'est des premiers codes de calcul permettant de modéliser, avec une bonne précision, des centrales à tour de petite taille, des capteurs cylindro-paraboliques et des Dish-Stirling. Il utilise la technique optique des cônes qui calculant le produit de convolution des transformées de Fourier des deux distributions angulaires des rayons réfléchis et du profil solaire. L'implémentation de la géométrie des capteurs est très peu convivial, ce qui rend le code inadapté aux grands champs d'héliostats. De plus il ne propose pas l'optimisation d'aucun paramètre.

**UHC (University of Houston Code)**: Il est utilisé entre autre pour modéliser SolarOne et SolarTwo. Ce code d'optimisation modulaire (OPTI) permet en fonction de la situation géographique, de la météo, du champ d'héliostats et de la géométrie du récepteur, de calculer des performances instantanées, quotidiennes, annuelles, et d'optimiser le champ de miroirs et le récepteur. Un module permet même en temps réel de définir des stratégies de pointage pour protéger le récepteur de flux trop élevés.

**MIRVAL** : Ce code utilise des méthodes de Monte-Carlo. Il a été développé pour analyser précisément les performances des systèmes optiques (héliostats). Il sert à vérifier les densités de flux calculées par des logiciels OPTI (Delsol, Hélios, UHC). Peu flexible, il n'a pas permis la modélisation du champ de Thémis. La DLR a rajouté un module permettant d'optimiser sur des critères énergétiques, la disposition au sol des miroirs.

**SOLTRACE** : Ce code commode permet de modéliser tout type de capteurs ou d'installations (concentrateurs paraboliques à moteur Stirling, fours solaires, centrales à tour(s), capteurs cylindro-paraboliques, Lentilles de Fresnel...) et il accepte les géométries complexes. Il propose des outils graphiques de visualisation. Utilisant des algorithmes de Monte-Carlo, il est très performant pour fournir des cartes de flux.

**FIAT LUX** : Il est destiné à qualifier les propriétés optiques des héliostats, ce code de performance ne permet pas la modélisation de système multi-réflecteurs puisqu'il ne tient compte ni des effets d'ombre ni de blocage. Les données recueillies par ce code sur un miroir donné, peuvent sans doute être valorisées par un autre code de calcul.

**HFLCAL (Heliostats Field LayoutCALculations)** : (Parfois appelé suite RCELL) Ce code est basé sur le calcul de convolution de trois distributions : profil solaire, défauts détaillés des miroirs et erreurs de pointage. En effectuant des centaines de calculs de production annuelle en un temps raisonnable, il permet de maximiser la production d'électricité ou de minimiser les coûts de production en adaptant au choix les héliostats, la tour, le type de récepteur et/ou le cycle thermodynamique. En tant que logiciel de type OPTI, il détermine très précisément la puissance totale reçue mais il est moins fiable en ce qui concerne la valeur du flux maximal et la distribution des flux sur le récepteur.

D'autres codes ont récemment été développés, tels que TONATIUH de CENER (Centre Espagnol sur les énergies renouvelables), comparable à Soltrace. SOLVER de SOLUCAR est un code de ray-tracing pour la modélisation des CRS. SENSOL a été développé par l'industriel SENER pour concevoir la Centrale SolarTres (projet GEMASOLAR). On peut aussi citer SCT [50], une boîte à outils pour Matlab conçue par le CIEMAT qui permet à la fois le calcul des performances des systèmes optiques à tour et la génération directe d'une implantation optimisée d'un champ d'héliostats.

## **PERSPECTIVES**

La performance et l'analyse économique à l'aide des moteurs Brayton-Joule au lieu de moteurs Stirling dans un cycle fermé utilisant de l'hydrogène ou l'hélium comme un fluide de travail, seraient d'une grande importance.

Il permet l'analyse d'un cycle combiné utilisant des turbines à gaz à la place des moteurs Stirling et une turbine à vapeur donnant une étude de conception précieuse.

Les turbines à gaz peuvent être acquises à l'extérieur du plateau de sorte qu'elles seraient probablement moins chères que les moteurs Stirling à grande échelle. DESERTEC dans la région MENA (Moyen-Orient et Afrique du Nord) seront lancés, les nouvelles technologies de concentration solaire font preuve et celles déjà existantes seront améliorées.

Pour modéliser le fonctionnement d'un procédé solaire complet, nous devrions adopter une approche systémique. Notre modèle analytique est une bonne base pour un modèle systémique. Il serait intéressant de développer un modèle de stockage thermique et d'hybridation.

L'étude systémique permettrait ainsi de simuler le comportement dynamique du système. On pourrait alors comparer le comportement réel de l'installation avec celui prédit par le modèle. Il s'agirait d'une étude des stratégies de contrôle d'un procédé solaire réel appuyée par le modèle systémique.

# **ANNEXES**

## Annexe A : Configuration Beta du moteur Stirling

La configuration bêta intègre un plongeur et le piston de puissance dans le même cylindre et ne dispose que d'un cylindre pour l'expansion et la compression de l'espace comme le montre la Figure A-1. Le moteur bêta est la configuration d'origine du moteur Stirling, représenté par Robert Stirling en 1816. Agent de déplacement transfère du gaz entre l'espace de compression et d'expansion dans le dispositif chauffant, régénérateur, et le refroidisseur. Le piston de puissance est souvent à l'extrémité froide du cylindre et comprime le fluide de travail lorsque la majeure partie du gaz est dans l'extrémité froide. Le fluide de travail se dilate lorsque du gaz est transféré à l'extrémité chaude. Le maximum d'efficacité théorique mécanique pour un moteur fonctionnant au bêta des SBP V-160 l'état du moteur est de 77,1%, ceci est légèrement supérieur à la disposition alpha Siemens à 76,8%, mais beaucoup plus élevé que l'arrangement alpha de base de 62,2%.

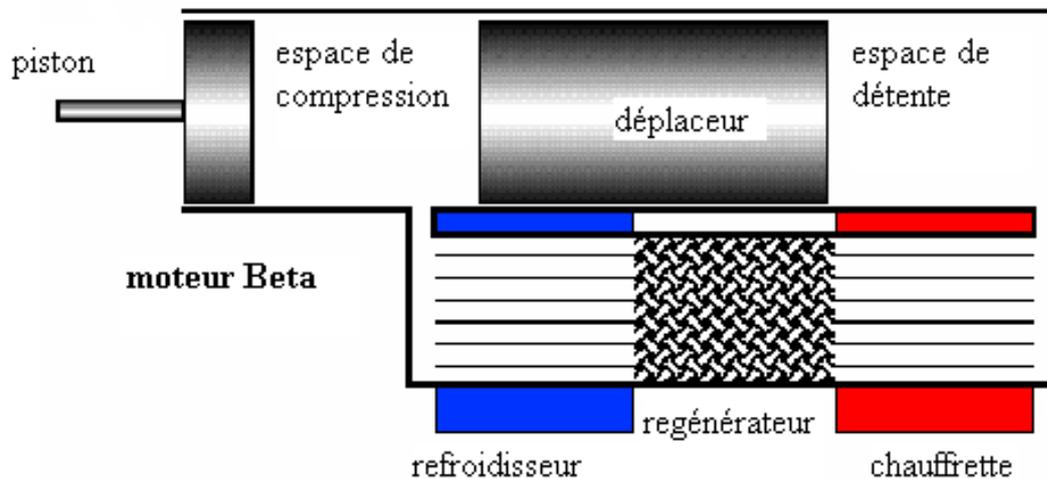


Figure A-1 Moteur Stirling bêta (Urieli, 2007)

**Processus 1-2: Compression**

La majorité des gaz en expansion sont dans l'espace de compression et le gaz se refroidit car il transfère la chaleur vers le dissipateur externe. Le fluide de travail se contracte pendant qu'il refroidit et tire l'intérieur de piston de pouvoir suivant les indications de la figure A-2.

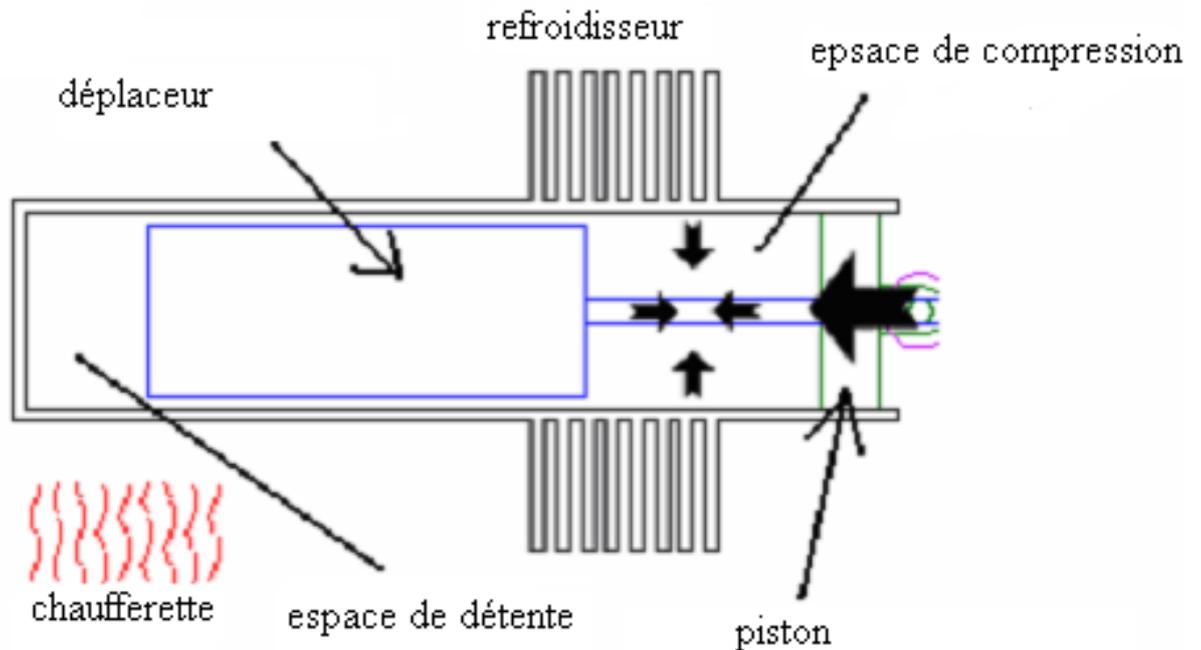


Figure A-2 Phase de compression Beta (régénérateur non représenté) (Keveney, 2001)

**Procédé 2-3: Transfert de la chaleur provenant du régénérateur au fluide de travail**

La plupart des gaz en contraction sont toujours dans l'espace de compression comme le montre la figure A-3. L'élan du volant continue de faire tourner le vilebrequin environ 90 degrés supplémentaires. Le fluide de travail est transféré à travers le déplaceur et il revient dans le cylindre de détente. Tandis que le gaz se déplace à travers le régénérateur (non représenté), il absorbe l'énergie thermique.

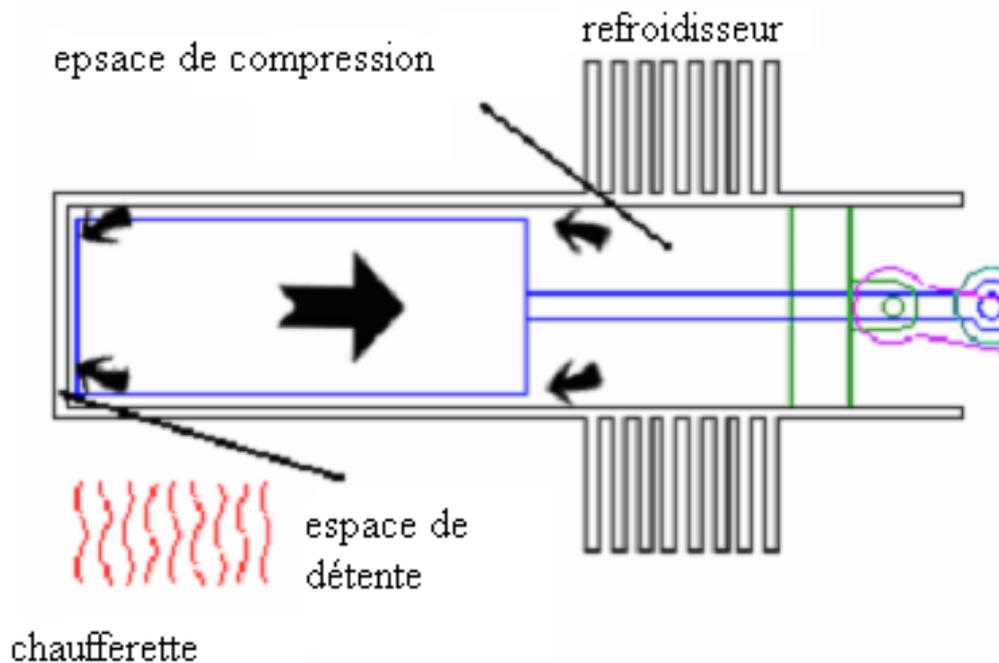


Figure A-3: Transfert de chaleur Beta du régénérateur (non représenté) pour le fluide de travail (Keveney, 2001)

### Processus 3-4: Expansion

La majeure partie du fluide de travail est dans l'espace de détente lorsqu'il est chauffé par une source externe telle que l'énergie solaire ou de la biomasse. Le gaz se dilate dans l'espace de détente et à travers le régénérateur tout en conduisant le piston vers l'extérieur comme le montre la Figure A-4.

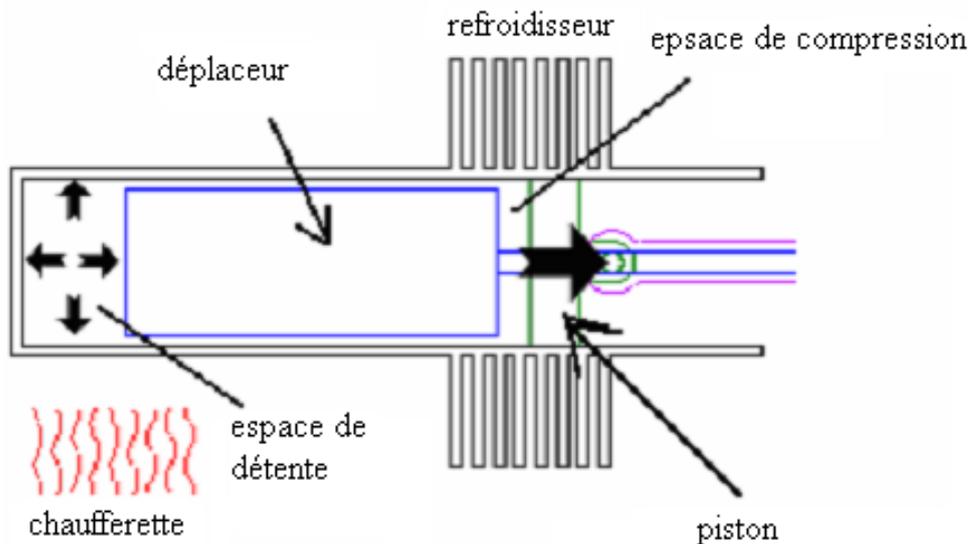


Figure A-4: phase d'expansion beta (Keveney, 2001)

#### Processus 4-1: Le transfert de chaleur du fluide de travail dans le régénérateur

La plupart des gaz sont encore dans l'espace d'expansion. L'élan du volant fait tourner le vilebrequin dans un délai supplémentaire de 90 degrés. Le gaz restant va être poussé dans le plongeur en l'espace de compression comme le montre la Figure A.5. L'énergie est transférée du fluide de travail vers le régénérateur dans cette étape.

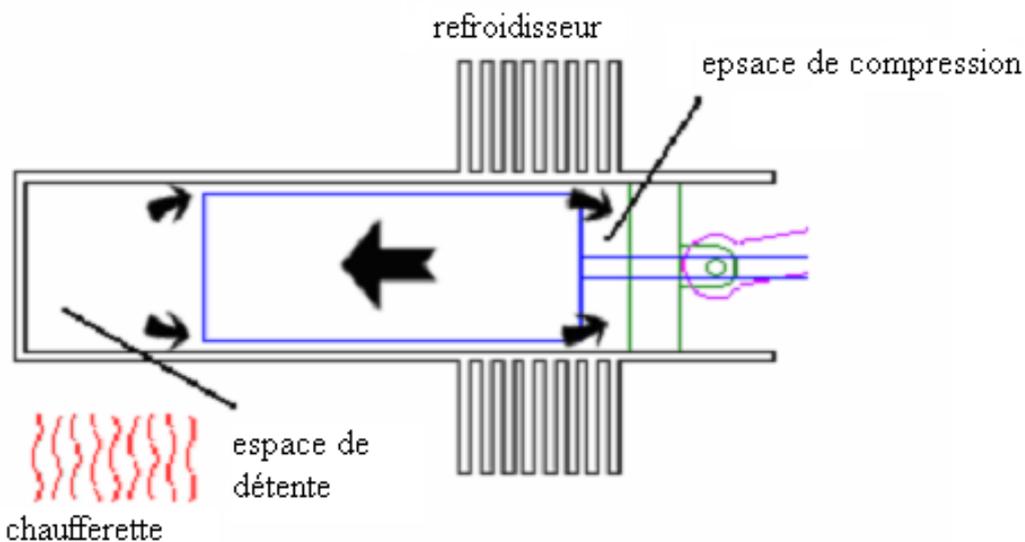


Figure A-5: Transfert de chaleur Beta du fluide de travail dans le régénérateur (Keveney,2001)

### Annexe B : Configuration Gamma du moteur Stirling

La configuration de gamma moteur Stirling est similaire à la configuration bêta, sauf que le plongeur et le piston de puissance se trouvent dans des cylindres différents qui sont reliés entre eux de manière pneumatique comme indiqué à la Figure A-6 (Urieli et Berchowitz, 1984). Ils ont souvent de plus grands volumes morts que l'alpha ou bêta moteurs, et donc ont des pouvoirs spécifiques. Les moteurs gamma sont utilisés lorsque les avantages pour l'utilisation de cylindres séparés l'emportent sur l'inconvénient pour le pouvoir qui peut être pour le pompage de l'eau.

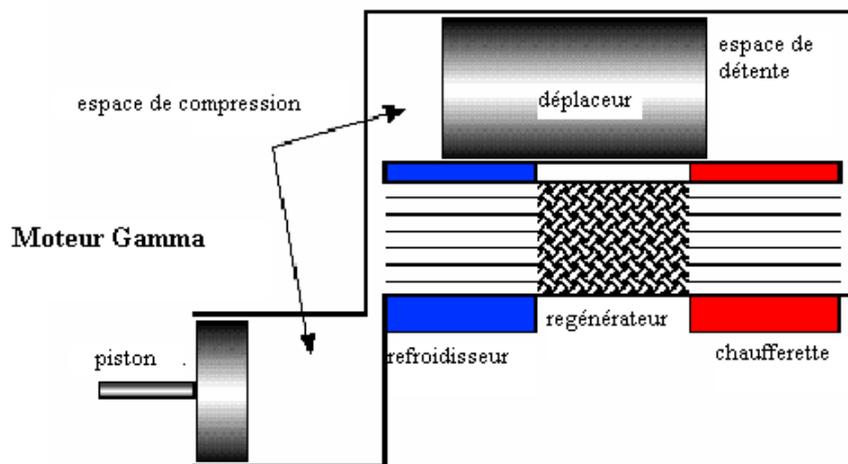


Figure A-6: Configuration Gamma du moteur Stirling (Keveney, 2001)

## Abstract

Solar energy is the source of the most promising energy and the powerful one among renewable energies. Photovoltaic electricity (statement) is obtained by direct transformation of the sunlight into electricity, by means of cells statement.

Greenius is a powerful simulation environment for the calculation and analysis of renewable power projects such as solar thermal trough power plants, photovoltaic systems, wind parks or Dish/Stirling systems.

In this work, we simulated the operation of the concentrator dish Stirling, this simulation allowed us correctly to predict the influence of the meteorological parameters (direct normal insolation, ambient temperature, air density (altitude), the angle elevation of the sun, and wind speed) on the system performance and the net power produced.

**Keywords:** Simulation, Dish Stirling, Greenius software, Net power, Gross power

---

## Résumé

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque (déclaration) est obtenue par transformation directe de la lumière du soleil en électricité, en utilisant des cellules photovoltaïques.

Greenius est un logiciel puissant de simulation pour le calcul et l'analyse des projets d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire centrale thermique minimale, les systèmes photovoltaïques, les parcs éoliens ou les systèmes paraboliques Stirling.

Dans ce travail, nous avons simulé le fonctionnement de concentrateur parabolique Stirling, cette simulation nous a permis de prédire correctement l'influence des paramètres météorologiques (ensoleillement directe normale, la température ambiante, la densité de l'air (altitude), l'angle d'élévation du soleil et du vent vitesse) sur la performance du système et de la puissance nette produite.

**Mots-clés:** Simulation, Parabolique Stirling, logiciel Greenius, puissance nette, puissance totale

## ملخص

الطاقة الشمسية هي مصدر الطاقة الأكثر وعدا و قوة بين الطاقات المتجددة. يتم الحصول على الكهرباء الضوئية (البيان) عن طريق التحول المباشر لضوء الشمس إلى كهرباء، و هذا بواسطة بيان الخلايا. Greenius هي بيئة محاكاة قوية لحساب وتحليل مشاريع الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية الحرارية محطات توليد الطاقة الحوض الصغير، والنظم الكهربائية الضوئية، حدائق الرياح أو أنظمة صحن / ستيرلينغ. في هذا العمل، قمنا بمحاكاة تشغيل المكثف ستيرلينغ طبق، حيث سمحت لنا هذه المحاكاة بالتنبؤ بشكل صحيح لتأثير المعلمات للأرصاء الجوية (تشميس الطبيعي المباشر، ودرجة الحرارة المحيطة، وكثافة الهواء (ارتفاع)، وزاوية ارتفاع الشمس، و طاقة الرياح أنتجت السرعة) على أداء النظام وقوة الشبكة.

**كلمات مفتاحية:** محاكاة ، صحن ستيرلينغ، برنامج Greenius، الطاقة الصافية، الطاقة المجملة